



การส่งผ่านสปันในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

วิทยานิพนธ์
ของ
นายยา แสนภูมิ

พหุ ประถมศึกษา

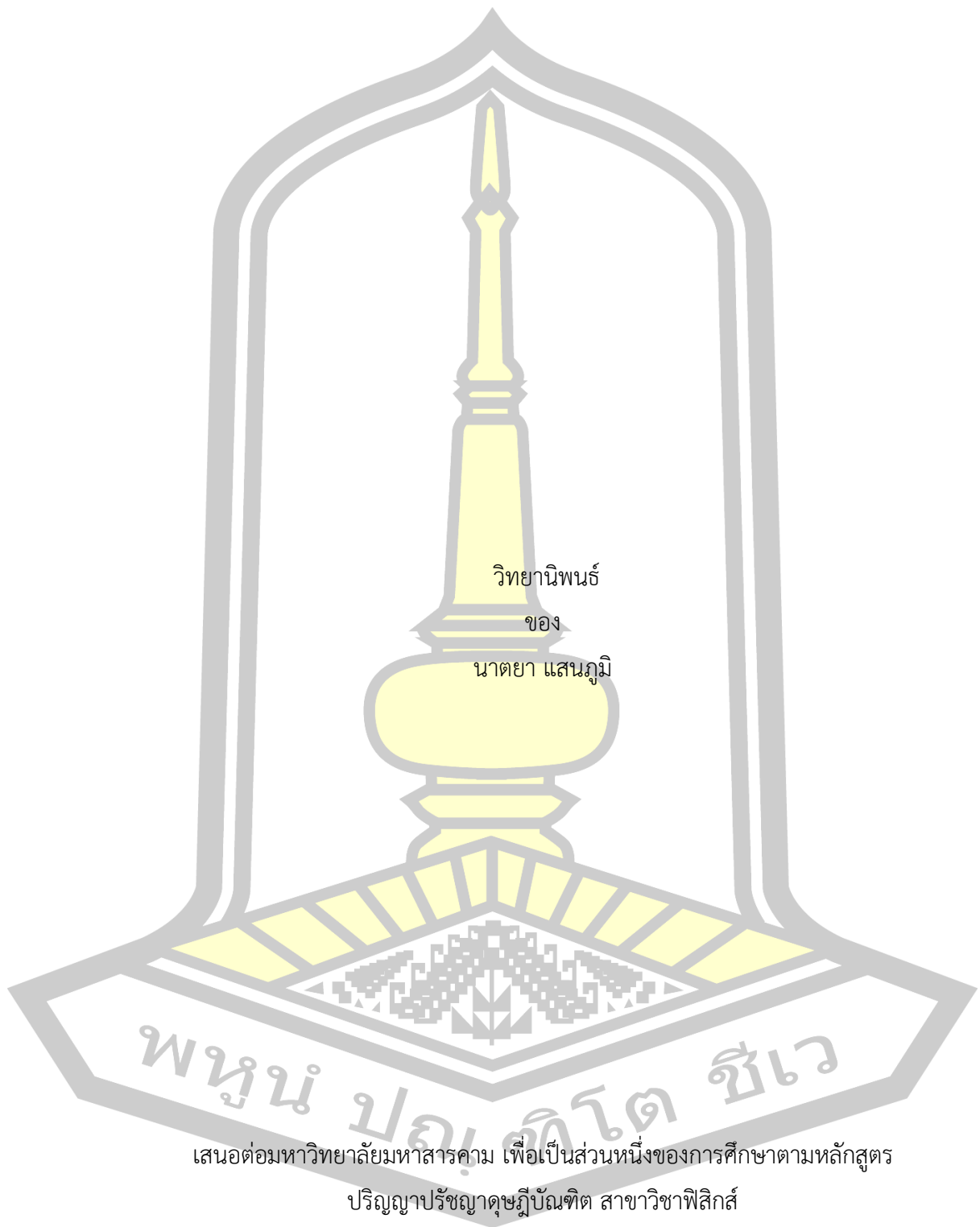
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มีนาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การส่งผ่านสปินในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



วิทยานิพนธ์

ของ

นาดยา แสนภูมิ

พูน ปรุทธิโต ชีวะ

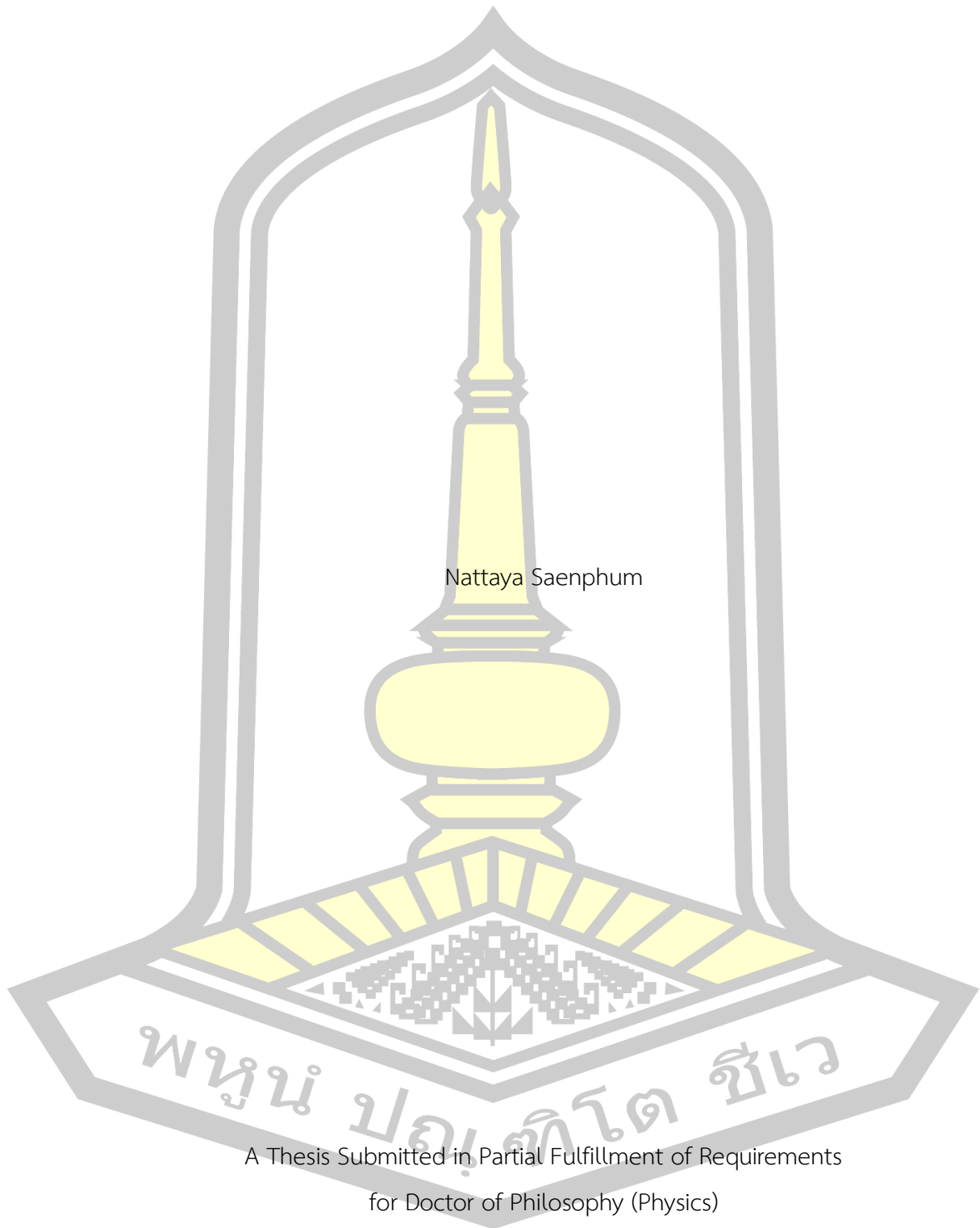
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มีนาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Spin Transport in The Reader of Hard Disk Drive



Nattaya Saenphum

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Physics)

March 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวนาดยา แสนภูมิ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. สุธี บุญช่วย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. พรรณวดี จุรีมาศ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. เจษฎา จุรีมาศ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ประธาน ศรีวิไล)

กรรมการ

(รศ. ดร. อรรวรรณ ฤทธิเดช)

มหาวิทยาลัยยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนปัญญาพิบัตินิเวศ

(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การส่งผ่านสปินในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์		
ผู้วิจัย	นาตยา แสสนภูมิ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี จุรีมาศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา จุรีมาศ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2563

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินมีความสำคัญต่อการออกแบบและพัฒนาหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีและการทดลอง การศึกษาเชิงทฤษฎีจะพิจารณาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินของวัสดุด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน โดยแบบจำลองระดับอะตอมจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันและแบบจำลองการสะสมสปินจะถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการส่งผ่านสปิน จากนั้นค่า MR และอัตราส่วน MR จะสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน งานวิจัยได้ทำการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่โดยทำการบ่อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ (current perpendicular to plane giant-magnetoresistance, CPP-GMR) ผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ ความหนาของชั้นฟิล์มและอุณหภูมิ โดยค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าสูงในวัสดุที่มีระยะดีเฟสซิงที่ต่ำและค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ซึ่งมีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูงจะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance-area product, RA) ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรปรกติ จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลของความหนาของชั้นฟิล์มในโครงสร้างสปินวาล์วที่มีต่อค่า MR พบว่าอัตราส่วน MR จะมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นอิสระและจะมีแนวโน้มคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน แต่ค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผกผันกับความหนาของชั้นสเปสเซอร์ และเมื่อทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลพบว่า เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า RA มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผล

เนื่องมาจากการลดลงของคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการส่งผ่านสปินของวัสดุ นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ทำการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ในเชิงการทดลองของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม จากผลการวัดค่าความต้านทานในหัวอ่านข้อมูลแสดงให้เห็นว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กและมีความหนาของชั้นสเปเซอร์ที่มากจะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงและค่าอัตราส่วน MR ที่ต่ำ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล พบว่าค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัส ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับผลการคำนวณเป็นอย่างดี

ในลำดับสุดท้ายงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล จากผลการศึกษาพบว่าขนาดของค่าสัญญาณรบกวนจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิและขนาดของสัญญาณรบกวนสามารถลดลงได้โดยทำการป้อนสนามฮาร์ดไบอัส เนื่องจากสนามฮาร์ดไบอัสจะเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามที่ป้อนและลดความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากความร้อน จากการศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงแม่เหล็กเชิงทฤษฎีและเชิงการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำให้เข้าใจปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล สามารถอธิบายสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนและวิธีการลดสัญญาณดังกล่าวเพื่อให้หัวอ่านข้อมูลทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคตได้

คำสำคัญ : หัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์; พฤติกรรมการส่งผ่านสปิน; โครงสร้าง CPP-GMR; แบบจำลองระดับอะตอม



TITLE Spin Transport in The Reader of Hard Disk Drive
AUTHOR Nattaya Saenphum
ADVISORS Associate Professor Phanwadee Chureemart , Ph.D.
 Assistant Professor Jessada Chureemart , Ph.D.
DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Physics
UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2020
 University

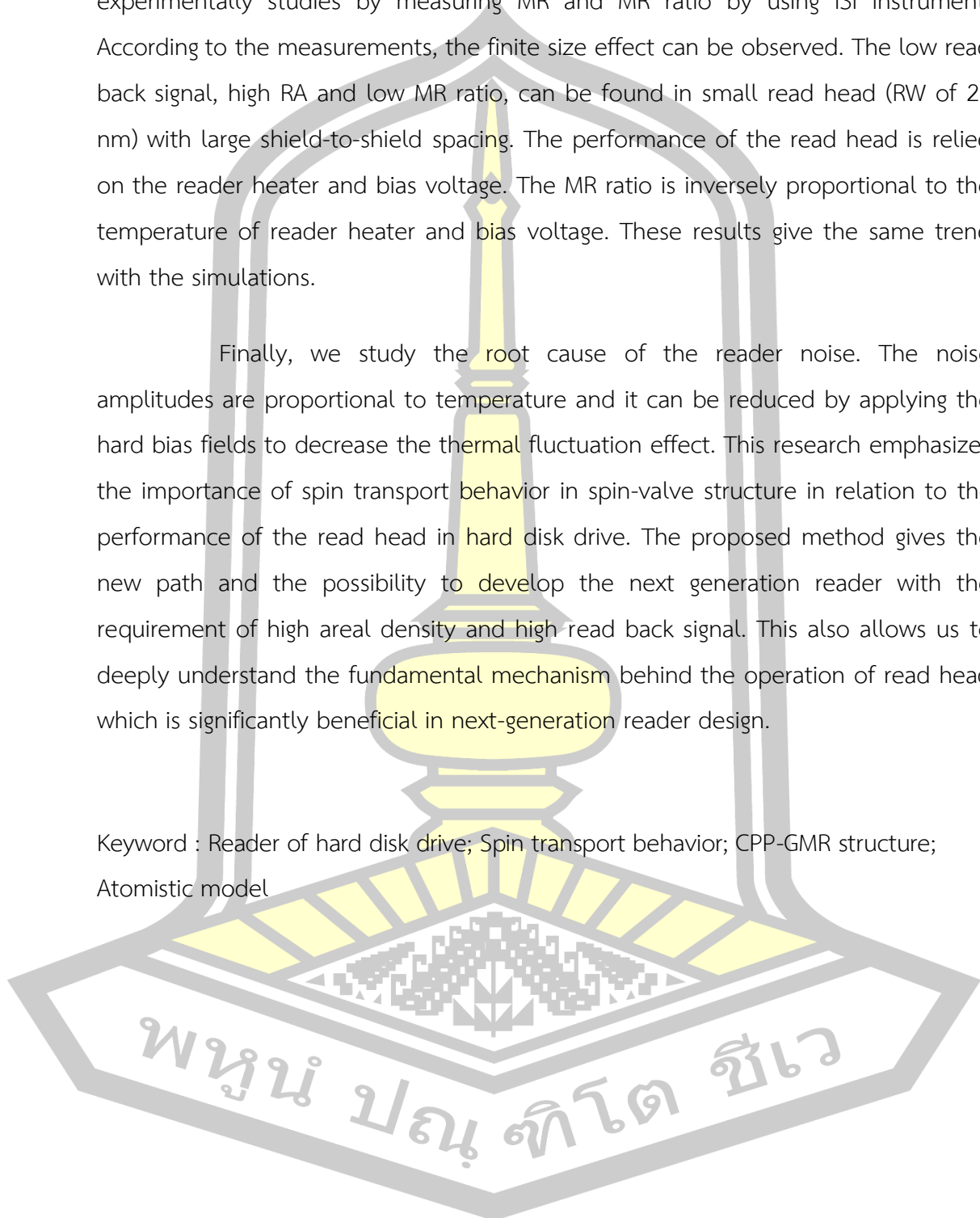
ABSTRACT

Study of spin transport behavior in magnetic structure becomes important for development and design of read head in hard disk drive since the read back signal can be detected from the magnetoresistance (MR) change. In this work, we have theoretically and experimentally investigated MR phenomenon. It can be theoretically studied and described by employing the atomistic model coupled with the spin transport model. The MR and MR ratio are calculated from the gradient of spin accumulation and spin current. Firstly, we consider the MR and MR ratio in the current perpendicular to plane giant-magnetoresistance (CPP-GMR) structure, FM/NM/FM. The results show that MR ratio depends on the type and spin transport properties of material, the film thicknesses and temperature. The MR ratio is likely to increase with decreasing spin dephasing and increasing spin polarization. We found that the spin valve structure with Heusler alloys provides high spin polarization resulting in low resistance-area product (RA) and high MR ratio. Additionally, the interdiffusion of the FM/NM/FM interface gives rise to large spin scattering significantly enhancing the MR ratio. The results also indicate that the MR ratio is thickness dependent. It directly proportional to free layer (FL) thickness and becomes saturated when FL thickness is much larger than the spin diffusion length. Whereas, it is inversely proportional to the thickness of spacer layer. Furthermore, the effect of temperature on the readback signal via RA and MR ratio is investigated. The RA increases and MR ratio decreases at high temperature due to the reduction in magnetic and spin transport properties of materials. To verify the correctness of the

proposed model, the read heads with different condition from industry are experimentally studies by measuring MR and MR ratio by using ISI instrument. According to the measurements, the finite size effect can be observed. The low read back signal, high RA and low MR ratio, can be found in small read head (RW of 26 nm) with large shield-to-shield spacing. The performance of the read head is relied on the reader heater and bias voltage. The MR ratio is inversely proportional to the temperature of reader heater and bias voltage. These results give the same trend with the simulations.

Finally, we study the root cause of the reader noise. The noise amplitudes are proportional to temperature and it can be reduced by applying the hard bias fields to decrease the thermal fluctuation effect. This research emphasizes the importance of spin transport behavior in spin-valve structure in relation to the performance of the read head in hard disk drive. The proposed method gives the new path and the possibility to develop the next generation reader with the requirement of high areal density and high read back signal. This also allows us to deeply understand the fundamental mechanism behind the operation of read head which is significantly beneficial in next-generation reader design.

Keyword : Reader of hard disk drive; Spin transport behavior; CPP-GMR structure; Atomistic model



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์พรณวดี จุริมาศและผู้ช่วยศาสตราจารย์เจษฎา จุริมาศ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณอาจารย์ทั้งสองท่านที่ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าได้ศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา ได้เรียนรู้ประสบการณ์ที่มีค่าในการทำวิจัยทั้งในและต่างประเทศและการฝึกประสบการณ์ในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังให้คำปรึกษาและอบรมให้ข้าพเจ้ารู้จักวางแผนการทำงาน การใช้ชีวิต และอ่อนน้อมถ่อมตน อีกทั้งยังเมตตา ดูแลเอาใจใส่ ส่งเสริม และมอบโอกาสที่มีค่าให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ Prof. Roy Chantrell ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในระหว่างการทำวิจัยที่มหาวิทยาลัยยอร์ก พร้อมทั้งให้คำชี้แนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

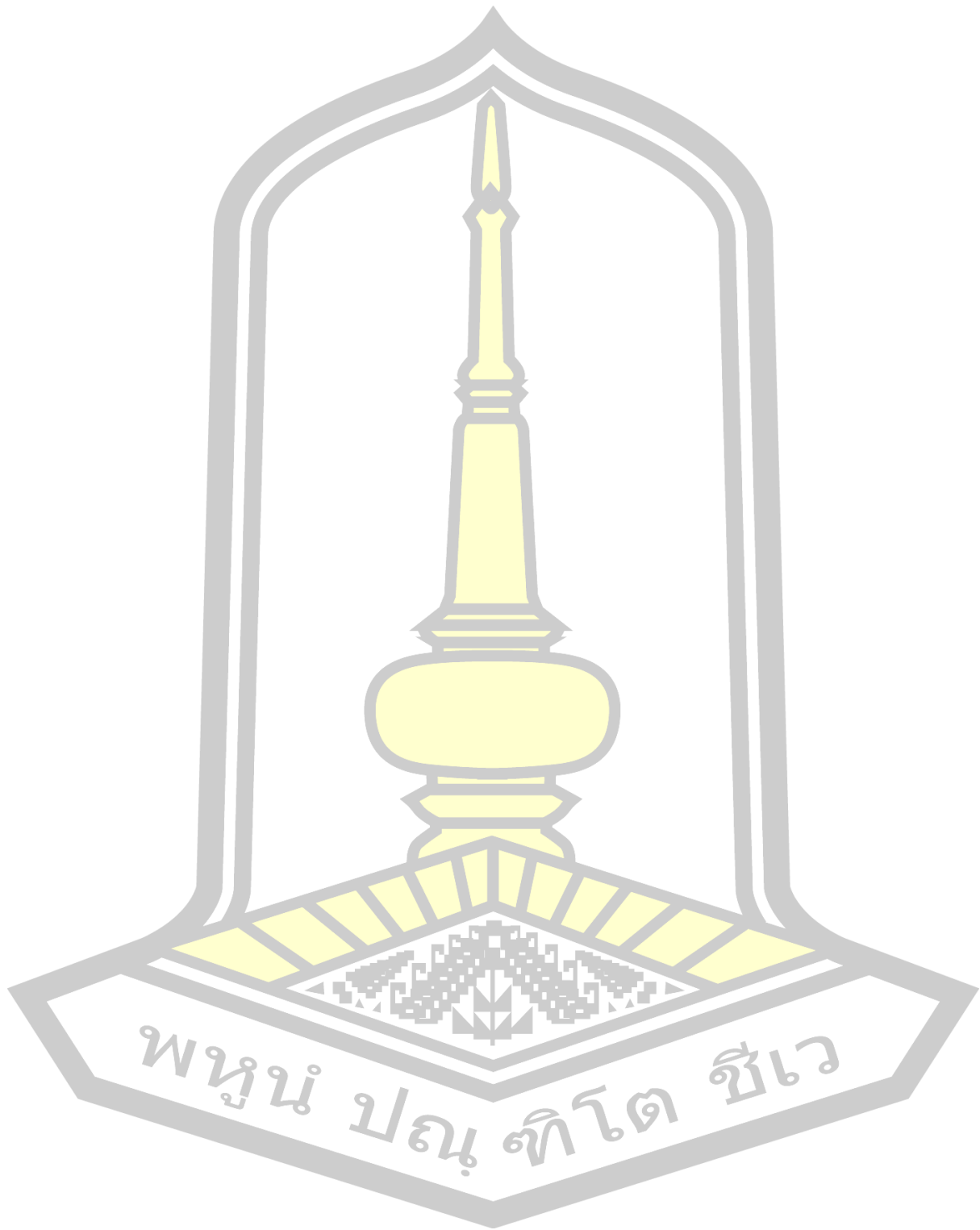
ขอขอบพระคุณบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษาในระดับปริญญาเอกและโอกาสในการฝึกประสบการณ์การทำงานในภาคอุตสาหกรรม

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้มอบทุนสนับสนุนโครงการ Industry-Academia Partnership Programme (IAPP) 2016 ให้ข้าพเจ้าได้เดินทางไปฝึกประสบการณ์การทำงานวิจัยที่มหาวิทยาลัยยอร์ก ประเทศอังกฤษ

ขอขอบพระคุณสมาคม IEEE Magnetic Society ที่ได้มอบทุน Student Travel Grant แก่ข้าพเจ้าเพื่อเข้าร่วมค่าย IEEE Magnetic Summer School 2018 ณ เมือง กิโต ประเทศเอกวาดอร์

ขอขอบคุณต๋องที่คอยเป็นกำลังใจ ช่วยเหลือและอยู่เคียงข้างกันเสมอมา ขอขอบคุณเพชร วุฒิ และตุ๊กตา สำหรับกำลังใจในการทำงานและทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ Sarah Dr. Andrea และ Dr. Sergiu สำหรับคำปรึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลอง ขอขอบคุณ Ewan และ Mara สำหรับกำลังใจในการเขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณกัลยาณมิตรและน้องๆ ในหน่วยวิจัยทุกคนที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุกด้านด้วยดีเสมอมา

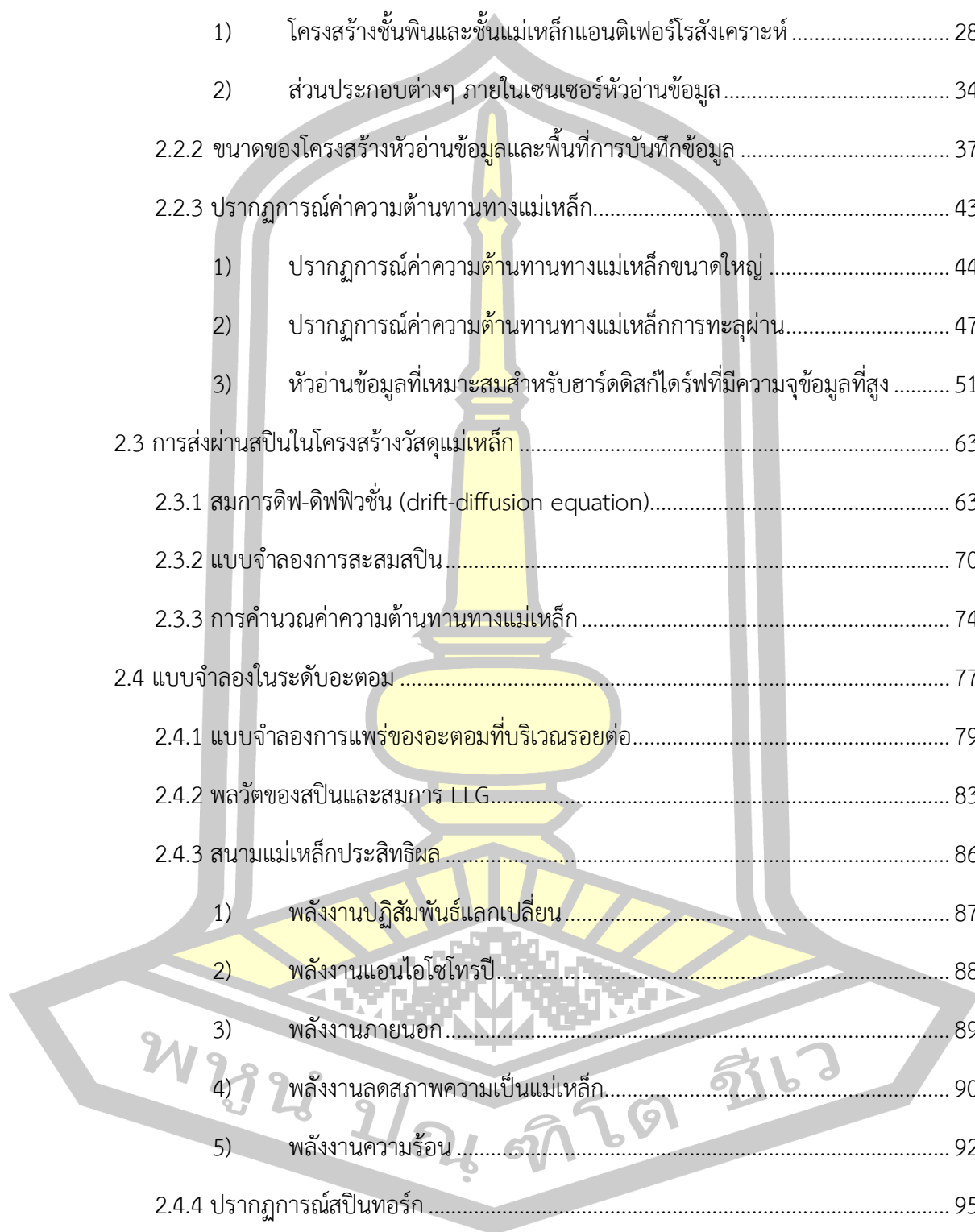
ขอขอบคุณพ่อแม่ พี่ชายและยาย ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนการทำงานและการใช้ชีวิตในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณความรัก ความห่วงใยจากครอบครัวที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจทำวิทยานิพนธ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายประโยชน์และคุณค่าจากงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นเครื่องบูชา พระคุณบิดามารดา ปู่ย่า ตายาย ครู อาจารย์ ผู้ซึ่งให้ชีวิตและปัญญาแก่ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	10
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล.....	14
2.1.1 หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก.....	14
2.1.2 หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอรัค.....	17
2.1.3 หน่วยความจำแบบเรซแทร็ค.....	18
2.1.4 ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ.....	19
1) แผ่นบันทึกข้อมูล.....	21
2) หัวเขียนข้อมูล.....	24
3) หัวอ่านข้อมูล.....	25
2.2 หัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ.....	27

2.2.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหัวอ่านข้อมูล.....	27
1) โครงสร้างชั้นพินและชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	28
2) ส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล.....	34
2.2.2 ขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูล	37
2.2.3 ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก.....	43
1) ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่	44
2) ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กการทะลุผ่าน.....	47
3) หัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง	51
2.3 การส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก	63
2.3.1 สมการดิฟ-ดิฟฟิวชัน (drift-diffusion equation).....	63
2.3.2 แบบจำลองการสะสมสปิน	70
2.3.3 การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	74
2.4 แบบจำลองในระดับอะตอม	77
2.4.1 แบบจำลองการแพร่ของอะตอมที่บริเวณรอยต่อ.....	79
2.4.2 พลวัตของสปินและสมการ LLG.....	83
2.4.3 สนามแม่เหล็กประสิทธิผล	86
1) พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน.....	87
2) พลังงานแอนไอโซโทรปี.....	88
3) พลังงานภายนอก.....	89
4) พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก.....	90
5) พลังงานความร้อน	92
2.4.4 ปรากฏการณ์สปินทอร์ค	95
1) อะเดียบาติกทอร์ค (AST).....	97
2) นอนอะเดียบาติกทอร์ค (NAST).....	99



2.5 เครื่องมือวัดไอเอสไอ (Integral Solutions Int'l).....	102
2.5.1 กระบวนการทำงานของเครื่องไอเอสไอ.....	103
2.5.2 การวิเคราะห์ผลเชิงการทดลอง.....	104
บทที่ 3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า GMR.....	109
3.1 ระยะสปินดีเฟสซึ่งที่ส่งผลต่อค่าการสะสมสปินและค่า GMR.....	111
3.1.1 แบบจำลองการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อและการสะสมสปิน.....	112
3.1.2 การส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	117
3.2 การผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม	121
3.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก	122
3.4 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและความหนาของชั้นอิสระที่มีผลต่อค่า GMR	123
3.4.1 ผลของค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าที่มีต่อปรากฏการณ์ GMR	125
3.4.2 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อปรากฏการณ์ GMR.....	128
1) การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น	131
2) การคำนวณพฤติกรรมส่งผ่านสปินในโครงสร้าง CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)	135
3) ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า RA และ ΔRA	137
4) ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR	139
3.4.3 ความหนาของชั้นอิสระที่ส่งผลต่อค่า GMR	146
1) ความหนาของวัสดุ CFA และ CFS ที่มีต่อค่า ΔRA	147
2) ความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA และอัตราส่วน MR.....	152
3.5 ระยะการแพร่ของสปินและความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีผลต่อค่า GMR	156
3.5.1 ระยะการแพร่ของสปินของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR	157
3.5.2 ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน MR.....	160

บทที่ 4 การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการณ์ส่งผ่านสปีนและค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	164
4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีน.....	165
4.1.1 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้า.....	166
4.1.2 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่	171
4.1.3 ผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปีน	172
4.1.4 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าคงที่การแพร่	178
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการณ์ส่งผ่านสปีน.....	179
4.2.1 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีน	181
4.2.2 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมและค่าอัตราส่วน MR.....	183
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแมกนีไทเซชันและค่าอัตราส่วน MR.....	186
4.3.1 ผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชัน	187
4.3.2 ผลของความร้อนที่มีต่อการสะสมสปีนและกระแสสปีน	196
4.3.3 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR	203
4.4 ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR.....	208
บทที่ 5 การศึกษาค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลในเชิงการทดลอง	214
5.1 ลักษณะของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรม.....	215
5.2 ขนาดของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก.....	221
5.2.1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	225
5.2.2 ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR	226
5.2.3 ความหนาของชั้นสเปเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR.....	230
5.3 ผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก.....	234
5.3.1 การคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล	238
5.3.2 ผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR.....	241

1) กลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล.....	241
2) กลุ่มการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล	244
5.4 ผลของค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	248
5.4.1 กลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล.....	249
5.4.2 กลุ่มการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล	252
5.5 ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านและแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก	254
บทที่ 6 การศึกษาสัญญาณรบกวนในหัวอ่านข้อมูล	257
6.1 ประเภทของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านข้อมูล	259
6.1.1 สัญญาณรบกวน $1/f$	259
1) สัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์.....	259
2) สัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็ก.....	261
6.1.2 ค่าสัญญาณรบกวนเทเลกราฟสุ่ม.....	263
6.1.3 สัญญาณรบกวนช็อต.....	265
6.1.4 สัญญาณรบกวนรบกวนจอห์นสัน.....	265
6.1.5 ค่าสัญญาณรบกวนจากความร้อน.....	266
6.1.6 สัญญาณรบกวนจากแรงบิดสปริง.....	268
6.2 ผลของสนามคู่อื่นที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน.....	273
6.2.1 พลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น.....	273
6.2.2 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง SAF.....	277
6.3 การพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อสัญญาณรบกวน.....	280
6.3.1 ผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน	281
6.3.2 ผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน	283
6.4 การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อสัญญาณรบกวน	286

บทที่ 7 สรุปลผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 290

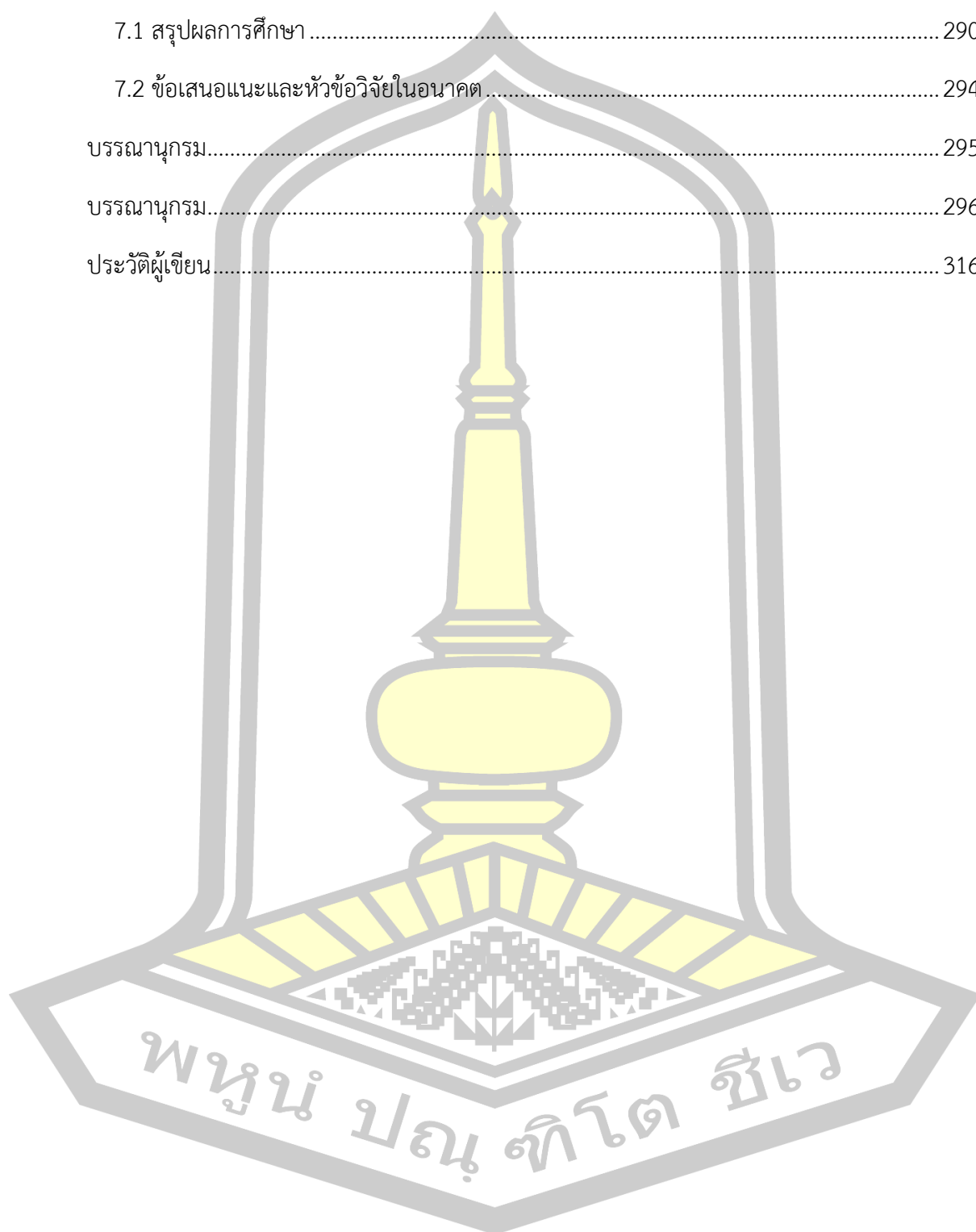
 7.1 สรุปลผลการศึกษา 290

 7.2 ข้อเสนอแนะและหัวข้อวิจัยในอนาคต..... 294

 บรรณานุกรม..... 295

 บรรณานุกรม..... 296

 ประวัติผู้เขียน..... 316



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การศึกษาค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเพอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ในเชิงการทดลอง.....	62
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ निकเกิลไอรอน.....	115
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเพอร์โรชนิดต่างๆ.....	130
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเพอร์โรชนิดต่างๆ.....	140
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเพอร์โรและนอนแมกเนต.....	170
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	224
ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ CoFe.....	274



สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ 1.1 โครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการบันทึกข้อมูลและอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยลูกศรสีแดงและสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูล [18], [21].....	2
ภาพประกอบ 1.2 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระภายในโครงสร้างสปิน-วาล์วจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกจากบิตข้อมูล (ก) บิต 0 และ (ข) บิต 1	3
ภาพประกอบ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA และค่าอัตราส่วน MT ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR และ TMR [53]	6
ภาพประกอบ 1.4 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างสปินในชั้น s ของกระแสสปินและชั้น d ของวัสดุแม่เหล็ก.....	8
ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ MRAM ที่ประกอบด้วยบิตไลน์ เวิร์ดไลน์และโครงสร้าง MTJ ที่เชื่อมติดกับทรานซิสเตอร์ และโครงสร้างของ MTJ ภายในเซลล์ MRAM [90].....	15
ภาพประกอบ 2.2 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง MTJ ในกระบวนการเขียนข้อมูลภายในหน่วยเก็บข้อมูล toggle MRAM [90].....	17
ภาพประกอบ 2.3 การแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้าง MTJ สำหรับการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำ STT-MRAM [90]	18
ภาพประกอบ 2.4 องค์ประกอบและลักษณะการทำงานของหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค โดยอาศัยการบันทึกข้อมูลภายในเส้นลวดนาโนและอาศัยโครงสร้าง MTJ ในการบันทึกและอ่านข้อมูล [92]..	19
ภาพประกอบ 2.5 โครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [95].....	21
ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะของหัวเขียนข้อมูลและการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบขนาน [18], [96].....	22
ภาพประกอบ 2.7 ลักษณะของหัวเขียนข้อมูลและการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก [18], [21]	23
ภาพประกอบ 2.8 ลักษณะการอ่านข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต 0 และ 1 ในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	26
ภาพประกอบ 2.9 โครงสร้างสปินวาล์วของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล เพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1	28

ภาพประกอบ 2.10 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร และแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนของวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตร 29

ภาพประกอบ 2.11 การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงของโครงสร้างหัวอ่าน ข้อมูลจากการอาศัยปรากฏการณ์ควมคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมในโครงสร้าง SAF [90]..... 31

ภาพประกอบ 2.12 ผลของความหนาของชั้นนอนแมกเนตที่มีต่อการกวัดแกว่งของค่าคงที่การควบคู่ แลกเปลี่ยน [90]..... 32

ภาพประกอบ 2.13 (ก) โครงสร้างของสปินวาล์วที่อาศัยเฉพาะปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (ข) วงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยเฉพาะปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (ค) โครงสร้าง สปินวาล์วที่อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและโครงสร้าง SAF และ (ง) วงปิดฮิสเทอรีซิสของ โครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและโครงสร้าง SAF [90]..... 33

ภาพประกอบ 2.14 องค์ประกอบต่างๆ ภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 34

ภาพประกอบ 2.15 การบินของหัวอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูล (ก) การกำหนดทิศทางของแมกนี- ไทเซชันภายในชั้นอิสระในขณะที่ยังไม่มีการบินข้อมูลด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชั้นป้องกัน ด้านข้าง (ข) การพิจารณาระยะห่างระหว่างหัวอ่าน-เขียนข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลและช่องว่างการ อ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [33] 36

ภาพประกอบ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายใน แผ่นบันทึกข้อมูล โดยพื้นที่สีแดงและสีน้ำเงินแสดงขอบเขตของบิตข้อมูลซึ่งแสดงทิศทางของแมกนี- ไทเซชันที่มีทิศทางพุ่งเข้าและพุ่งออกจากระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล ตามลำดับ [99]..... 38

ภาพประกอบ 2.17 การพิจารณาความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... 39

ภาพประกอบ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดของบิตข้อมูลและ (ข) ความกว้างของแตร็คข้อมูลกับความจุข้อมูลที่ค่า BAR ต่างๆ (ค) การเปรียบเทียบขนาดของบิตและความกว้างของพื้นที่การ บันทึกข้อมูลในกรณีที่ BAR มีค่าเท่ากับ 1 และ 4 ของความจุข้อมูลที่ 10 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [52] 41

ภาพประกอบ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนบิตข้อมูล ความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ค่า RA และค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน [101] 42

ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นของหัวอ่านข้อมูล (ก) แบบ GMR และ (ข) แบบ TMR โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ 43

ภาพประกอบ 2.21 การอธิบายค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้าง GMR จากการพิจารณา วงจรของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในโครงสร้างสปินวาล์วที่มีการจัดเรียงตัว (ก) แบบขนาน (ข) แบบตรงกันข้าม ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของสปินขึ้นและสปินลงผ่าน โครงสร้างสปินวาล์ว (ค) ขนานและ (ง) ตรงกันข้าม [101]	46
ภาพประกอบ 2.22 การแสดงแผนผังการทะลุผ่านของกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นฉนวนไฟฟ้า (ก) ในกรณีขนาน และ (ข) ตรงกันข้าม [33].....	50
ภาพประกอบ 2.23 เงื่อนไขการออกแบบหัวอ่านข้อมูลเพื่อลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลและเพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล.....	52
ภาพประกอบ 2.24 โครงสร้างสปินวาล์วที่ทำการป้อนกระแสสปินในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของ โครงสร้าง	53
ภาพประกอบ 2.25 ความถี่โรลออฟที่เป็นฟังก์ชันของค่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ค่า BAR ต่างๆ [52].....	55
ภาพประกอบ 2.26 การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของหัวอ่านข้อมูล และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลกับความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ความถี่โรลออฟเท่ากับ 2.2 และ 1.0 กิ- กะเฮิร์ต [52]	57
ภาพประกอบ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านข้อมูล ค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลและความ จุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [51].....	57
ภาพประกอบ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล แบบ TMR และ GMR [53]	59
ภาพประกอบ 2.29 (ก) ค่า RA และอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับการ ประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 และ 5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [19] (ข) ค่า ΔRA ของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรธรรมดาและความต้องการค่า ΔRA ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [51]	60
ภาพประกอบ 2.30 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างแถบพลังงานของสปินส่วนมากและสปินส่วนน้อยที่ ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุอนแมกเนต แม่เหล็กเฟอร์โร และแม่เหล็กเฟอร์โรแบบกึ่งโลหะ (ฮอย เลอร์อัลลอยด์).....	61
ภาพประกอบ 2.31 การป้อนกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ประกบติดกับชั้น นอนแมกเนต (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีของสปินขึ้นและสปินลงต่อตำแหน่ง ซึ่งทำให้	

เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีเฉลี่ย (เส้นประ) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม (ข) การเปลี่ยนแปลงของกระแสสปินที่พิจารณาจากความต่างระหว่าง μ_{\uparrow} และ μ_{\downarrow} [125]..... 65

ภาพประกอบ 2.32 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน (ก) ในระบบพิกัดฉากและ (ข) ในระบบพิกัดพื้นฐาน [77]..... 74

ภาพประกอบ 2.33 การแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นออกเป็นชั้นบางๆ เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินและกระแสสปิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุ..... 76

ภาพประกอบ 2.34 การแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเนต ออกเป็นเซลล์ขนาดเล็กในแบบจำลองในระดับจุลภาค จากนั้นทำการคำนวณโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์จากการเฉลี่ยค่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในเซลล์..... 78

ภาพประกอบ 2.35 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ซึ่งแสดงถึงการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นวัสดุ [113]..... 80

ภาพประกอบ 2.36 (ก) การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่ค่า D ใดๆ เมื่อกำหนดให้ x_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ การเปรียบเทียบการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อในโครงสร้างแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุนอนแมกเนต เมื่อกำหนดให้ D มีค่าเท่ากับ (ข) ศูนย์ และ (ค) หนึ่งตามลำดับ..... 82

ภาพประกอบ 2.37 การเคลื่อนที่ของสปิน (ก) แบบหมุนวนรอบ (ข) แบบห่วงและ (ค) แบบก้นหอยเข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผล 84

ภาพประกอบ 2.38 อันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินโดย (ก) ในกรณีที่สปินมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันจะทำให้ค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นบวกและ (ข) ในกรณีที่สปินมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นลบ [92] 88

ภาพประกอบ 2.39 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินและแกนง่ายของวัสดุ..... 89

ภาพประกอบ 2.40 การจัดเรียงตัวของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในขณะ (ก) ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก..... 90

ภาพประกอบ 2.41 สนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในแท่งแม่เหล็ก โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน [92]..... 90

ภาพประกอบ 2.42 การเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวเมื่อมองจากด้านบน (top view) (ก) ในกรณีที่ไม่ีผล ของความร้อนและ (ข) ในกรณีที่พิจารณาผลของความร้อนที่กระทำต่อระบบ เมื่ออุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 1 เคลวิน [92]	94
ภาพประกอบ 2.43 ปฏิกิริยาการส่งผ่านแรงบิดสปินจากการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่าน โครงสร้างสปินวาล์ว	96
ภาพประกอบ 2.44 ผลของสปินทอร์กที่มีต่อการเคลื่อนที่แบบห่วงของแมกนีไทเซชันภายใน อิสระ โดยทิศทางของการเคลื่อนที่แบบห่วงที่เกิดจากสปินทอร์กจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของการ ป้อนกระแสไฟฟ้า	98
ภาพประกอบ 2.45 ทิศทางของ AST และ NAST ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้น อิสระ เมื่อทิศทางของ AST และ NAST แสดงทิศทางของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ แบบในระนาบและออกนอกระนาบของแมกนีไทเซชันของชั้นพินตามลำดับ [77].....	100
ภาพประกอบ 2.46 เครื่องมือวัดไอเอสไอสำหรับการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและ ประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบต่างๆ [145].....	103
ภาพประกอบ 2.47 (ก) วงจรการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจากการป้อน สนามแม่เหล็กภายนอก (ข) ลักษณะเครื่องไอเอสไอสำหรับการวัดหัวอ่านในรูปแบบของ HGA [146]	104
ภาพประกอบ 2.48 การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น [33]...	105
ภาพประกอบ 2.49 การตอบสนองของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า-สนามแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งถูกใช้สำหรับการพิจารณาค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับ [33].....	106
ภาพประกอบ 2.50 (ก) การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นและค่าสัญญาณรบกวน จากการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้น (ข) การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์ แบบไม่เชิงเส้นและค่าสัญญาณรบกวนจากการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบไม่เชิงเส้น .	108
ภาพประกอบ 3.1 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเพอร์โรที่ประกบติดกับนอนแมกเนต การผสมกันของ อะตอมระหว่างชั้นฟิล์มส่งผลให้แมกนีไทเซชันค่อยๆ เปลี่ยนแปลงทิศทางและมีขนาดที่เล็กลงจนมีค่า เท่ากับศูนย์ภายในชั้นนอนแมกเนต.....	114
ภาพประกอบ 3.2 ผลของ $\lambda_{p,MAX}$ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะสปินดีเฟสซึ่งต่อตำแหน่งภายใน วัสดุแม่เหล็กสองชั้น	115

ภาพประกอบ 3.3 ผลของสปินดีเฟสซึ่งที่มีต่อองค์ประกอบของการสะสมสปิน (ก) ในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชัน (ข) และ (ค) ในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน 117

ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างสปินวาล์วที่พิจารณาการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อ โครงสร้างถูกแบ่งออกเป็นชั้นบาง ๆ โดยมีความหนาเท่ากับ 0.0035 นาโนเมตร 118

ภาพประกอบ 3.5 ผลของมุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 50 แมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร..... 120

ภาพประกอบ 3.6 การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของระยะสปินดีเฟสซึ่งในโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)..... 121

ภาพประกอบ 3.7 การเปลี่ยนแปลงค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความกว้างของการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม 122

ภาพประกอบ 3.8 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า RA_p RA_{AP} และค่า ΔRA ในโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)..... 123

ภาพประกอบ 3.9 (ก) โครงสร้างของสปินวาล์วที่ประกอบด้วย Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/FM(5nm) 127

ภาพประกอบ 3.10 ค่า ΔRA และอัตราส่วนค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสปินโพลาริเซชันของควมนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร 128

ภาพประกอบ 3.11 โครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ที่พิจารณาการผสมกันของอะตอมที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม 132

ภาพประกอบ 3.12 การจำลองการแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นออกเป็นโมโครเซลล์เพื่อทำการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ..... 133

ภาพประกอบ 3.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งในกรณีทีแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม..... 133

ภาพประกอบ 3.14 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)..... 134

ภาพประกอบ 3.15 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการสะสมสปิน (ก) ในโครงสร้างแบบขนานและ (ข) ในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามและกระแสสปิน (ค) ในโครงสร้างแบบ

ขนานและ (ง) ในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามในโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)	136
.....	
ภาพประกอบ 3.16 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชิงตำแหน่ง.....	137
ภาพประกอบ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) ค่า RA ในโครงสร้างขนานและ (ข) ค่า ΔRA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก.....	138
ภาพประกอบ 3.18 โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น Co(5nm)/ Cu(5nm)/FMs(5nm) ลูกศรสีแดงและสีส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระตามลำดับ	141
ภาพประกอบ 3.19 การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) ในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม	142
ภาพประกอบ 3.20 การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม และการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้าง (ค) แบบขนานและ (ง) แบบตรงกันข้าม ของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm)	143
ภาพประกอบ 3.21 (ก) การเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าการสะสมสปินและ (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า RA ต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) โดยชั้นวัสดุแม่เหล็ก FMs คือ Co NiFe CoFe CFS CFA และ CFAS	144
ภาพประกอบ 3.22 การเปรียบเทียบค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชนิดต่าง ๆ.....	145
ภาพประกอบ 3.23 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_F), CFS(t_F) ลูกศรสีเทาแสดงทิศทางการป้อนกระแสไฟฟ้าและลูกศรสีแดงและสีส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์	148
ภาพประกอบ 3.24 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าการสะสมสปินและ (ข) ค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(10nm) และโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(10nm).....	149
ภาพประกอบ 3.25 การเปลี่ยนแปลง (ก) ขนาดของ Δm และ (ข) ค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชิงตำแหน่งในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(10nm), CFS(10nm).....	150

ภาพประกอบ 3.26 ผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA ในสถานะขนานและตรงกันข้ามใน โครงสร้าง (ก) Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FL}) และ (ข) Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(t_{FL}).....	151
ภาพประกอบ 3.27 การเปลี่ยนแปลงค่า ΔRA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นอิสระภายใน โครงสร้าง Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FL}) และ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(t_{FL}).....	152
ภาพประกอบ 3.28 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_F) ลูกศรสีแดงและส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระตามลำดับ.....	153
ภาพประกอบ 3.29 การเปลี่ยนแปลง (ก) การสะสมสปินและ (ข) กระแสสปินในสถานะขนานและ ตรงกันข้ามต่อตำแหน่งภายในโครงสร้าง CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(10nm)	153
ภาพประกอบ 3.30 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่า RA เชิงตำแหน่งในโครงสร้างขนานและตรงกันข้าม (ข) ผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA รวมโครงสร้างขนานและตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FM})	154
ภาพประกอบ 3.31 ความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อ (ก) ค่า ΔRA และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR ของ โครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FL})	155
ภาพประกอบ 3.32 โครงสร้างสปินวาล์วที่ประกอบด้วยชั้น CFA(5nm)/NM(5nm)/CFA(5nm) โดย ลูกศรภายในชั้นฟิล์มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน.....	158
ภาพประกอบ 3.33 การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่ง (ก) โครงสร้างแบบขนาน (ข) โครงสร้างแบบตรงกันข้ามและค่ากระแสสปินต่อตำแหน่ง (ค) โครงสร้างแบบขนาน (ง) โครงสร้าง แบบตรงกันข้ามภายในโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/NM(5nm)/CFA(5nm)	159
ภาพประกอบ 3.34 ค่าการแพร่ของสปินของวัสดุนอนแมกเนตที่มีต่อค่า ΔRA และอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้าง CFA(5nm)/NM(5nm)/CFS(5nm).....	160
ภาพประกอบ 3.35 โครงสร้างสปินวาล์วที่ประกอบด้วยชั้น CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm) โดย ลูกศรภายในชั้นฟิล์มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน.....	161
ภาพประกอบ 3.36 ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบ ตรงกันข้ามของโครงสร้างสปินวาล์ว CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm)	162
ภาพประกอบ 3.37 ผลของความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm).....	162

ภาพประกอบ 4.1 DOS ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุ (ก) CFAS [178] (ข) โคบอลต์ [196] และ (ค) ทองแดง [197]	168
ภาพประกอบ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสปีนโพล่าไรเซชันของให้นำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co และ NiFe ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.8)	171
ภาพประกอบ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสปีนโพล่าไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ที่อุณหภูมิใดๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co NiFe และ CFAS ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.10).....	172
ภาพประกอบ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุ (ก) Co (ข) NiFe และ (ค) Cu ที่เป็นฟังก์ชันของสภาพให้นำไฟฟ้าของวัสดุ [208]	176
ภาพประกอบ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ	177
ภาพประกอบ 4.6 การเปรียบเทียบผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุ Cu ระหว่างผลการคำนวณและการทดลอง.....	178
ภาพประกอบ 4.7 ผลของความร้อนที่มีต่อระยะค่าคงที่การแพร่ของวัสดุ Co NiFe และ Cu.....	179
ภาพประกอบ 4.8 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นขนาด 5 MA/cm^2	180
ภาพประกอบ 4.9 ผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนในโครงสร้าง (ก) ขนานและ (ข) ตรงกันข้ามและกระแสสปีนในโครงสร้าง (ค) ขนานและ (ง) ตรงกันข้าม.....	182
ภาพประกอบ 4.10 ผลของความร้อนที่มีต่อ (ก) ค่า Δm และ (ข) ค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานของวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm).....	183
ภาพประกอบ 4.11 (ก) ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมในกรณีแม่เหล็กที่แม่เหล็กจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) และผลการทดลองของ (ข) Y. K. Takahashi และคณะ [114] และ (ค) T. M. Nakatani และคณะ [70].....	185
ภาพประกอบ 4.12 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm).....	185
ภาพประกอบ 4.13 ผลของความร้อนที่มีต่อ (ก) ค่าแม่เหล็กเซชันของวัสดุวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS และ (ข) ค่าแม่เหล็กเซชันเฉลี่ยของชั้นพินและชั้นอิสระ [214], [215].....	189

ภาพประกอบ 4.14 ผลของความร้อนที่ส่งผลต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่อุณหภูมิ (ก) 0 (ข) 14 (ค) 100 และ (ง) 290 เคลวิน..... 190

ภาพประกอบ 4.15 พลวัตของแมกนีไทเซชันของ (ก) ชั้นพิน (ข) ชั้นอิสระ และ (ค) ขนาดของแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 290 เคลวิน..... 192

ภาพประกอบ 4.16 (ก) การพิจารณามุมระหว่างแนวแกนง่ายและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (ข) ผลของความร้อนที่มีต่อค่าค่ามุม θ เฉลี่ยและ (ค) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชั้นพินและชั้นอิสระ..... 194

ภาพประกอบ 4.17 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแมกนีไทเซชันและองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน y เฉลี่ยของชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ..... 195

ภาพประกอบ 4.18 ผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งที่เวลา 5 นาโนวินาที ในโครงสร้างขนาน ที่อุณหภูมิ (ก) 0 (ข) 50 (ค) 100 (ง) 200 และ (จ) 290 เคลวิน 199

ภาพประกอบ 4.19 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งที่เวลา 2 พิโกวินาที และ 5 นาโนวินาที ที่อุณหภูมิ (ก) 50 (ข) 200 และ (ค) 290 เคลวิน 200

ภาพประกอบ 4.20 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าการสะสมสปินในแนวแกน (ก) x (ค) y และ (ง) z และค่ากระแสสปินในแนวแกน (ข) x (ง) y และ (ฉ) z ที่เวลา 5 นาโนวินาที ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ในโครงสร้างขนาน..... 202

ภาพประกอบ 4.21 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า Δm และค่า RA ที่เวลา 2 พิโกวินาที ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนาน..... 204

ภาพประกอบ 4.22 พลวัตของค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ที่อุณหภูมิ (ก) 14 และ (ข) 290 เคลวิน..... 205

ภาพประกอบ 4.23 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมเฉลี่ยในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของวัสดุแม่เหล็ก CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm)..... 205

ภาพประกอบ 4.24 การเปรียบเทียบผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR (ก) ผลการคำนวณในโครงสร้าง CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) จากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (ข) ผลการศึกษาเชิงการทดลองในโครงสร้าง NiMnSb/Ag/NiMnSb ของ Z. Wen และคณะ [216] (ค) B. Kwon และคณะ [217] และ (ง) ในโครงสร้าง CFAS/Ag/CFAS ของ T. Furubayashi และคณะ [218] 207

ภาพประกอบ 4.25 ความหนาของชั้นอิสระที่มีผลต่อพลวัตของค่า RA รวมในโครงสร้างแบบขนานที่ อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน.....	209
ภาพประกอบ 4.26 ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA (ก) ผลการคำนวณ จากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (ข) ผลการทดลองของ T.M. Nakatani และคณะ [70] (ค) H.S. Goripati และคณะ [115] และ (ง) S. Li และคณะ [69] 211	211
ภาพประกอบ 4.27 (ก) ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของ วัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(t_{FL}) และ (ข) ผลการทดลองผลของความหนาของชั้นอิสระ (\square) และความหนาของชั้นสเปสเซอร์ (O) ของโครงสร้างวัสดุ Co ₂ MnGe/Rh ₂ CuSn/ Co ₂ MnGe ที่มีต่อ ค่าอัตราส่วน MR ที่อุณหภูมิ [13].....	212
ภาพประกอบ 5.1 ลักษณะของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบของ (ก) เวเฟอร์ (ข) บาร์ และ (ค) สไลเดอร์ [219].....	216
ภาพประกอบ 5.2 โครงสร้าง HGA ซึ่งเป็นการรวมสไลเดอร์เดี่ยวจะถูกนำมาประกบติดกับฐานรอง [220].....	217
ภาพประกอบ 5.3 โครงสร้าง HSA จากการรวมโครงสร้าง HGA กับแกนกล [221]	217
ภาพประกอบ 5.4 (ก) ภาพร่างลักษณะของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล และ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของ โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริง [222].....	218
ภาพประกอบ 5.5 (ก) โครงสร้างสปินวาล์วภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลโดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทาง ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและ (ข) โครงสร้างภาพตัดขวางของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล	220
ภาพประกอบ 5.6 (ก) โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และ (ข) โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล แบบ CPP-TMR บนแทรีคข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล [99].....	222
ภาพประกอบ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและระยะห่างระหว่างชั้นป้องกัน กับความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [223].....	223
ภาพประกอบ 5.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ภายนอกของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 26 นาโนเมตร.....	226
ภาพประกอบ 5.9 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลและประสิทธิภาพการ ทำงานของหัวอ่านข้อมูลซึ่งเป็นเงื่อนไขในการออกแบบหัวอ่านข้อมูล.....	227

ภาพประกอบ 5.10 (ก) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่ทำการศึกษาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อ (ข) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก และ(ค) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR.....	229
ภาพประกอบ 5.11 (ก) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (ข) ผลของการจัดเรียงทิศทางของสปินภายในชั้นแม่เหล็กด้านข้างที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางของสปินภายในชั้นอิสระ.....	231
ภาพประกอบ 5.12 (ก) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างขนานและตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล (ค) ผลของค่า RA ที่มีต่อค่ากระแสการทะลุผ่านในโครงสร้างขนานและตรงกันข้าม.....	233
ภาพประกอบ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลและระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลและแผ่นบันทึกข้อมูล [98].....	235
ภาพประกอบ 5.14 (ก) แผนผังการแสดงค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลในอุดมคติและ (ข) ลักษณะการแสดงช่องว่างการบินและความสูงของการบิน [98].....	236
ภาพประกอบ 5.15 การป้อนแรงดันทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลเพื่อยืนยันให้หัวอ่านให้มีค่าเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูลและลดความสูงของการบิน [233]	237
ภาพประกอบ 5.16 ผลของกำลังทางไฟฟ้าภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล	240
ภาพประกอบ 5.17 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ (ก) 26 (ข) 29 และ (ค) 41 นาโนเมตร	243
ภาพประกอบ 5.18 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล	244
ภาพประกอบ 5.19 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (ก) 0.30 (ข) 0.35 (ค) 0.40 และ (ง) 0.45 $\Omega\cdot\mu\text{m}^2$	246

ภาพประกอบ 5.20 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ 247

ภาพประกอบ 5.21 การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ 249

ภาพประกอบ 5.22 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล 250

ภาพประกอบ 5.23 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลต่างๆ..... 251

ภาพประกอบ 5.24 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ 252

ภาพประกอบ 5.25 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่..... 253

ภาพประกอบ 5.26 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัว (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม..... 255

ภาพประกอบ 5.27 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR..... 256

ภาพประกอบ 6.1 (ก) ผลของกระแสไบอัสที่มีต่อสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในโครงสร้าง MTJ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 2 เคลวิน [250] และ (ข) ค่าพารามิเตอร์ฮุกที่เป็นฟังก์ชันของค่าอัตราส่วน TMR ในโครงสร้างวัสดุที่ใช้ชั้นสเปเซอร์เป็นวัสดุ Al_2O_3 และ MgO [246]..... 261

ภาพประกอบ 6.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ฮุก (จุด) และค่าความต้านทาน (เส้น) ที่อุณหภูมิ (ก) 300 และ (ข) 2 เคลวิน [250]..... 262

ภาพประกอบ 6.3 (ก) ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของค่าความถี่และการเปลี่ยนแปลงพลวัตของค่าแรงดันไฟฟ้า [255] (ข) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของค่าความถี่และการเปลี่ยนแปลงพลวัตของค่าแรงดันไฟฟ้า [256]..... 263

ภาพประกอบ 6.4 การเกิดสัญญาณรบกวนต่างๆ ภายในหัวอ่านข้อมูล..... 271

ภาพประกอบ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล [260]..... 272

ภาพประกอบ 6.6 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน..... 274

ภาพประกอบ 6.7 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพินและ(ข) ชั้นอิสระ ในกรณีที่ไม่พิจารณาสนามความร้อนและสนามคู่อั้ว 275

ภาพประกอบ 6.8 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงิน สีแดงและสีฟ้าแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและทิศทางของสนามคู่อั้วที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ตามลำดับ 275

ภาพประกอบ 6.9 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพินและ (ข) ชั้นอิสระในกรณีพิจารณาผลของสนามคู่อั้วที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุสามชั้น 276

ภาพประกอบ 6.10 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงิน สีแดงและสีฟ้าแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและทิศทางของสนามคู่อั้วที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ตามลำดับ..... 277

ภาพประกอบ 6.11 ผลของสนามคู่อั้วที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพิน (ข) ชั้นอ้างอิง และ (ค) ชั้นอิสระ ในโครงสร้าง CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm)/ Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) กรณีที่ไม่คิดผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่กระทำต่อชั้นอิสระ 278

ภาพประกอบ 6.12 (ก) โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและ (ข) โครงสร้างชั้นอิสระที่รวมผลของ SAF ที่ใช้การบ่อนสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและสนามฮาร์ดไบอัสเพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ ตามลำดับ..... 279

ภาพประกอบ 6.13 (ก) การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x ภายในชั้นอิสระ และ (ข) มุมของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่กระทำต่อทิศทางของสนามฮาร์ดไบอัสระหว่างโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นและโครงสร้าง SAF 280

ภาพประกอบ 6.14 ผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในแนว
(ก) แกน x และ (ข) แกน y 281

ภาพประกอบ 6.15 (ก) การจัดเรียงตัวแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระเทียบกับ
ทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและสนามฮาร์ดไดโอส ผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่มีต่อการเบี่ยงเบน
ของ (ข) แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินกับชั้นอ้างอิงจากแนวแกน y และชั้นอิสระจากแนวแกน x (ค)
มุมระหว่างชั้นพินกับชั้นอ้างอิงและชั้นอ้างอิงกับชั้นอิสระ 283

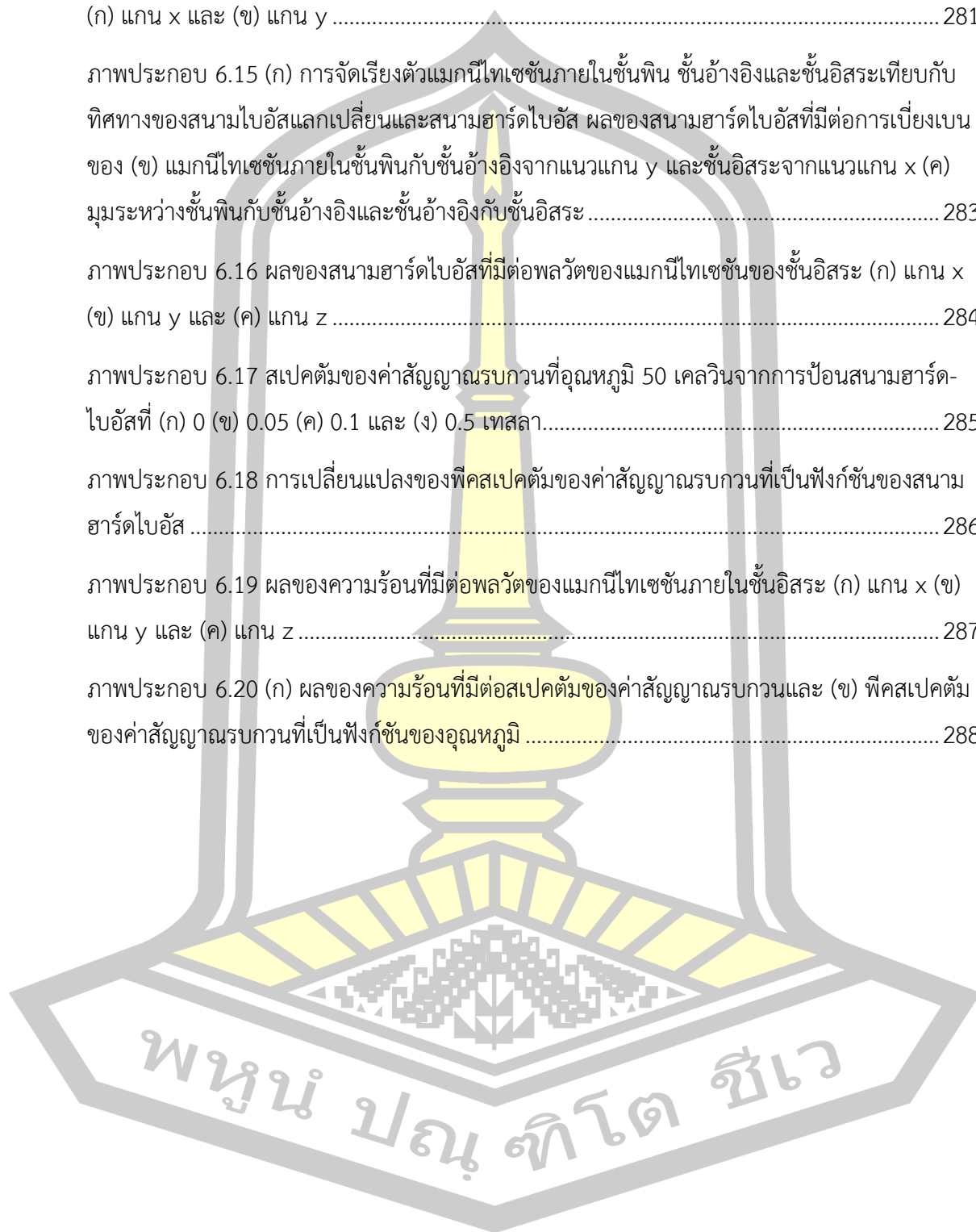
ภาพประกอบ 6.16 ผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ (ก) แกน x
(ข) แกน y และ (ค) แกน z 284

ภาพประกอบ 6.17 สเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิ 50 เคลวินจากการป้อนสนามฮาร์ด-
ไดโอสที่ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.5 เทสลา..... 285

ภาพประกอบ 6.18 การเปลี่ยนแปลงของฟิคสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของสนาม
ฮาร์ดไดโอส 286

ภาพประกอบ 6.19 ผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ (ก) แกน x (ข)
แกน y และ (ค) แกน z 287

ภาพประกอบ 6.20 (ก) ผลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนและ (ข) ฟิคสเปกตรัม
ของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ 288



บทที่ 1

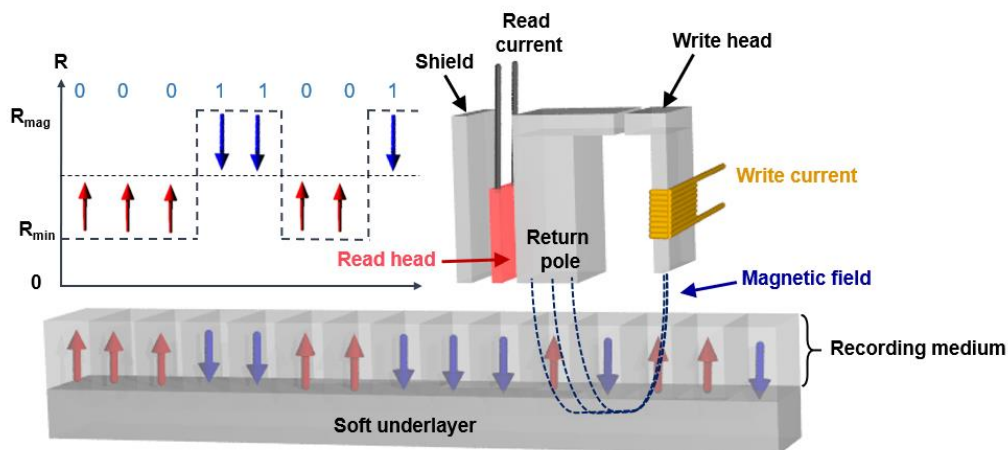
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำคุณสมบัติของสปินภายในวัสดุแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่หลากหลายเช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD) [1], [2] หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistive random access memory, MRAM) [3] หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์ก (spin-transfer torque magnetoresistive random access memory, STT-MRAM) [4], [5] และหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค (racetrack memory) [6], [7] เป็นต้น เนื่องจากสปินมีคุณสมบัติที่มีมวลน้อยและมีความเร็วในการเคลื่อนที่มากกว่าอิเล็กตรอน จากคุณสมบัติของสปินดังกล่าวทำให้สามารถออกแบบอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีขนาดเล็กลง แต่มีความจุข้อมูลและมีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลที่สูง การประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสปินในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลส่งผลให้มีการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ควบคุมทิศทางของสปินอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทฤษฎี [8]–[11] และการทดลอง [12]–[14] เพื่อนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (spintronics) ที่เหมาะสม โดยมีประสิทธิภาพการทำงานและความจุข้อมูลที่สูงขึ้น

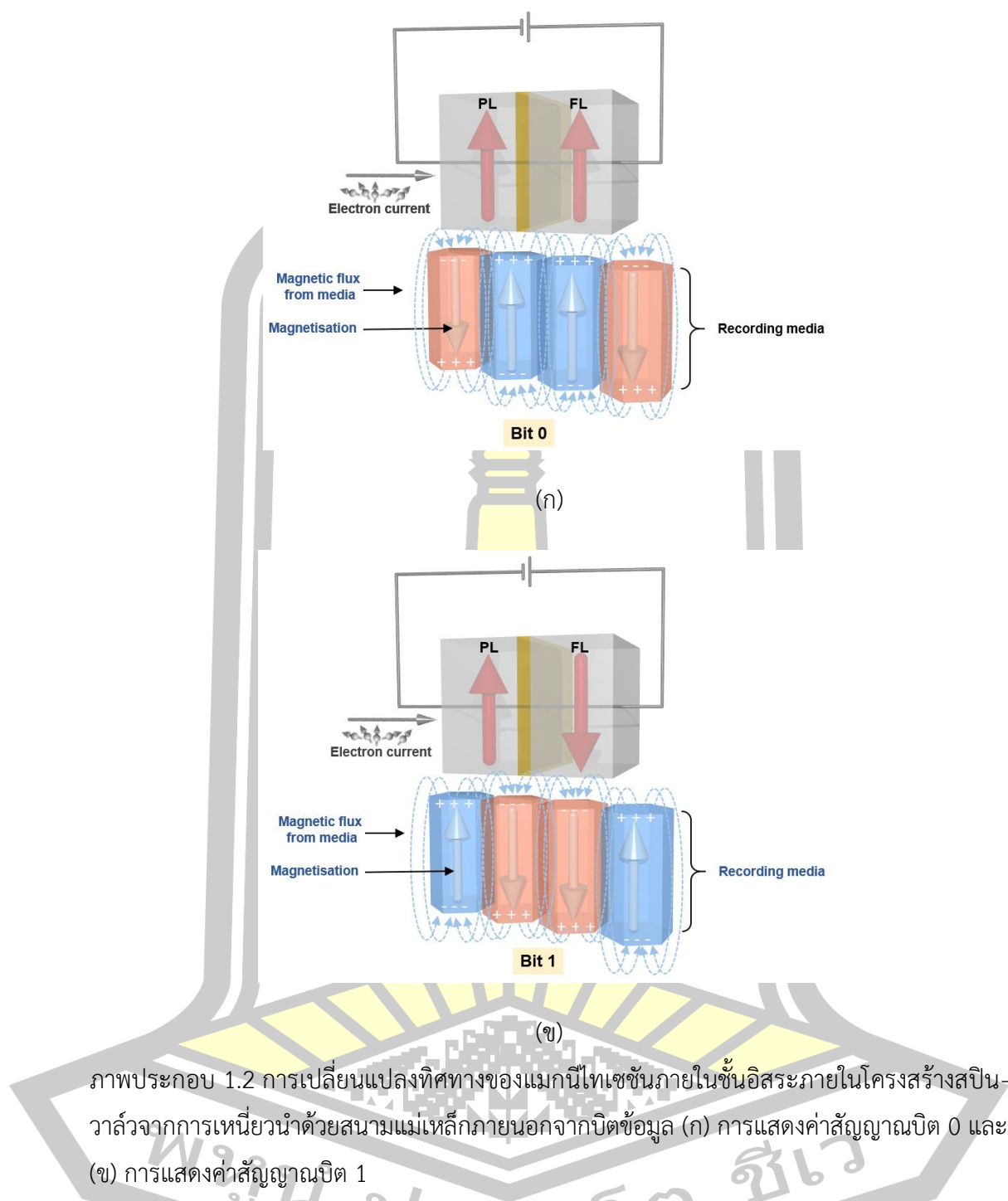
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหน่วยความจำเชิงแม่เหล็กแบบถาวรที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในคอมพิวเตอร์ แล็ปท็อป และเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบคลาวด์ (cloud technology) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงและมีราคาต่อหน่วยความจำที่ถูก [15] เมื่อเทียบกับหน่วยความจำแบบโซลิดสเตตไดรฟ์ (solid state drive) ซึ่งมีค่าราคาต่อหน่วยความจำประมาณ 0.2 – 0.3 ดอลลาร์ต่อกิกะไบต์ ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าราคาต่อหน่วยความจำเพียง 0.03 ดอลลาร์ต่อกิกะไบต์ [16] ปัจจุบันมีความต้องการเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลและการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่งผลให้มีการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการทำงานและองค์ประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งด้านทฤษฎี [17]–[19] และการทดลอง [14], [20] กระบวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ หัวเขียนข้อมูล หัวอ่านข้อมูลและแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีหลักการทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุในการบันทึกข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต (binary bit) โดยจะใช้วิธีการสร้างสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนข้อมูลเพื่อเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยทิศทางของแมกนี-

ไทเซชันภายในบิตข้อมูลจะแทนรูปแบบการบันทึกข้อมูลของค่าสัญญาณบิต 0 และบิต 1 ดังแสดงตามภาพประกอบ 1.1 ในขณะที่กระบวนการอ่านข้อมูลจะมีการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และบิต 1 โดยอาศัยการทำงานของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลเพื่อแปลงค่าสัญญาณทางแม่เหล็กเพื่อแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 1.1 โครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการบันทึกข้อมูลและอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยลูกศรสีแดงและสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูล [18], [21]

กระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปินวาล์ว (spin valve) ในการตรวจวัดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบิตข้อมูลและแสดงในรูปแบบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โครงสร้างสปินวาล์วอย่างง่ายภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic layer, FM) สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer, SP) โดยแมกนีไทเซชันภายในชั้นเฟอร์โรชั้นที่หนึ่งหรือชั้นพิน (pinned layer, PL) ถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลงทิศทางตามการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก จากการอาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) ที่เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนพลังงานของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetic, AFM) และชั้นพิน ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นที่สองหรือชั้นอิสระ (free layer, FL) สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 1.2



กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการป้อนแรงดันไบอัสผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว และทำการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเพื่อแสดงค่าบิต 0 และ 1 โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในภายในโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันจะทำให้เกิดค่า

ความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำและหัวอ่านข้อมูลจะแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลบิต 0 ดังแสดงตามภาพประกอบ 1.2 (ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงและแสดงการอ่านข้อมูลบิต 1 ดังแสดงตามภาพประกอบ 1.2 (ข)

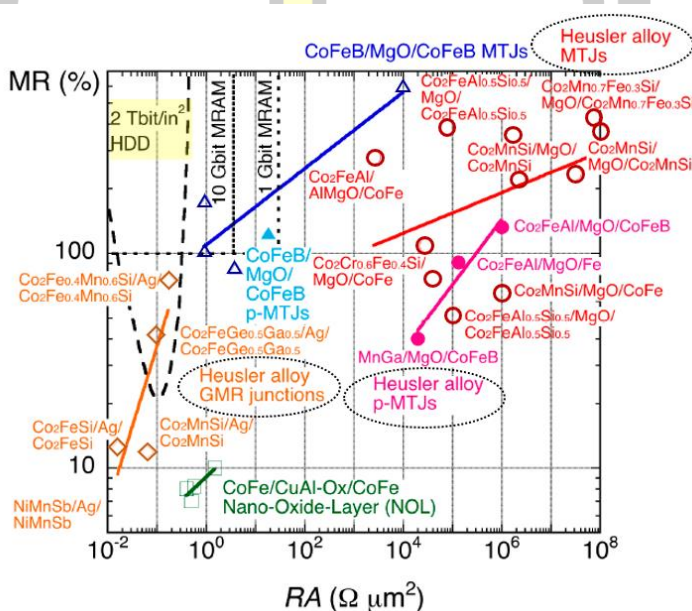
ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1975 โดย M. Julliere [22] จากการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างรอยต่อการทะลุผ่าน (magnetic tunneling junction, MTJ) ที่ประกอบด้วยวัสดุ Fe/Ge/Co โดยมีค่าอัตราส่วน MR ร้อยละ 14 ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน [22] จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าต่ำและยังไม่สามารถประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ ส่งผลให้การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการทะลุผ่านของสปีน (tunneling magnetoresistance, TMR) ในขณะนั้นไม่ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปี 1988 การค้นพบปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant-magnetoresistance, GMR) โดยสองกลุ่มวิจัยได้แก่ P. Grunberg และคณะ [23] และ A. Fert และคณะ [24] จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุอนิเมกเนตที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (conductor) ที่ประกอบด้วยวัสดุ Fe/Cr/Fe [23] และ $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ [24] จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้าง GMR มีค่าอัตราส่วน MR ร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน ซึ่งจากการค้นพบปรากฏการณ์ GMR เป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ทำให้การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในด้านทฤษฎี [25]–[28] และการทดลอง [29]–[31] เพื่อหาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์และอนิเมกเนตที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยหลังจากนั้นในปี 1991 การทดลองของ S.S.P. Parkin และคณะ [32] แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน MR สูงสุดในโครงสร้างวัสดุ $[\text{Co}/\text{Cu}]_{60}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 65 ที่อุณหภูมิห้องและถูกประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในช่วงปี 1996 [33]

อย่างไรก็ตามตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูล (areal density) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้เกิดข้อจำกัดของหัวอ่านแบบ GMR สำหรับการใช้งานในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR มีค่าอัตราส่วน MR ที่ต่ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการแสดงความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณบิต 1 และ 0 มีค่าน้อย ความต้องการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR สำหรับการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับความสนใจ

และถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งด้านทฤษฎีและการทดลอง จนกระทั่งในปี 2004 การศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในเชิงการทดลองของ D. Wang และคณะ [34] ในโครงสร้าง $\text{CoFeB}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CoFeB}$ พบว่าโครงสร้าง TMR มีค่าอัตราส่วน MR ร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีค่ามากกว่าโครงสร้าง GMR ส่งผลให้ในเวลาต่อมาการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในโครงสร้างแบบ MTJ ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง ในขณะเดียวกันการศึกษาเชิงทฤษฎี [35], [36] แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุฉนวนไฟฟ้า MgO ที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนและมีโครงสร้างแบบผลึก (crystalline) เป็นชั้นคั่นกลางจะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR มากกว่าร้อยละ 1000 โดยในปี 2004 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในเชิงการทดลอง [37] ของโครงสร้าง $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าสูงถึงร้อยละ 220 ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ TMR จากการประยุกต์ใช้ชั้นฉนวนไฟฟ้า MgO กับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่แตกต่างกันอย่างกว้างขวาง เช่น $\text{FePt}/\text{MgO}/\text{Fe}$ [38] $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{CoFe}$ [39] $\text{Co}/\text{MgO}/\text{Co}$ [40] และ $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ [41]–[43] เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง MTJ สามารถทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงถึงร้อยละ 500 ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในหัวอ่านข้อมูลที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 100 กิกะบิตต่อตารางนิ้ว (Gb/in^2) [33] จนกระทั่งในปี 2008 กลุ่มวิจัยของ S. Ikeda และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในโครงสร้าง $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ โดยพบว่าค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้าง MTJ ดังกล่าวมีค่าสูงถึงร้อยละ 604 ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจากผลการทดลองของงานวิจัยดังกล่าวนำมาสู่การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ TMR ของโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ ในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล MRAM และหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน

ปัจจุบันหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีหลักการทำงานโดยอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง MTJ ในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มพื้นที่ความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีค่ามากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in^2) นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใหม่เช่น เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้ความร้อนช่วย (heat-assisted magnetic recording, HAMR) [45]–[47] การบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย (microwave-assisted magnetic recording, MAMR) [48]–[50] และการบันทึกข้อมูลแบบบิต (bit patterned media recording) [20] เป็นต้น การเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังกล่าวไปสู่การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance-area product, RA) ของหัวอ่านข้อมูล ส่งผลให้มีอัตราการใช้กำลังทางไฟฟ้า (power consumption) ที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานและความเร็ว

ในการส่งผ่านข้อมูล (data-transfer rate) มีค่าลดลง [51], [52] การเพิ่มขึ้นของค่า RA จากการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เกิดข้อจำกัดของการใช้หัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว ดังแสดงตามภาพประกอบ 1.3 โดยหัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว จำเป็นต้องค่าอัตราส่วน MR ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 และมีค่า RA ที่น้อยกว่า 100 มิลลิโอม์ตารางไมโครเมตร ($m\Omega \cdot \mu m^2$) [53] ถึงแม้ว่าหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR มีค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าร้อยละ 100 อย่างไรก็ตามค่า RA ที่มากกว่า 500 มิลลิโอม์ตารางไมโครเมตร ทำให้หัวอ่านข้อมูลแบบ TMR เกิดข้อจำกัดสำหรับการใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคต



ภาพประกอบ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA และค่าอัตราส่วน MT ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR และ TMR [53]

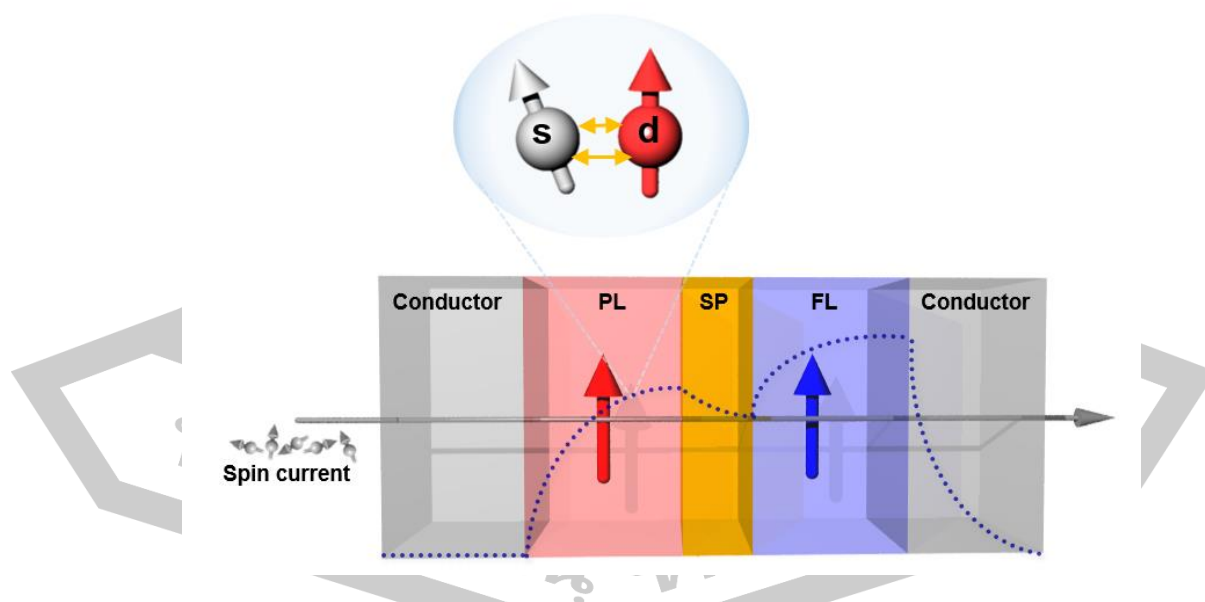
ข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR นำไปสู่การศึกษาการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR จากการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ (current perpendicular to plane CPP) หรือโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ที่มีค่า RA ที่ต่ำกว่า 100 มิลลิโอม์ตารางไมโครเมตร ซึ่งการศึกษาในเชิงทฤษฎี [54] ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราส่วน GMR สามารถทำได้โดยเพิ่มการกระเจิงของสปิน (spin-dependent scattering) ภายในโครงสร้างวัสดุ โดยการกระเจิงของสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์วสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนหลักๆ คือการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอน-แมกเนต (interfacial scattering) และการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (bulk

scattering) [54]–[56] การกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อจะมีค่าขึ้นอยู่กับความสอดคล้องของโครงสร้างแถบพลังงาน (band matching) ระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ในขณะที่การกระเจิงของสปินภายในวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชัน (spin polarisation) ซึ่งเป็นคุณสมบัติการส่งผ่านสปินที่แสดงถึงความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ ความต้องการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้าง CPP-GMR นำไปสู่การศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ ได้แก่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร [57]–[59] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสม [60]–[63] และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสมแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ (Heusler alloy) [64]–[71] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาปรากฏการณ์ CPP-GMR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรกึ่งโลหะ (half-metallic) ที่มีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงโครงสร้างแถบพลังงานที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ของสปินส่วนมาก (majority spin) และสปินส่วนน้อย (minority spin) มีลักษณะเป็นโลหะและแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ตามลำดับ ทำให้ค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์มีค่าสูงและทำให้โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR มีค่า RA ที่ต่ำและมีค่าอัตราส่วน MR ที่เพิ่มสูงขึ้น [69], [70], [72], [73] ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวส่งผลให้หัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR เป็นทางเลือกที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหาข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR และพัฒนาประสิทธิภาพการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคต

การศึกษาปรากฏการณ์ CPP-GMR ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการทดลอง [64]–[71] เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความจุข้อมูลที่สูง อย่างไรก็ตามการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองมีความยุ่งยากและความซับซ้อนในการปลูกผลึกและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุและการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR จากข้อจำกัดของการศึกษาปรากฏการณ์ CPP-GMR ในเชิงการทดลอง ส่งผลให้มีการศึกษาการใช้แบบจำลอง (simulation) ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการคำนวณและมีความสะดวกต่อการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ในอนาคต

การศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีอาศัยการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน (spin transport behavior) จากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุ โดยพฤติกรรมการส่งผ่านสปินสามารถอธิบายได้จากการศึกษาการสะสมสปิน (spin accumulation) และกระแสสปิน (spin current) [74]–[76] การอธิบายการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและ

กระแสสปินจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น (multilayer) ซึ่งแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุมีการจัดเรียงตัวในทิศทางใดๆ อาศัยการใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalised spin accumulation model) จากการปรับแต่งสมการการสะสมสปินของ Zhang Levy และ Fert โดย P. Chureemart [77] เมื่อทำการป้อนกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ระหว่างสปินในชั้น s ของกระแสสปินและชั้น d ของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุ ส่งผลให้กระแสสปินที่มีทิศทางใดๆ มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งถูกเรียกว่ากระแสสปินโพลาไรซ์ (spin polarized current) ดังแสดงตามภาพประกอบ 1.4 จากนั้นเมื่อกระแสสปินโพลาไรซ์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงหรือการสะสมสปิน (spin accumulation) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของชั้นวัสดุทั้งสอง โดยความไม่สมดุลของสปินขึ้นและสปินลงภายในกระแสสปินโพลาไรซ์จะสามารถแพร่ผ่านไปยังชั้นนอนแมกเนต ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงภายในชั้นนอนแมกเนต อย่างไรก็ตามท้ายที่สุดค่าการสะสมสปินจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและมีค่าเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สถานะสมดุล (spin accumulation at equilibrium) ของวัสดุ เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) แสดงตามภาพประกอบ 1.4



ภาพประกอบ 1.4 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างสปินในชั้น s ของกระแสสปินและชั้น d ของวัสดุแม่เหล็ก โดยเส้นประแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสสปินโพลาไรซ์ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น

ปัจจุบันการพิจารณาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีสามารถคำนวณได้หลายวิธีเช่น วิธีการเชิงวิเคราะห์ (analytical method) [75], [78]–[80] และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) [81], [82] เป็นต้น โดยทั่วไปในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขอาศัยการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาค (micromagnetic model) ซึ่งจะทำให้การแบ่งโครงสร้างวัสดุออกเป็นเซลล์ (cells) ขนาดเล็กหลายเซลล์ จากนั้นทำการพิจารณาค่าโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละเซลล์โดยจะแทนด้วยค่าโมเมนต์แม่เหล็กหนึ่งค่าและทั้งเซลล์จะมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเหมือนกัน แต่ในปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทำให้มีแนวโน้มของการลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กภายในบริเวณรอยต่อที่เกิดขึ้นจากการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มในกระบวนการปลูกผลึก ซึ่งการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อเป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลกระทบอย่างมากต่อกระบวนการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีขนาดเล็ก [76], [83] เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลองในระดับจุลภาคจึงมีการนำแบบจำลองในระดับอะตอม (atomistic model) มาประยุกต์ใช้เพื่อพิจารณาการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อ โดยแบบจำลองในระดับอะตอมสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุได้โดยตรงจากการศึกษาพลวัตของสปินในแต่ละอะตอม ซึ่งทำให้สามารถอธิบายคุณสมบัติทั้งภายในชั้นวัสดุและบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มได้อย่างละเอียดและครอบคลุม

นอกจากนี้แบบจำลองในระดับอะตอมยังมีความสะดวกและสามารถแก้ไขความยุ่งยากในการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชันของแบบจำลองในระดับจุลภาคได้ เนื่องจากในกรณีที่ต้องการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ ในแบบจำลองในระดับจุลภาคจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ เพื่อนำมาป้อนเป็นค่าตัวแปรขาเข้าของแบบจำลอง ในขณะที่การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันในแบบจำลองในระดับอะตอมสามารถทำการพิจารณาความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ ได้โดยตรงจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0 เคลวินที่รวมผลจากสนามความร้อน โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของการศึกษาปรากฏการณ์ CPP-GMR ในเชิงการทดลองด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขกึ่งวิเคราะห์ (semi-analytical method) ซึ่งสามารถลดระยะเวลาการคำนวณและมีความสะดวกต่อการพิจารณาคุณสมบัติภายในวัสดุและปัจจัยภายนอกที่มีต่อค่า GMR โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กใน

โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (atomistic model coupled with spin transport model) เพื่ออธิบายพื้นฐานทางฟิสิกส์และกลไกการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยแบบจำลองในระดับอะตอมจะถูกใช้เพื่อศึกษาพลวัตของสปินภายในโครงสร้างวัสดุ ในขณะที่แบบจำลองการสะสมสปินจะถูกใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการส่งผ่านสปิน ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์วและแม่เหล็กเพอร์โรเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก การประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์วจะช่วยให้เกิดความเข้าใจกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบหัวอ่านข้อมูลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีและมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลในอนาคตได้

1.2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร คิวสมบัตินภายในวัสดุได้แก่ ค่าสปินดีเฟสซึ่งค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุและค่าระยะการแพร่ของสปินมีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้าง CPP-GMR
2. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยภายนอก ได้แก่ ผลของความขรุขระบริเวณรอยต่อ ความหนาแน่นกระแสสปินและความหนาของชั้นอิสระและชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้าง CPP-GMR
3. เพื่อศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปิน ค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้าง CPP-GMR และสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล
4. เพื่อศึกษาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ค่าของแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1 ศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินเพื่อคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR โดยทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสามชนิดได้แก่ แม่เหล็กเฟอร์โรปกติ แม่เหล็กเฟอร์โรผสมและแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์

2 การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจะทำการคำนวณผลของความร้อนตั้งแต่ 0 – 300 เคลวิน

3 การศึกษาขนาดโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำการพิจารณาขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตร และทำการพิจารณาความหนาของชั้นสเปเซอร์ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตร

4 การพิจารณาผลของความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจากการป้อนกำลังทางไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 0 10 20 30 และ 40 มิลลิวัตต์เข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล

5 การพิจารณาแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจากการป้อนแรงดันบัสในทิศทางย้อนกลับ (reverse bias) เข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบอัสที่มีค่าเท่ากับ 140 150 160 และ 180 มิลลิโวลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายอธิบายคุณสมบัติภายในวัสดุและปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกระแสผ่านสปิน ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP- GMR ได้
2. สามารถอธิบายผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมกระแสผ่านสปิน ค่าอัตราส่วน MR สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลได้
3. สามารถอธิบายขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและแรงดันไบอัสที่มีต่อกระบวนการทำงานและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลได้
4. สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินสำหรับการออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในด้านทฤษฎี [8], [84]–[86] และการทดลอง [44], [87]–[89] เนื่องจากการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลและเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกประยุกต์ใช้ในกระบวนการอ่านข้อมูลของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (MRAM) และหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์ก (STT-MRAM) เป็นต้น โดยทั่วไปการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีอาศัยการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุและปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลและลดขนาดของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล ทำให้เกิดการลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับบิตการบันทึกข้อมูล ซึ่งนำไปสู่ข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็ก ซึ่งเป็นบริเวณที่สำคัญและส่งผลอย่างมากต่อกระบวนการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีขนาดเล็ก

โดยทั่วไปแบบจำลองในระดับจุลภาคจะทำการแบ่งโครงสร้างของระบบเป็นเซลล์ขนาดเล็กๆ จากนั้นทำการพิจารณาค่าโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละเซลล์ โดยกำหนดให้ทั้งเซลล์มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเหมือนกัน ซึ่งในกรณีที่มีการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มและมีความขรุขระบริเวณรอยต่อ แบบจำลองนี้ไม่สามารถพิจารณาผลดังกล่าวได้อย่างละเอียดและครอบคลุม ส่งผลให้แบบจำลองในระดับจุลภาคขาดความเหมือนจริงและความแม่นยำในการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลสปินทรอนิกส์ โดยงานวิจัยนี้จะได้มุ่งเน้นไปยังการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (atomistic model coupled with spin transport model) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและการอธิบายปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจพื้นฐานในการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมและแบบจำลองการส่งผ่านสปิน ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยลำดับแรก

จะเป็นการกล่าวถึงการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและหลักการทำงานของหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากนั้นจะทำการอธิบายปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการพิจารณาพฤติกรรมกระแสที่ส่งผ่านสปินของวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของค่าการสะสมสปิน (generalised spin accumulation model) สำหรับการอธิบายพฤติกรรมกระแสที่ส่งผ่านสปิน โดยการพิจารณาการสะสมสปินและกระแสสปินที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและกระแสสปินที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance-area product, RA) ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance (MR) ratio) ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.3 นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินยังถูกใช้สำหรับการพิจารณาผลของสนามสปินทอร์ก (spin transfer-torque, STT) ที่กระทำกับแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งรายละเอียดการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กและปรากฏการณ์ STT สามารถอธิบายได้จากการประยุกต์ใช้สมการของแลนดาว ลิฟชิต และกิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert, LLG equation) ที่คิดผลของสปินทอร์ก โดยรายละเอียดของแบบจำลองในระดับอะตอมจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.4.4 นอกจากนี้การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎี ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณในเชิงทฤษฎี ซึ่งในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะเป็นการอธิบายเครื่องมือวัดและรายละเอียดการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลอง จากหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้จริงในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.5

เพื่อความเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในลำดับแรกจะทำการอธิบายเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในปัจจุบัน รวมไปถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลประเภทต่างๆ ได้แก่ หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์ก หน่วยความจำแบบเรซแทร็ค และอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปยังการอธิบายกระบวนการทำงาน องค์ประกอบหลักของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และรายละเอียดการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในปัจจุบันดังนี้

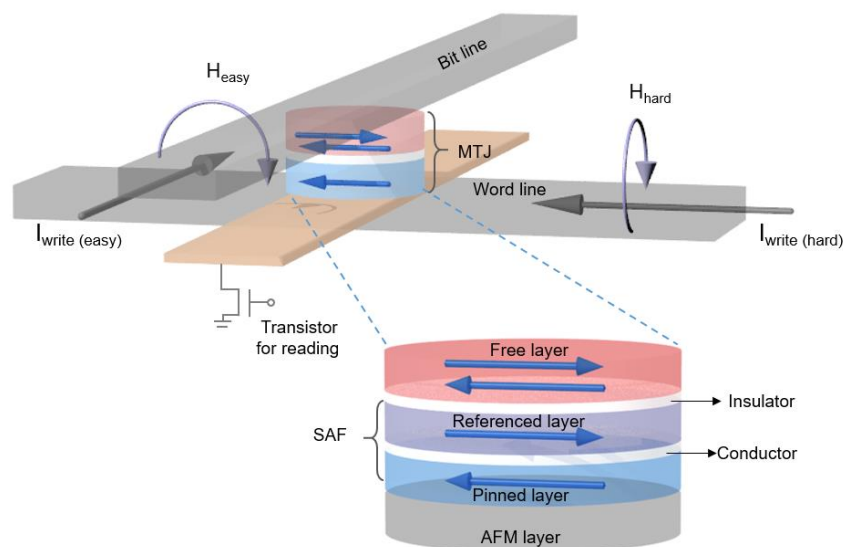
2.1 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเป็นสิ่งที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับพื้นฐานการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน เนื่องจากการทำงานและการดำเนินชีวิตของผู้คนส่วนใหญ่อยู่บนพื้นฐานของการใช้อุปกรณ์การบันทึกข้อมูลเช่น คอมพิวเตอร์ แล็ปท็อป และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น โดยความต้องการเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลและปริมาณของข้อมูลที่สูงขึ้น นำไปสู่การศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาศักยภาพการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและมีพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลที่มากขึ้น ทั้งด้านทฤษฎี [8]–[11] และการทดลอง [12]–[14] อย่างกว้างขวาง เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลอาศัยความรู้และการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางแม่เหล็กในการบันทึกและอ่านข้อมูลได้รับความนิยมนอย่างสูงเนื่องจากการประยุกต์ใช้คุณสมบัติแม่เหล็กในการบันทึกข้อมูลจะทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้โดยไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรหน่วยความจำ ในปัจจุบันคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กถูกประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่หลากหลาย เช่น หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก [3] หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอรัค [4], [5] หน่วยความจำแบบ racetrack [6], [7] และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1], [2] เป็นต้น การประยุกต์ใช้คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแต่ละประเภท ซึ่งมีหลักการทำงานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

2.1.1 หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก

หน่วยความจำ MRAM เป็นหนึ่งในหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลได้โดยไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรหน่วยความจำ หน่วยความจำ MRAM ถูกประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำชั่วคราวภายในคอมพิวเตอร์ก่อนการบันทึกข้อมูลแบบถาวรในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากหน่วยความจำ MRAM มีความเร็วของการส่งผ่านข้อมูลที่สูง โครงสร้างของ MRAM ประกอบด้วยโครงสร้างรอยต่อแบบทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunneling junction, MTJ) ที่ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างบิตไลน์ (bit line) และเวิร์ดไลน์ (word line) และถูกเชื่อมต่อกับทรานซิสเตอร์ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.1 การบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำ MRAM อาศัยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง MTJ ในการเก็บบันทึกข้อมูล โดยทั่วไปโครงสร้าง MTJ ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลและชั้นวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการอ้างอิงสัญญาณที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นฉนวนไฟฟ้า (insulator) การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง (referenced layer) ใช้การกำหนดทิศทางแบบวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (synthetic antiferromagnetic, SAF) โครงสร้าง SAF ประกอบด้วยชั้นอ้างอิงและชั้นพิน (pinned layer) ที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุตัวนำไฟฟ้า (conductor) ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นถูกกำหนดจากการ

ประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงถูกกำหนดจากปรากฏการณ์ควบคู่แลกเปลี่ยนระหว่างชั้น (interlayer exchange coupling) จากชั้นพินที่กระทำต่อชั้นอ้างอิง ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นชั้นบันทึกข้อมูล (storage layer) หรือชั้นอิสระ (free layer) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้สองสถานะคือทิศทางที่ขนานและทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นอ้างอิง

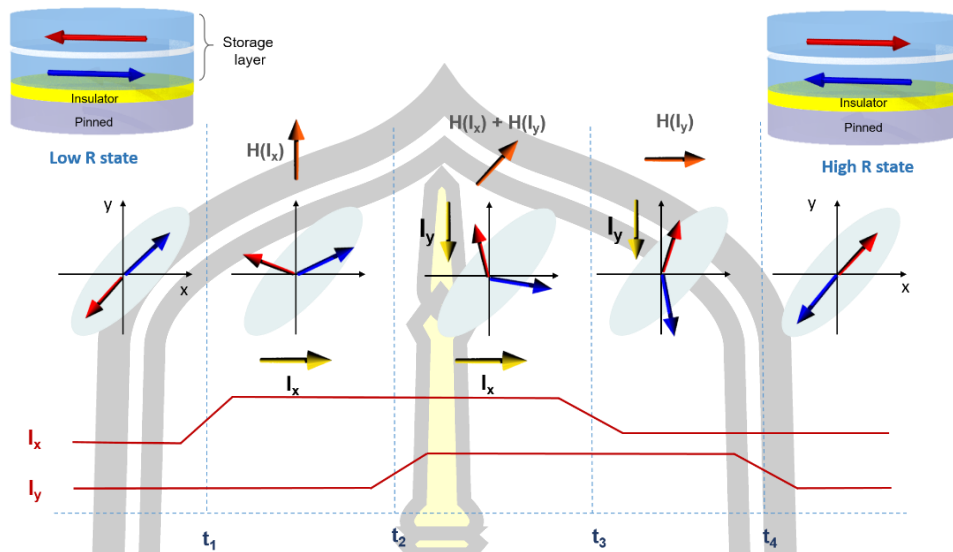


ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของเซลล์ MRAM ที่ประกอบด้วยบิตไลน์ เวิร์ดไลน์และโครงสร้าง MTJ ที่เชื่อมติดกับทรานซิสเตอร์ และโครงสร้างของ MTJ ภายในเซลล์ MRAM [90]

การบันทึกข้อมูลในหน่วยความจำ MRAM ใช้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก กระบวนการเขียนข้อมูลภายในหน่วยความจำ MRAM ใช้การปัดวงจรของทรานซิสเตอร์และป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านบิตไลน์และเวิร์ดไลน์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูล โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ถูกรสร้างจากบิตไลน์จะมีทิศทางตามแกนง่าย (easy axis) ของชั้นบันทึกข้อมูล ในขณะที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกรสร้างจากเวิร์ดไลน์จะมีทิศทางตามแกนยาก (hard axis) ของชั้นบันทึกข้อมูล ซึ่งการป้อนสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางแกนง่ายและแกนยากจะช่วยลดค่าสนามเขียนข้อมูลเนื่องจากการลดค่าสนามลบล้างของโครงสร้างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรตามทฤษฎีของสโตนเนอร์-วอลฟาร์ท (Stoner-Wohlfarth) [90] โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการเขียนข้อมูลจะมีทิศทางตามทิศทางของการป้อนกระแสไฟฟ้าดังแสดงตามภาพประกอบ 2.1

โดยทั่วไปหลักการอ่านข้อมูลของหน่วยความจำ MRAM ใช้การวัดค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นบันทึกข้อมูล กระบวนการอ่านข้อมูลจะใช้การเปิดวงจรทรานซิสเตอร์และป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างของ MTJ เพื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดหรือต่ำสุด โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าที่ถูกใช้ในการตรวจวัดสถานะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลจะต้องมีค่าประมาณ 0.1-0.2 โวลต์ เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลเนื่องจากการส่งผ่านปรากฏการณ์สปินทอร์ค โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง MTJ จะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นบันทึกข้อมูล ซึ่งค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าต่ำสุดเมื่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นบันทึกข้อมูลจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกันเนื่องจากเกิดการทะลุผ่านของกระแสสปินที่สูง ในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นบันทึกข้อมูลจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน

อย่างไรก็ตามการพัฒนาอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแบบ MRAM นำไปสู่ข้อจำกัดของการลดขนาดของอุปกรณ์และการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูล เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่สร้างขึ้นส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลของเซลล์ข้างเคียง จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนา toggle MRAM จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างชั้นบันทึกข้อมูลจากแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นเดียวไปสู่โครงสร้างแม่เหล็กแบบ SAF เพื่อลดค่าแอนไอโซโทรปีรูปร่าง (shape anisotropy) เนื่องจากพลั๊กซ์ของแม่เหล็กที่เกิดระหว่างชั้นฟิล์มและเปลี่ยนแปลงแนวแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง MTJ ทำมุม 45 องศา กับบิตไลน์และเวอร์ดไลน์เพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียนข้อมูล กระบวนการบันทึกข้อมูลและการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายใน toggle MRAM แสดงได้ตามภาพประกอบ 2.2 กระบวนการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำ toggle MRAM ใช้การป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทาง x เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน y เพื่อเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าทั้งในทิศทาง x และ y เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ x ตามลำดับ เพื่อเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มในระหว่างเวลา t_2 และ t_3 และในลำดับสุดท้ายคือการสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง x เพื่อจัดเรียงให้แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวตามแกนง่ายของวัสดุ การพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหน่วยความจำ toggle MRAM มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นอ้างอิงและชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรที่อยู่ติดกับชั้นฉนวนไฟฟ้า [91]



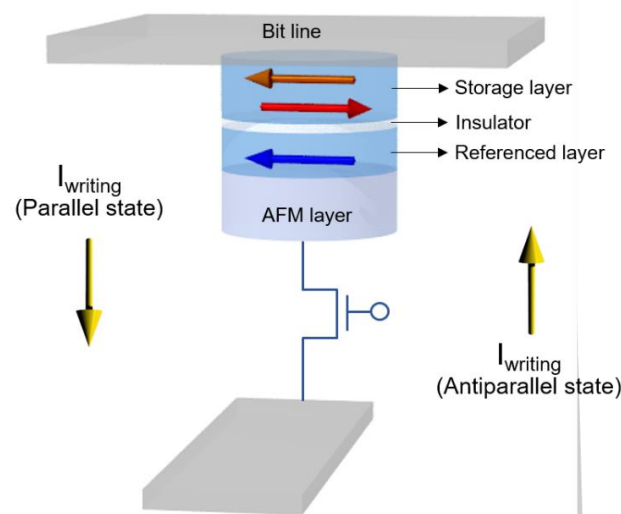
ภาพประกอบ 2.2 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง MTJ ในกระบวนการเขียนข้อมูลภายในหน่วยเก็บข้อมูล toggle MRAM [90]

อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบ MRAM นำไปสู่การข้อจำกัดของการลดขนาดของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลเนื่องจากการลดขนาดของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าทำให้เกิดปรากฏการณ์อิเล็กโตรไมเกรชัน (electromigration) หรือความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้การบันทึกข้อมูลด้วยสนามแม่เหล็กยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลในเซลล์ข้างเคียง จากข้อจำกัดของหน่วยความจำแบบ MRAM และ toggle MRAM นำไปสู่การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์กในการบันทึกข้อมูลจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้าง MTJ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.2 หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์ก

การประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำ MRAM และ toggle MRAM ทำให้เกิดข้อจำกัดของการลดขนาดของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลและการรบกวนของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อเซลล์ MTJ ข้างเคียง จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้การป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้าง MTJ เพื่อบันทึกข้อมูลในหน่วยความจำ MRAM ซึ่งหน่วยความจำประเภทนี้จะถูกเรียกว่า หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์กหรือหน่วยความจำแบบ STT-MRAM การป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างสปีนทอร์กทำให้เกิดการส่งผ่านโมเมนตัมเชิงมุมจากสปีนของอิเล็กตรอนภายในกระแสไฟฟ้ากระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูล เพื่อเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันและบันทึกข้อมูลในลักษณะบิต 1 และบิต 0 โดย

รายละเอียดของปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์กจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.4.4 การแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดหรือการบันทึกข้อมูลในบิต 1 และ 0 มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้าง MTJ ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.3 โดยในการบันทึกข้อมูลบิต 1 สามารถทำได้โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านทางชั้นอ้างอิงไปยังชั้นบันทึกข้อมูล เพื่อทำให้เกิดแมกนีไทเซชันที่มีสถานะตรงกันข้าม (antiparallel state) ในทำนองเดียวกันการบันทึกข้อมูลบิต 0 จะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านชั้นบันทึกข้อมูลไปยังชั้นอ้างอิง เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวในสถานะขนาน (parallel state) [91]



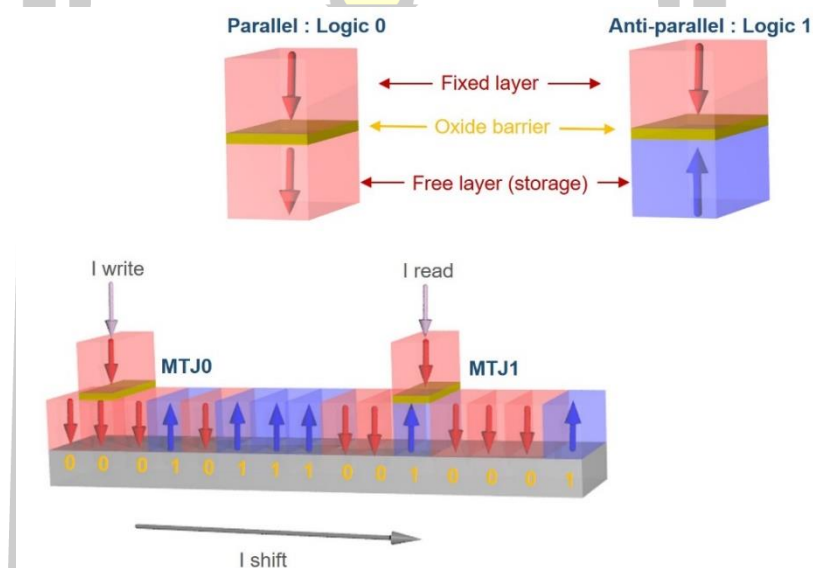
ภาพประกอบ 2.3 การแสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้าง MTJ สำหรับการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำ STT-MRAM [90]

โครงสร้างของ MTJ นอกจากจะนำไปประยุกต์ใช้ภายในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแบบ MRAM และ STT-MRAM แล้ว ยังถูกนำไปใช้ในการพัฒนาหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค ซึ่งเป็นการบันทึกข้อมูลโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของกำแพงโดเมนภายในเส้นลวดนาโน (nanowire) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างและกระบวนการทำงานดังต่อไปนี้

2.1.3 หน่วยความจำแบบเรซแทร็ค

หน่วยความจำแบบเรซแทร็ค (racetrack) เป็นหน่วยความจำในอนาคตที่มีความจุข้อมูลที่สูงกว่าหน่วยความจำแบบ MRAM และมีความเสถียรมากกว่าอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากองค์ประกอบภายในหน่วยความจำแบบเรซแทร็คไม่อาศัยการเคลื่อนที่แบบเชิงกลในการบันทึกข้อมูล โครงสร้างหน่วยความจำแบบเรซแทร็คแสดงตามภาพประกอบ 2.4 กระบวนการทำงาน

ของหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค ใช้การบันทึกข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต 0 และ 1 ภายในเส้นลวดนาโนแม่เหล็ก การบันทึกข้อมูลในบิต 0 และ 1 จะใช้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโดเมนแม่เหล็กภายในเส้นลวดนาโนที่ถูกคั่นกลางด้วยกำแพงโดเมน กระบวนการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค ทำได้จากการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกผ่านเข้าไปในโครงสร้างหัวเขียนข้อมูลผ่านโครงสร้าง MTJ0 เพื่อเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโดเมนแม่เหล็กตามความต้องการบันทึกบิต 0 และ 1 ในขณะที่กระบวนการอ่านข้อมูลจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางระนาบกับเส้นลวดนาโนเพื่อเลื่อนบิตข้อมูลที่ต้องการให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของหัวอ่านข้อมูลที่โครงสร้าง MTJ1 จากนั้นหัวอ่านข้อมูลจะทำการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในภายในเส้นลวดนาโนและทำการแปลงข้อมูลเพื่อแสดงในรูปแบบค่าสัญญาณทางไฟฟ้า



ภาพประกอบ 2.4 องค์ประกอบและลักษณะการทำงานของหน่วยความจำแบบเรซแทร็ค โดยอาศัยการบันทึกข้อมูลภายในเส้นลวดนาโนและอาศัยโครงสร้าง MTJ ในการบันทึกและอ่านข้อมูล [92]

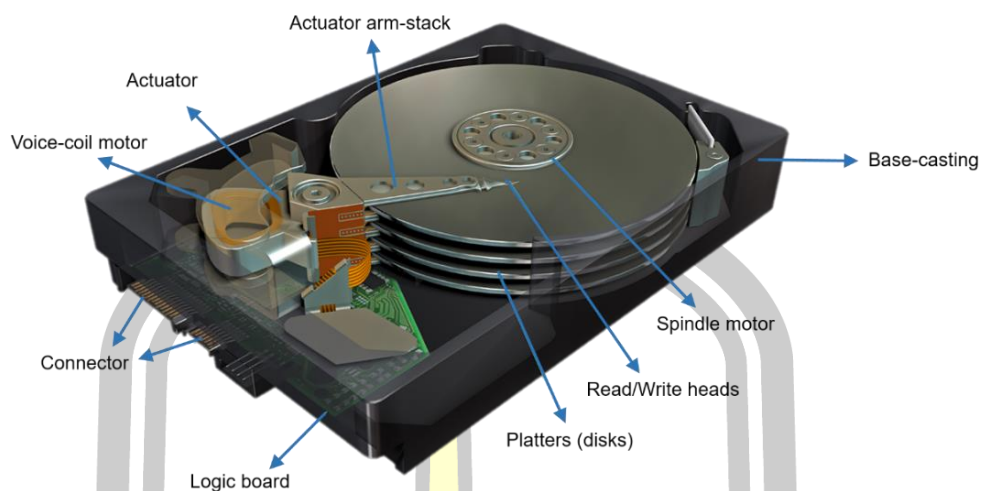
2.1.4 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือหน่วยความจำถาวรที่ได้รับความนิยมและถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในคอมพิวเตอร์ แล็ปท็อปและการบันทึกข้อมูลแบบคราวด์ เนื่องจากมีความหนาแน่นของพื้นที่ของการเก็บข้อมูลที่สูงและมีราคาถูก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกผลิตและใช้ในเชิงอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 1957 ซึ่งในขณะนั้นมีความหนาแน่นของพื้นที่ของการเก็บข้อมูลเพียง 2 กิโลบิตต่อตารางนิ้ว (kbit/in²) [93] อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมาการพัฒนาอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งเชิงทดลองและทฤษฎีเพื่อพัฒนาศักยภาพการทำงานของหน่วยความจำ จาก

การศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้สูงขึ้น โดยในปัจจุบันความหนาแน่นของพื้นที่ของการเก็บข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าสูงถึง 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in²) ซึ่งมีค่ามากกว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในช่วงแรกถึง 500 ล้านเท่า

ความต้องการเพิ่มศักยภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นำไปสู่การศึกษากลไกการทำงานและองค์ประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยโครงสร้างและองค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แสดงดังภาพประกอบ 2.5 กระบวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้การบันทึกข้อมูลบนแผ่นดิสก์ (platter) ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กที่ถูกติดตั้งบนมอเตอร์แกนหมุน (spindle motor) โดยมอเตอร์แกนหมุนจะทำหน้าที่หมุนแผ่นดิสก์ไปในตำแหน่งของแทร็คข้อมูลที่ต้องการบันทึกข้อมูล ซึ่งความเร็วในการอ่านและบันทึกข้อมูลหรืออัตราการส่งผ่านข้อมูล (data transfer rate) จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนแผ่นดิสก์และความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล ในปัจจุบันความเร็วของการหมุนแผ่นดิสก์จะมีค่าประมาณ 7200 รอบต่อนาที (round per minute, rpm) ซึ่งทำให้เกิดอัตราส่งผ่านข้อมูลที่ 1030 เมกะบิตต่อวินาที (megabit per second, Mbit/s)

กระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลอาศัยการทำงานโครงสร้างของหัวอ่านและหัวเขียนข้อมูลที่ถูกติดตั้งบนแขนเลื่อน (actuator arm-stack) ซึ่งเชื่อมต่อกับมอเตอร์วอยล์คอยล์ (voice-coil motor) สำหรับใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวเขียน/อ่านสำหรับการบันทึกและอ่านข้อมูล โดยองค์ประกอบทั้งหมดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังกล่าวมาจะถูกบรรจุภายในเบสเคสติง (base-casting) ที่ถูกปิดผนึกอย่างแน่นหนาเพื่อป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล นอกจากนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีค่าที่สูงขึ้น สามารถทำได้โดยอาศัยการบรรจุแก๊สฮีเลียมแทนที่อากาศเพื่อช่วยลดการสั่นของแผ่นดิสก์และเพิ่มศักยภาพความเร็วการบินของหัวอ่านกับหัวเขียนบนแผ่นบันทึกข้อมูล เนื่องจากแก๊สฮีเลียมมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศ โดยการบรรจุแก๊สฮีเลียมในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้สามารถลดระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์และเพิ่มจำนวนแผ่นดิสก์ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นอกจากนี้การใช้แก๊สฮีเลียมแทนที่อากาศสามารถลดค่าพลังงานที่ใช้ในการหมุนจานฮาร์ดดิสก์ส่งผลให้เกิดความร้อนในกระบวนการทำงานที่ลดลงและมีการประหยัดพลังงานที่มากขึ้น [94]



ภาพประกอบ 2.5 โครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [95]

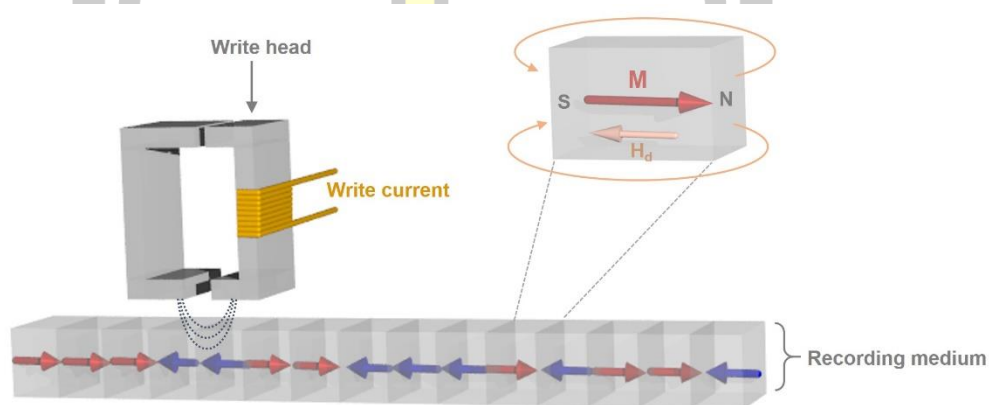
ความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นำไปสู่การศึกษาขององค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูล หัวอ่านและหัวเขียนข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มความจุข้อมูลและประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งความเข้าใจกระบวนการทำงานและความรู้ทางฟิสิกส์พื้นฐานในการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายองค์ประกอบและหลักการทำงานพื้นฐานของแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แผ่นบันทึกข้อมูล

แผ่นบันทึกข้อมูลเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยค่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีค่าแปรผกผันกับขนาดของแทร็คข้อมูล (data track) และบิตข้อมูล (data bit) ภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ลักษณะการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในการจัดเก็บข้อมูล จากการอาศัยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต 0 และ 1

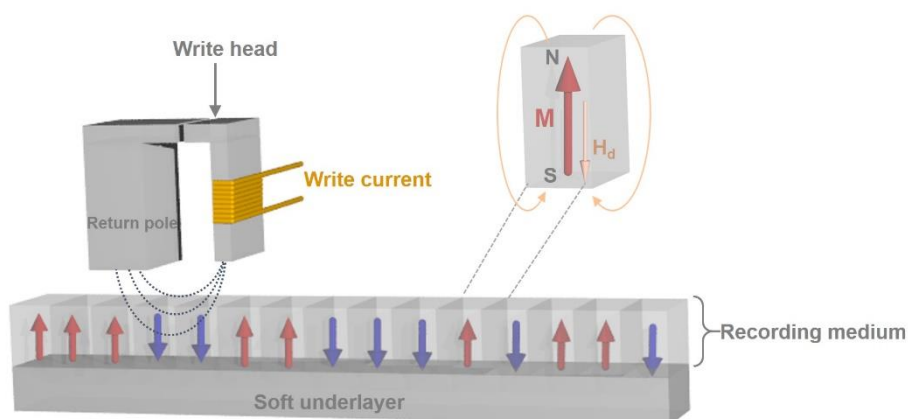
โดยทั่วไปลักษณะการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถแบ่งได้สองรูปแบบคือการบันทึกข้อมูลแบบตามยาว (longitudinal magnetic recording, LMR) และการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording, PMR) ในอดีตการบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยใช้การบันทึกข้อมูลแบบตามยาว ซึ่งแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลมีการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานกับระนาบของแผ่นข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.6 อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มความจุ

ข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนำไปสู่การลดขนาดของบิตข้อมูลให้มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสนามลบถ่วงความแม่เหล็ก (demagnetizing field, H_d) ที่เกิดขึ้นภายในบิตข้อมูล ส่งผลให้แผ่นบันทึกข้อมูลขาดเสถียรภาพในการเก็บบันทึกข้อมูล เนื่องจากสนามลบถ่วงความเป็นแม่เหล็กทำให้เกิดการหักล้างทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลและส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์แม่เหล็กพารายิ่งยวด (superparamagnetic) หรือปรากฏการณ์ที่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรไม่มีสภาพคงค้างทางแม่เหล็กหรือไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันในขณะที่ไม่มีความแม่เหล็กภายนอกได้ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้การบันทึกข้อมูลแบบตามยาวเกิดข้อจำกัดของการลดขนาดของบิตข้อมูลและการเพิ่มความจุของการบันทึกข้อมูล



ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะของหัวเขียนข้อมูลและการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบขนาน ลูกศรสีแดงและสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันในการบันทึกข้อมูลบิต 0 และบิต 1 ตามลำดับ [18], [96]

ข้อจำกัดของการลดขนาดของบิตข้อมูลของการบันทึกข้อมูลแบบตามยาวนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากโดย Iwasaki และ Takemura จากการปรับเปลี่ยนทิศทางแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีทิศทางขนานกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.7 ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากนำไปสู่การแก้ปัญหาผลของสนามลบถ่วงความแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบขนานและการเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบัน



ภาพประกอบ 2.7 ลักษณะของหัวเขียนข้อมูลและการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก ลูกศรสีแดงและสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันในการบันทึกข้อมูลบิต 0 และบิต 1 ตามลำดับ [18], [21]

การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลอาศัยการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากหัวเขียนข้อมูล โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลจะมีทิศทางเดียวกันหรือมีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยว (single domain) โดยแต่ละบิตข้อมูลจะถูกคั่นด้วยวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กอย่างเช่นวัสดุซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพื่อป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กและแสดงถึงขอบเขตของบิตข้อมูล โดยทั่วไปการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลจะคำนึงถึงค่าพลังงานกีดกัน (energy barrier) ที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยค่าพลังงานกีดกันจะมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณของเกรนข้อมูลและค่าแอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก ปัจจุบันเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากมีความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลประมาณ 1- 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว จากใช้วัสดุ CoCrPt ซึ่งมีค่าแอนไอโซโทรปีเท่ากับ 5×10^6 เออร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีขนาดของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยประมาณ 7-8 นาโนเมตร [47] อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลให้มากกว่า 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้วขนาดของเกรนแม่เหล็กจะต้องมีค่าน้อยกว่า 5 นาโนเมตรและวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นชั้นบันทึกข้อมูลจะต้องมีค่าแอนไอโซโทรปีที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูล จากความต้องการดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กหลากหลายประเภท เช่น วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ FePt CoPt และโลหะหายาก (rare earth) FeNdB และ SmCo_5 [47] ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าแอนไอโซโทรปีมากกว่า 10^7 เออร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับเป็นชั้นแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล

2) หัวเขียนข้อมูล

กระบวนการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอาศัยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกสร้างจากหัวเขียนข้อมูล การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกสร้างจากหัวเขียนข้อมูลตามภาพประกอบ 2.7 ในกระบวนการเขียนข้อมูล ขนาดของสนามเขียน (writing field, H_w) ที่ถูกสร้างจากหัวเขียนข้อมูลจำเป็นต้องมีค่ามากกว่าค่าสนามเคอเออร์ซิวิตี (coercivity field, H_c) หรือค่าสนามที่สามารถทำให้แมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กเกิดการกลับทิศทาง โดยทั่วไปสนามเคอเออร์ซิวิตีจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field) ที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินให้มีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุ ดังแสดงตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.1) โดยพบว่าค่าสนามแอนไอโซโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แอนไอโซโทรปี ซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุ

$$H_c \approx \frac{H_K}{2\pi M_s} \quad (2.1)$$

เมื่อ H_K คือสนามแอนไอโซโทรปี

M_s คือค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของวัสดุ

ความต้องการเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลนำไปสู่การลดขนาดของเกรนการบันทึกข้อมูลและการเพิ่มค่าแอนไอโซโทรปีของแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของการลดขนาดของหัวเขียนข้อมูลและเพิ่มสนามเขียนข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เนื่องจากหัวเขียนข้อมูลไม่สามารถสร้างสนามเขียนได้มากกว่าสนามเคอเออร์ซิวิตีของแผ่นบันทึกข้อมูล ($H_w < H_c$) ทำให้เกิดข้อจำกัดของการสร้างสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลตามความสัมพันธ์ของปัญหาของแผ่นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกันสามด้าน (media trilemma problem) ที่ประกอบด้วยเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของการบันทึกข้อมูล ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของเกรนและค่าแอนไอโซโทรปีของวัสดุ ความสามารถในการเขียนข้อมูล (write ability) ของหัวเขียนข้อมูลและค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการอ่านต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR)

โดยทั่วไปค่า SNR ของแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนของเกรนแม่เหล็กภายในบิตข้อมูล [18] ซึ่งการลดขนาดของเกรนของแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลทำให้จำนวนเกรนภายในบิตข้อมูลและค่า SNR มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการลดขนาดของเกรนของแผ่นบันทึกข้อมูลจะส่งผลให้บิตข้อมูลขาดเสถียรภาพทางความร้อนและไม่สามารถรักษาทิศทางของแมก-

นี้ไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลได้ เนื่องจากการลดลงของค่าพลังงานกีดกันภายในบิตข้อมูล ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาค่าความเสถียรภาพทางความร้อนจึงมีการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าแอนไอโซโทรปีที่สูง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาของการสร้างสนามเขียนข้อมูลตามมา เนื่องจากการลดขนาดของหัวเขียนข้อมูลให้มีค่าที่สอดคล้องกับขนาดของบิตข้อมูลทำให้หัวเขียนข้อมูลไม่สามารถสร้างสนามเขียนได้มากกว่า 2 เทสลา ในขณะที่การใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแอนไอโซโทรปีสูง (มากกว่า 10^7 เอิร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นชั้นบันทึกข้อมูลจำเป็นต้องใช้สนามเขียนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 5 เทสลา จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนากระบวนการเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รูปแบบใหม่คือ การใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการเขียนข้อมูล (heat-assisted magnetic recording, HAMR) [45]–[47] และการใช้คลื่นไมโครเวฟเข้ามาช่วยในการเขียนข้อมูล (microwave-assisted magnetic recording, MAMR) [48]–[50]

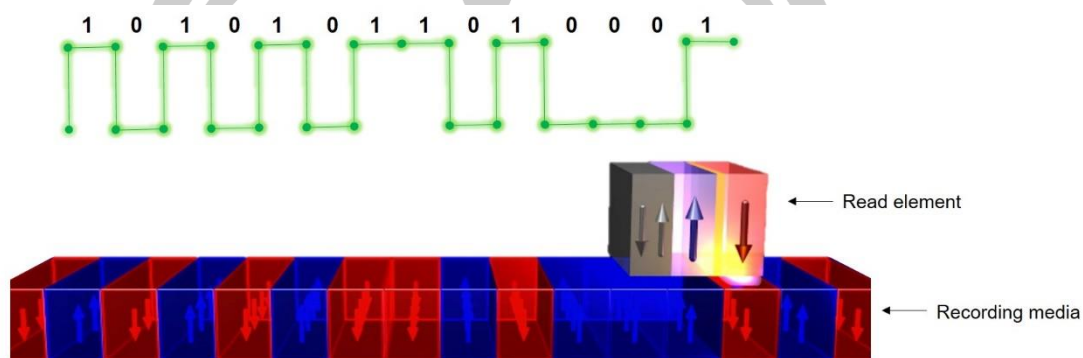
เทคโนโลยีการบันทึก HAMR จะอาศัยความร้อนเข้ามาช่วยในการลดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยหลักการทำงานของ HAMR จะใช้การป้อนความร้อนจากเลเซอร์ที่มีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิคูรีของแผ่นบันทึกข้อมูลเข้าสู่ชั้นบันทึกข้อมูลพร้อมทั้งป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อทำการเขียนข้อมูล ในขณะเดียวกันภายหลังการเหนี่ยวนำด้วยสนามเขียนข้อมูล จะทำการลดอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิห้องเพื่อรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยเมื่อทำการป้อนเลเซอร์ที่มีอุณหภูมิเข้าใกล้ค่าอุณหภูมิคูรีเข้าสู่แผ่นบันทึกข้อมูลจะทำให้สปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กพารา เนื่องจากผลของความร้อนจะทำให้พลังงานกีดกันของวัสดุมีค่าน้อยลง

ในขณะที่เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบ MAMR จะใช้การกวัดแกว่งของสปินทอร์ก (spin torque oscillator) สำหรับสร้างคลื่นไมโครเวฟเพื่อเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุ โดยจะทำให้เกิดมุมระหว่างแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งช่วยให้เกิดทอร์กกระทำต่อแมกนีไทเซชันและทำให้สนามเขียนสามารถเหนี่ยวนำทิศทางของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ง่ายขึ้น จากการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใหม่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของการสร้างสนามเขียนภายในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลที่สูงขึ้นในอนาคตได้

3) หัวอ่านข้อมูล

หัวอ่านข้อมูลเป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบที่สำคัญภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำหน้าที่ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลจากกระบวนการเขียนข้อมูลและแสดงในรูปแบบ

ของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า โดยค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอ่านข้อมูลจะแสดงข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต (บิต 1 และ 0) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 การแสดงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าในกระบวนการอ่านข้อมูลจะแสดงในรูปแบบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดหรือต่ำสุดเพื่อแสดงค่าบิต 1 และบิต 0 โดยการแสดงค่าไบนารีบิตจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีโทเซชันภายในหัวอ่านข้อมูลและแผ่นบันทึกข้อมูล



ภาพประกอบ 2.8 ลักษณะการอ่านข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต 0 และ 1 ในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

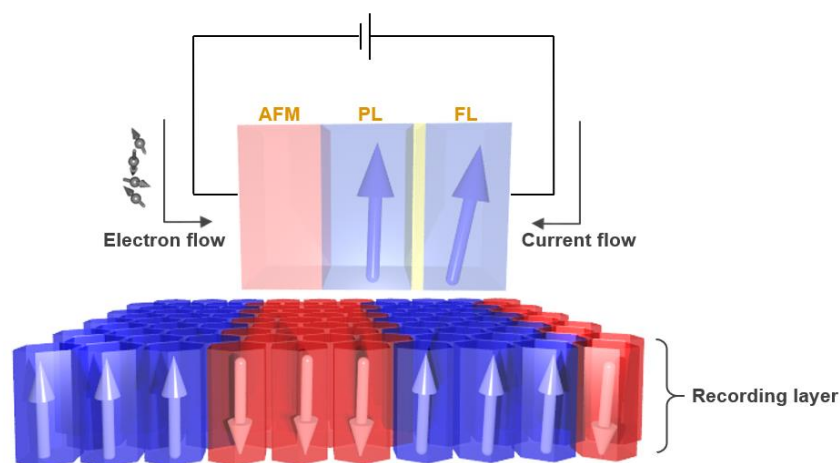
จากการศึกษากระบวนการทำงานพื้นฐานและองค์ประกอบต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบว่าความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการลดขนาดของพื้นที่การเก็บข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลและเพิ่มค่าแอนไอโซโทรปีหรือความเป็นแม่เหล็กของวัสดุให้มีค่าที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพในการบันทึกข้อมูล โดยทั่วไปการลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลจะทำให้เกิดการลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของบิตข้อมูล ปัจจุบันการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการส่งผ่านค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล การเกิดสัญญาณรบกวนและการจำแนกสัญญาณบิต 0 และ 1 ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าลดลง การศึกษากระบวนการทำงานที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลจึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่นำไปสู่แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการอ่านข้อมูลของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ในอนาคต ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายส่วนประกอบ กระบวนการทำงานปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและปรากฏการณ์สปินทอร์คที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อการทำงานพื้นฐานการทำงานและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2 หัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การแสดงผลสัญญาณไบনারีบิตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะอาศัยการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลและแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ปัจจุบันการลดขนาดของบิตข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้เกิดการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับพื้นที่การบันทึกข้อมูล โดยการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เกิดข้อจำกัดของประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล การศึกษากระบวนการทำงานและและส่วนประกอบภายในหัวอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งสำคัญและถูกศึกษาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพื่อทำความเข้าใจพื้นฐานและลักษณะของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับแรกจะทำการอธิบายองค์ประกอบและหลักการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

การบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุในการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของไบনারีบิต โดยทั่วไปการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลและแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างสปินวาล์ว (spin valve) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โครงสร้างสปินวาล์วทำหน้าที่ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า โครงสร้างอย่างง่ายของสปินวาล์วประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุนอนแมกเนต โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นเฟอร์โรแมกเนตชั้นที่หนึ่งหรือชั้นพิน (pinned layer, PL) ถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนจากการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นพินและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (AFM) ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นที่สองหรือชั้นอิสระ (free layer, FL) สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้จากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.9



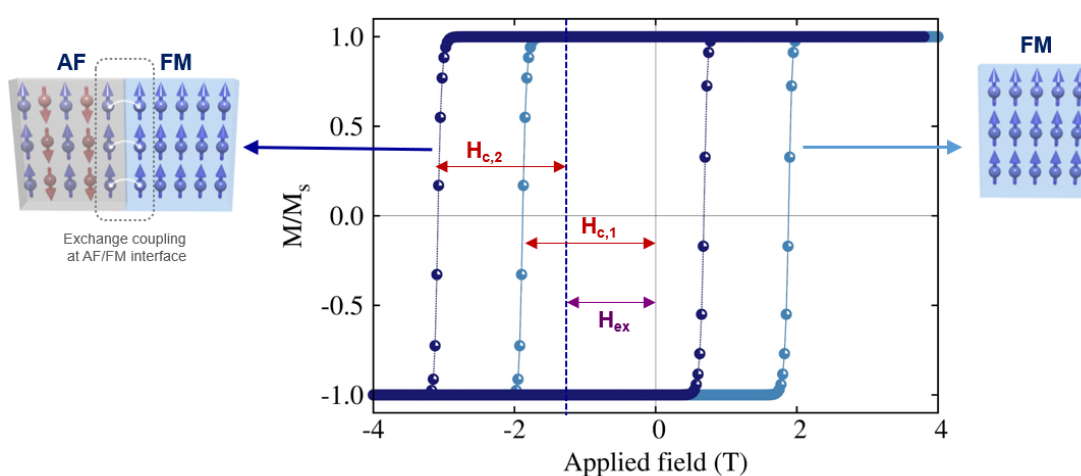
ภาพประกอบ 2.9 โครงสร้างสปินวาล์วของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล เพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า

กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการเปรียบเทียบทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า โดยค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ กล่าวคือหัวอ่านข้อมูลจะแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุดหรือแสดงค่าสัญญาณบิต 0 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม หัวอ่านข้อมูลจะแสดงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดหรือแสดงค่าสัญญาณบิต 1 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม จากการพิจารณากระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลพบว่า การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ส่งผลต่อการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 หรือ 1 ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายรายละเอียดของการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างชั้นพินและชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์

การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินในบริเวณรอยต่อของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร โดยสปินในบริเวณรอยต่อของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแอนไอโซโทรปีที่สูงจะออกแรงกระทำกับสปินในบริเวณรอยต่อของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร ซึ่งเหนี่ยวนำให้สปินภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนดังกล่าวทำให้เกิดการเลื่อนออกของวงปิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis

loop) ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสนามเคอเออร์ซีวิตี (coercivity field, H_c) หรือสนามที่ใช้ในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินดังแสดงตามภาพประกอบ 2.10 โดยค่าสนามไบแอสแลกเปลี่ยนที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและแม่เหล็กเฟอร์โร โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลคือวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีส ($\text{Ir}_{20}\text{Mn}_{80}$) ซึ่งมีความแรงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นและค่าอุณหภูมิกีดกัน (blocking temperature) ที่สูง [93]



ภาพประกอบ 2.10 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปีนในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนของวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตร

อย่างไรก็ตามในกระบวนการอ่านข้อมูล การอาศัยเฉพาะผลของสนามไบแอสแลกเปลี่ยนในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินยังคงไม่เพียงพอสำหรับการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินให้มีทิศทางที่แน่นอนและไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงาน ซึ่งทำให้เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของสปีนบริเวณขอบของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้สปีนในบริเวณขอบของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแกนง่ายของวัสดุและไม่สามารถเหนี่ยวนำให้สปีนภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจัดเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอน โดยการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสัญญาณรบกวน เนื่องจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน [97] จากปัญหาดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้โครงสร้างแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic structure, SAF) เพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงให้มี

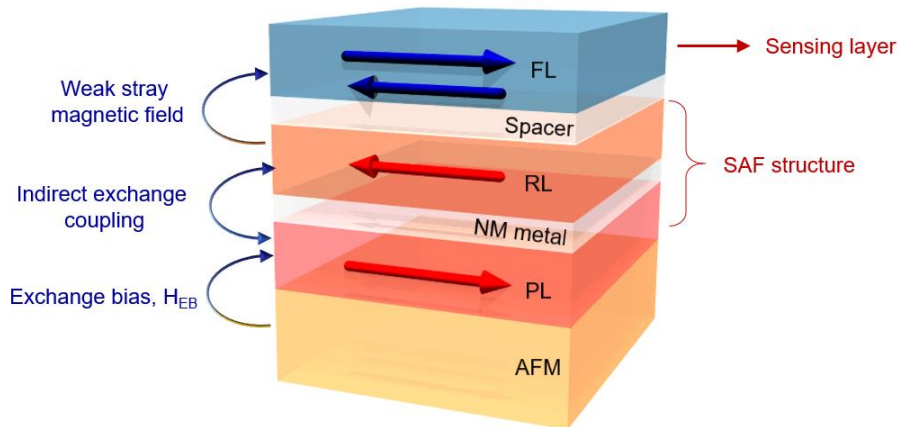
ทิศทางที่แน่นอน [90] โดยโครงสร้างแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์ประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุนอนแมกเนตที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า เช่น รูทีเนียม (ruthenium, Ru) และอิริเดียม เป็นต้น ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟินถูกกำหนดจากปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนพลังงานของสปินบริเวณรอยต่อของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่กระทำกับสปินในบริเวณรอยต่อของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง (reference layer, RL) จัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิน เนื่องจากปรากฏการณ์การควบคู่แลกเปลี่ยนระหว่างชั้น (interlayer exchange coupling) ซึ่งเกิดขึ้นจากการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อม (indirect exchange coupling) ระหว่างชั้นฟินและชั้นอ้างอิง ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.11 ปรากฏการณ์ควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมเกิดจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของอิเล็กตรอนภายในชั้นฟินกระทำต่ออิเล็กตรอนในชั้นตัวนำของชั้นนอนแมกเนต ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนในชั้นตัวนำของชั้นนอนแมกเนตมีอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนกับอิเล็กตรอนของสปินภายในชั้นอ้างอิงอีกครั้ง ปรากฏการณ์ควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมสามารถอธิบายได้จากอันตรกิริยา Rudermann–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) ซึ่งพิจารณาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานของสปินภายในชั้นฟินและสปินภายในชั้นอ้างอิงในรูปแบบของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg form) ดังแสดงตามสมการที่ (2.2) โดยค่าพลังงานควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่การแลกเปลี่ยนและมุมของสปินระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เมื่อกำหนดให้ \hat{S}_P และ \hat{S}_R เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินภายในชั้นฟินและชั้นอ้างอิงตามลำดับ

$$\begin{aligned} E_{\text{ie}} &= -J_{\text{RKKY}} \hat{S}_P \cdot \hat{S}_R = -J_{\text{RKKY}} |\hat{S}_P| |\hat{S}_R| \cos \theta \\ E_{\text{ie}} &= -J_{\text{RKKY}} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ J_{RKKY} คือค่าคงที่การควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อม

θ คือมุมระหว่างสปินในบริเวณขอบของชั้นฟินและชั้นอ้างอิงที่อยู่ติดกับชั้นนอนแมกเนต

โดยทั่วไปสปินภายในวัสดุจะพยายามจัดเรียงตัวให้อยู่ในสถานะที่มีค่าพลังงานที่ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.2) พบว่าค่า J_{RKKY} สามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของสปินระหว่างชั้นฟินและชั้นอ้างอิง โดยค่า J_{RKKY} จะมีค่าเป็นบวกเมื่อสปินระหว่างชั้นฟินและชั้นอ้างอิงจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่ค่า J_{RKKY} จะมีค่าเป็นลบเมื่อสปินระหว่างชั้นฟินและชั้นอ้างอิงจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม



ภาพประกอบ 2.11 การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจากการอาศัยปรากฏการณ์ควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมในโครงสร้าง SAF [90]

โดยทั่วไปอันตรกิริยาการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อม RKKY จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าคงที่ J_{RKKY} ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นนอนแมกเนตหรือระยะห่างระหว่างสปินของชั้นพินและชั้นอ้างอิงดังแสดงตามสมการที่ (2.3) โดยการจัดเรียงตัวแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิงแบบขนานหรือแบบตรงกันข้ามจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นนอนแมกเนตดังแสดงตามภาพประกอบ 2.12

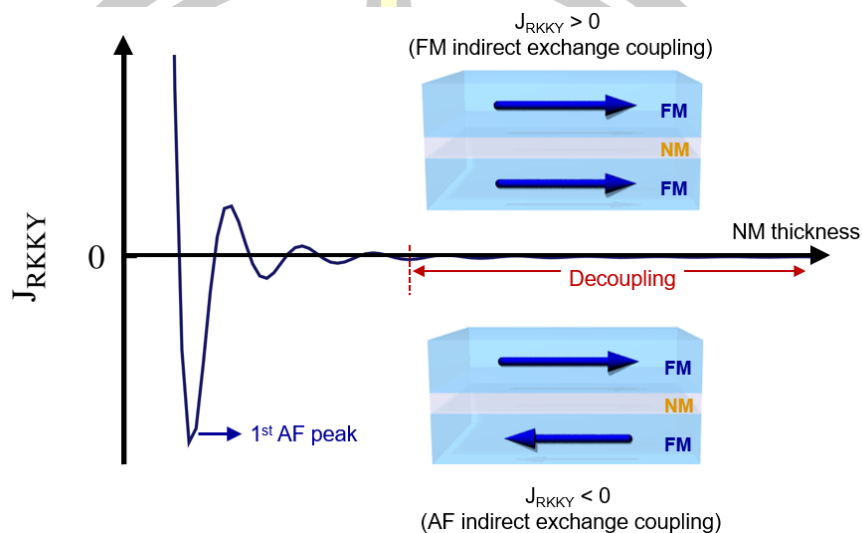
$$J_{RKKY} \approx \frac{\cos(2k_F r_{ij})}{r_{ij}^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ k_F คือ เวกเตอร์คลื่นที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi wavevector)

r_{ij} คือระยะห่างระหว่างสปิน i และ j หรือความหนาของชั้นนอนแมกเนต โดย i และ j คือสปินบริเวณรอยต่อชั้นพินและชั้นอ้างอิงที่ติดกับชั้นนอนแมกเนตตามลำดับ

จากสมการที่ (2.3) พบว่าค่าคงที่ J_{RKKY} สามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง SAF ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นนอนแมกเนตที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิงดังแสดงตามภาพประกอบ 2.12 โดยอันตรกิริยาการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมดังกล่าวจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความหนาของชั้นนอนแมกเนตมีค่าที่สูงขึ้นจากการพิจารณาขนาดของค่าคงที่ J_{RKKY} ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 พบว่าพีคแรกของอันตรกิริยาหรือการควบคู่แลกเปลี่ยนจะมีค่าสูงสุด เมื่อค่า J_{RKKY} เป็นลบหรือแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิงจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีความหนาของวัสดุนอนแมกเนตหรือ Ru ประมาณ 0.4 นาโนเมตร [93] ดังนั้นการประยุกต์ใช้โครงสร้าง SAF ที่มีความหนาของชั้น Ru

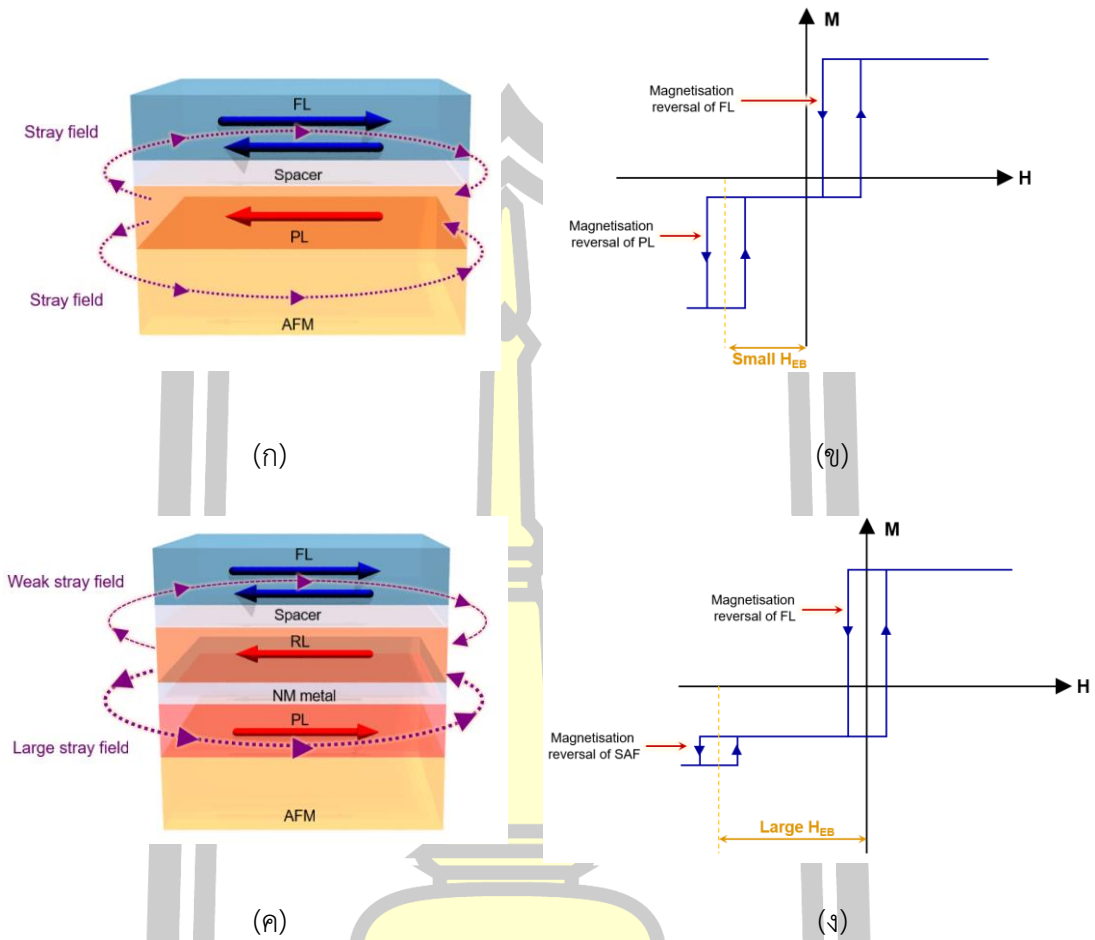
ประมาณ 0.4 นาโนเมตรจะทำให้เกิดการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมที่สูงที่สุด ซึ่งจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนดังกล่าวจะช่วยให้แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิงจัดเรียงตัวมีการจัดเรียงตัวที่แน่นอนและลดผลกระทบจากการเบี่ยงเบนทิศทางของสปินบริเวณขอบของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เนื่องจากการลดลงของเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร



ภาพประกอบ 2.12 ผลของความหนาของชั้นนอนแมกเน็ตที่มีต่อการกวัดแกว่งของค่าคงที่การควบคู่แลกเปลี่ยน [90]

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่รวมผลของโครงสร้าง SAF พบว่าค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยโครงสร้าง SAF มีค่ามากกว่าโครงสร้างสปินวาล์วปกติที่อาศัยเฉพาะปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน เนื่องจากผลของอันตรกิริยาการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิง ส่งผลให้ต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มากขึ้นเพื่อเอาชนะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงของโครงสร้าง SAF ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.13 (ข) และ (ง)

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 2.13 (ก) โครงสร้างของสปินวาล์วที่อาศัยเฉพาะปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (ข) วงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยเฉพาะปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (ค) โครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและโครงสร้าง SAF และ (ง) วงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและโครงสร้าง SAF [90]

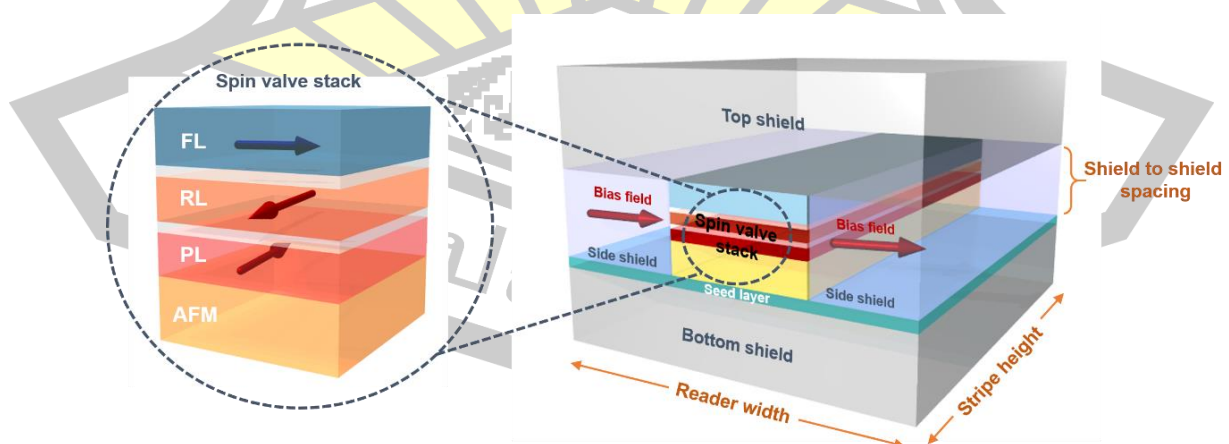
นอกจากผลของอันตรกิริยาการควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อมที่ทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงมีการจัดเรียงตัวที่แน่นอนและลดผลกระทบจากผลของความร้อนที่มีต่อสปินภายในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร โครงสร้างสปินวาล์วที่อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและโครงสร้าง SAF ยังทำให้เกิดการลดผลของสนามสเตรย์ (stray field) หรือสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอ้างอิงแบบตรงกันข้ามในโครงสร้าง SAF ทำให้เกิดโครงสร้างฟลักซ์ปิด (flux closure) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหักล้างของสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก โดยฟลักซ์ของสนามสเตรย์ที่เกิดขึ้นจากชั้นอ้างอิงจะถูกหักล้างจากสนามสเตรย์ที่เกิดขึ้นจากชั้นพิน ส่งผลให้สนามสเตรย์ที่กระทำต่อชั้นอิสระมีค่าน้อยลงดังแสดงตามภาพประกอบ 2.13 (ก) และ (ค) การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงโดยการ

อาศัยโครงสร้าง SAF นอกจากจะสามารถแก้ไขปัญหาลดลงของเสถียรภาพทางความร้อนของสปินในบริเวณขอบชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่ส่งผลต่อการกำหนดทิศทางของสปินภายในพิน ยังสามารถลดผลกระทบของสนามสเตรย์ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเช่นกัน ดังนั้นการอาศัยโครงสร้าง SAF ในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันจึงช่วยให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงมีการจัดเรียงตัวที่แน่นอนและมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นอ้างอิงในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน

นอกจากการพิจารณาโครงสร้างสปินวาล์วซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า นอกจากนี้ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลยังประกอบไปด้วยส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งช่วยให้กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น ดังนั้นในลำดับถัดไป จะทำการอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2) ส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล

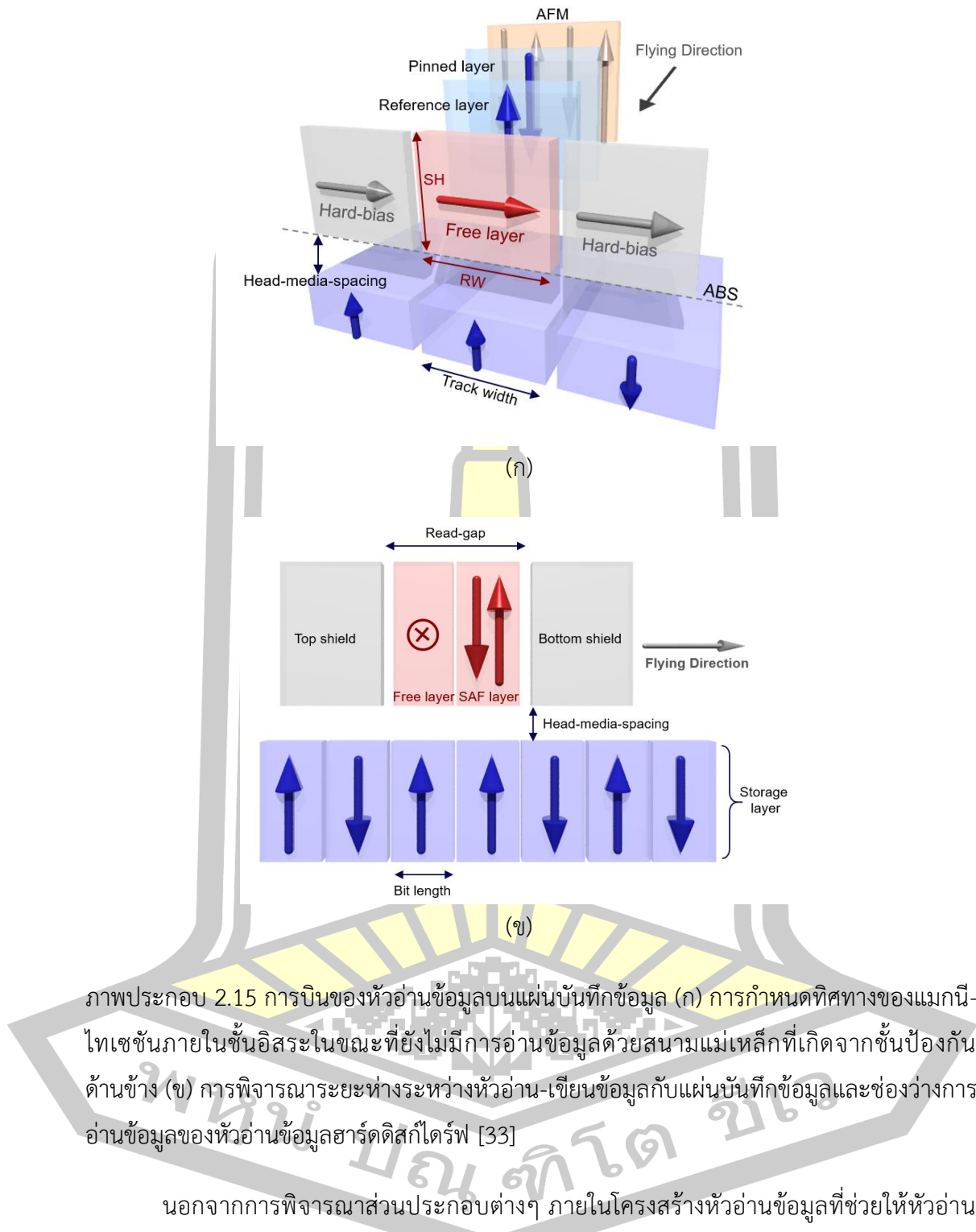
โครงสร้างสปินวาล์วเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำหน้าที่ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลบิต 0 และบิต 1 ในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า นอกจากนี้โครงสร้างสปินวาล์วภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลยังประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญอีกหลายส่วนที่ช่วยให้หัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นได้แก่ ชั้นแรกเริ่ม (seed layer) ชั้นป้องกันด้านบน (top shield) และชั้นป้องกันด้านล่าง (bottom shield) และชั้นป้องกันด้านข้าง (side shields) โดยลักษณะโครงสร้างโดยรวมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แสดงดังภาพประกอบ 2.14



ภาพประกอบ 2.14 องค์ประกอบต่างๆ ภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

โดยทั่วไปโครงสร้างสปีนวาล์วจะถูกปลูกผลึกบนชั้นแรกเริ่ม (seed layer) เพื่อกำหนดทิศทางแกนง่ายภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรของโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยบริเวณขอบด้านข้างของโครงสร้างสปีนวาล์วจะถูกประกบด้วยชั้นป้องกันด้านข้าง ซึ่งทำหน้าที่กำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในขณะที่ยังไม่มีกระแสเหนี่ยวนำจากแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในบริเวณขอบด้านข้างของโครงสร้างสปีนวาล์วและป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากแตร็คข้อมูลข้างเคียงที่ทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวนในกระบวนการอ่านข้อมูล นอกจากนี้ในบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของสปีนวาล์วจะถูกประกบติดด้วยชั้นป้องกันด้านบนและชั้นป้องกันด้านล่าง ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของโครงสร้างสปีนวาล์วจากการสัมผัสหรือการกระทบกับวัตถุภายนอก ปฏิกริยาการออกซิเดชัน (oxidation) และปฏิกริยาการกัดกร่อน (corrosion) ในขณะเดียวกันชั้นป้องกันด้านบนและด้านล่างยังถูกใช้เพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้างเคียงในกระบวนการอ่านข้อมูล โดยชั้นป้องกันด้านบนจะทำหน้าที่ในการซึมซับ (absorb) สนามสเตรย์ที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลข้างเคียง เพื่อลดผลกระทบของสนามสเตรย์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ [98]

เมื่อทำการพิจารณากระบวนการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์พบว่าการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์พอาศัยการบินของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูล โดยมีความสูงเท่ากับระยะห่างระหว่างหัวอ่าน-เขียนข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล (head-media spacing) ค่าสัญญาณไบนารีบิตจะมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเทียบกับชั้นอ้างอิง ในขณะที่ยังไม่มีกระแสอ่านข้อมูล แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงและมีทิศทางขนานกับพื้นผิวร่องลื่นอากาศ (air-bearing surface, ABS) ในขณะที่กระบวนการอ่านข้อมูล ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะเปลี่ยนแปลงตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากบิตข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.15 (ก) เมื่อพิจารณาด้านข้างของหัวอ่านข้อมูลในกระบวนการอ่านข้อมูลพบว่า ช่องว่างการอ่านข้อมูล (read gap) จะมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันด้านบนและด้านล่าง โดยชั้นป้องกันด้านบนและล่างจะถูกใช้เพื่อป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กจากบิตข้างเคียงของช่องว่างการอ่านข้อมูล ในขณะที่ชั้นป้องกันด้านข้างจะถูกใช้เพื่อป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กจากแตร็คข้อมูลข้างเคียง ซึ่งส่งผลให้มีเฉพาะสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลภายในช่องว่างการอ่านข้อมูลเท่านั้นที่ส่งผลต่อกระบวนการอ่านข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.15 (ข) ซึ่งโดยทั่วไปช่องว่างการอ่านข้อมูลจะมีค่าไม่เกินขนาดสองบิตข้อมูล [33]



ภาพประกอบ 2.15 การบินของหัวอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูล (ก) การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในขณะที่ยังไม่มีการอ่านข้อมูลด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากชั้นป้องกันด้านข้าง (ข) การพิจารณาระยะห่างระหว่างหัวอ่าน-เขียนข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลและช่องว่างการอ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [33]

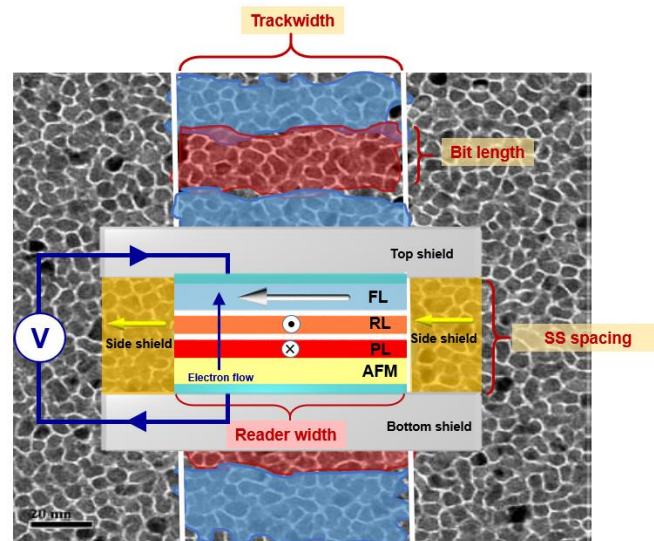
นอกจากการพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ช่วยให้หัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี การออกแบบขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลยังคงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญและมีผลต่อศักยภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยการออกแบบขนาดของหัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องพิจารณาขนาดของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงผล

ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากขอบของเกรนบันทึกข้อมูลและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลและแตร็คข้อมูลข้างเคียง ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.2 ขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูล

ปัจจุบันความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่อาศัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบ PMR มีความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลสูงสุดที่ประมาณ 1 – 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [45] อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลภายในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลจากการอาศัยพลังงานเข้าช่วย (energy assisted magnetic recording) เช่น อุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแบบ HAMR [45]–[47] และ MAMR [48]–[50] เป็นต้น โดยสามารถลดขนาดของเกรนบันทึกข้อมูลของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบ PMR ที่มีขนาดเท่ากับ 7 – 9 นาโนเมตร ให้มีขนาดประมาณ 3 – 5 นาโนเมตร [47] ซึ่งจากการลดขนาดของเกรนการบันทึกข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีค่ามากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [45], [47]

โดยทั่วไปขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width) จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของแตร็คข้อมูล (trackwidth, TW) ในขณะที่ขนาดความกว้างของบิตข้อมูล (bit length, BL) จะมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับระยะห่างระหว่างชั้นป้องกัน (shield to shield spacing, SS spacing) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.16 โดยระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มภายในโครงสร้างสปินวาล์ว ปัจจุบันการลดขนาดของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ นำไปสู่การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ [99] โดยขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับขนาดของบิตการบันทึกข้อมูล ซึ่งความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าน้อยกว่าความกว้างของแตร็คการบันทึกข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากขอบแตร็ค (track-edge noise) [55] และความหนาของชั้นอิสระภายในโครงสร้างของสปินวาล์วจะต้องมีความหนาน้อยกว่าขนาดของสองบิตข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้างเคียง [52]



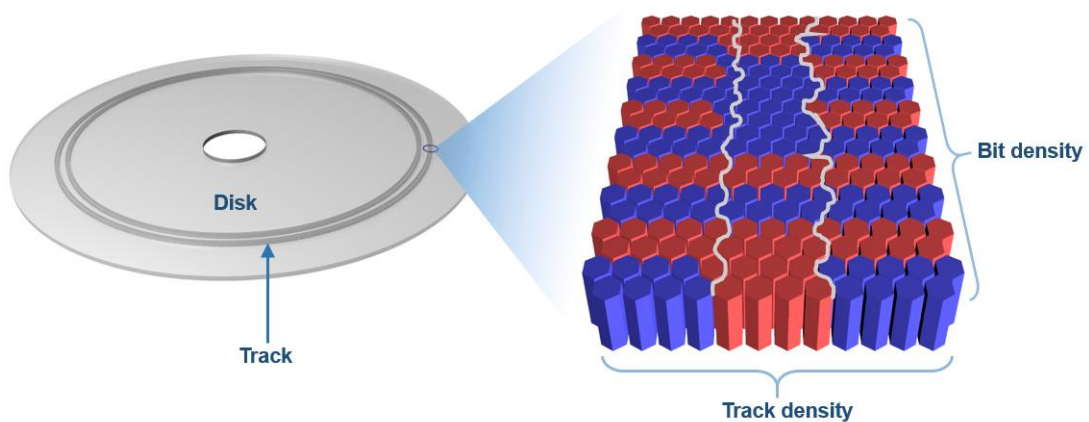
ภาพประกอบ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยพื้นที่สีแดงและสีน้ำเงินแสดงขอบเขตของบิตข้อมูลซึ่งแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางพุ่งเข้าและพุ่งออกจากกระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล ตามลำดับ [99]

โดยทั่วไปการพิจารณาความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูล (areal density, AD) ภายในแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกอธิบายในรูปแบบของพื้นที่การบันทึกข้อมูลในพื้นที่หนึ่งตารางนิ้ว โดย AD มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของแทร็คข้อมูล (track density, TD) และบิตข้อมูล (bit density, BD) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) [52] โดยความหนาแน่นของแทร็คข้อมูลถูกนิยามจากความหนาแน่นของจำนวนแทร็คข้อมูลต่อความยาวหนึ่งนิ้ว (track per inch, TPI) ในขณะที่ความหนาแน่นของบิตข้อมูลถูกนิยามจากจำนวนของบิตข้อมูลต่อความยาวหนึ่งนิ้ว (bit per inch, BPI) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.17 โดย AD มีหน่วยเป็นบิตต่อตารางนิ้ว (bit/in^2)

$$AD = (TD)(BD) \quad (2.4)$$

เมื่อ TD คือจำนวนของแทร็คต่อหนึ่งนิ้วและ BD คือจำนวนบิตต่อหนึ่งนิ้ว

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 2.17 การพิจารณาความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของการลดขนาดของบิตและแทร็คข้อมูลจะอาศัยการพิจารณาค่าอัตราส่วนบิตข้อมูล (bit aspect ratio, BAR) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของบิตข้อมูลต่อความหนาแน่นของแทร็คข้อมูลตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.5) ซึ่งในทำนองเดียวกันค่า BAR สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างความกว้างของแทร็คต่อขนาดของบิตข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 2.18 (ก)

$$\text{BAR} = \frac{\text{BD}}{\text{TD}} = \frac{\text{TW}}{\text{BL}} \quad (2.5)$$

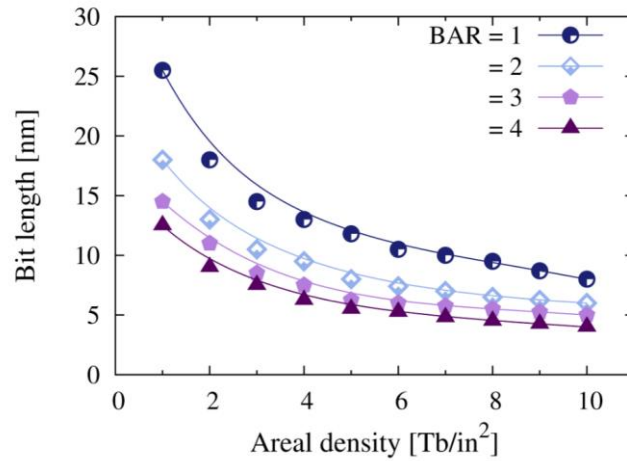
เมื่อ TW คือความกว้างของแทร็ค มีหน่วยเป็นนาโนเมตร

BL คือความกว้างของบิตข้อมูล มีหน่วยเป็นนาโนเมตร

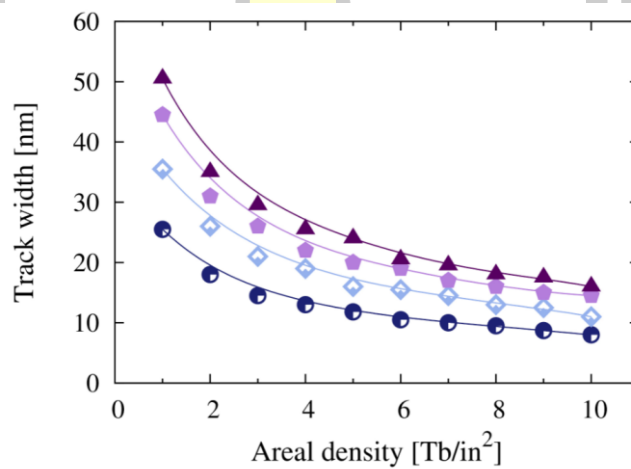
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) พบว่าขนาดของบิตข้อมูลจะมีค่าแปรผกผันกับค่า BAR และความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูล

การเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการลดขนาดของบิตข้อมูลและความกว้างของแทร็คข้อมูล โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของบิตข้อมูลและความกว้างของแทร็คข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 10 เทระบิตต่อตารางนิ้วแสดงตามภาพประกอบ 2.18 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การลดขนาดของพื้นที่การบันทึกข้อมูลจำเป็นต้องคำนึงถึงค่า BAR ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล ในกรณีที่ค่า BAR มีค่าเท่ากับ 1 หรือความกว้างของแทร็คและขนาดของบิตข้อมูลจะมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้ค่าความกว้างของแทร็คข้อมูลในกรณีนี้มีค่าน้อยมากและทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการเขียนและ

อ่านข้อมูล เนื่องจากข้อจำกัดเชิงกลของการออกแบบหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล [100] ซึ่งในกรณีที่ค่าอัตราส่วนบิตข้อมูลเท่ากับ 1 จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนทางความร้อน (mag-noise) ภายในหัวอ่านข้อมูลและข้อจำกัดของการสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กและมีค่า RA ที่ต่ำกว่า 10 มิลลิโห์มตารางไมโครเมตร [52], [101]

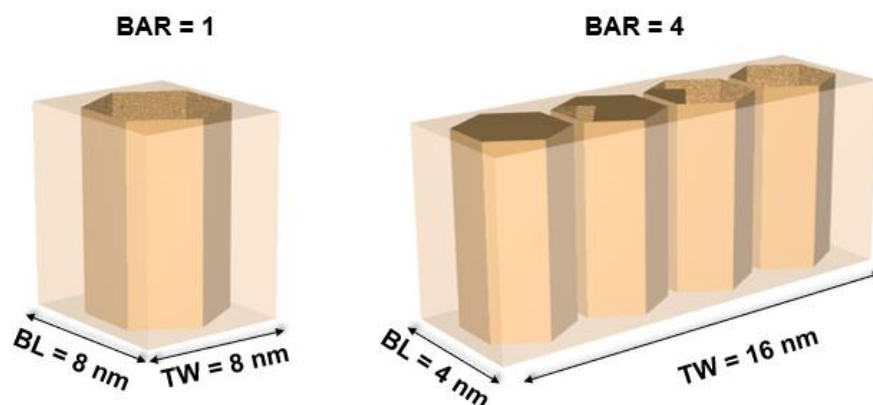


(ก)



(ข)

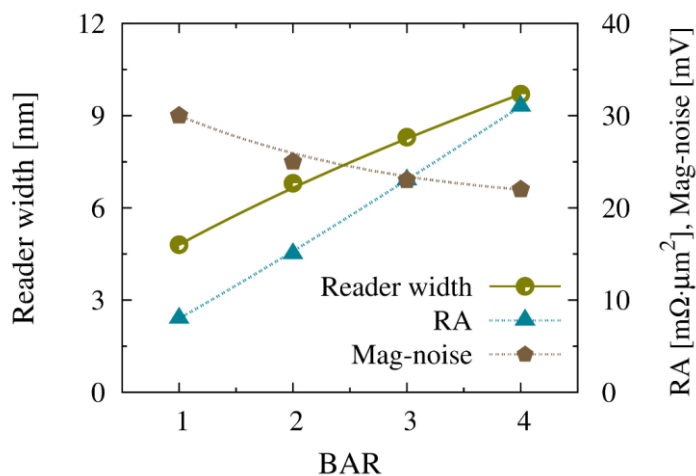
พหุ ประถมศึกษา



(ค)

ภาพประกอบ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ขนาดของบิตข้อมูลและ (ข) ความกว้างของแตร็คข้อมูลกับความจุข้อมูลที่ค่า BAR ต่างๆ (ค) การเปรียบเทียบขนาดของบิตและความกว้างของพื้นที่การบันทึกข้อมูลในกรณีที่ BAR มีค่าเท่ากับ 1 และ 4 ของความจุข้อมูลที่ 10 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [52]

ยกตัวอย่างการพิจารณาพื้นที่การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความจุข้อมูล 10 เทระบิตต่อตารางนิ้ว พบว่ามีพื้นที่การบันทึกข้อมูลหนึ่งบิตจะมีค่าประมาณ 64 ตารางนาโนเมตร โดยในกรณีที่ค่า BAR มีค่าเท่ากับ 1 ความกว้างของแตร็คข้อมูลและขนาดของบิตข้อมูลจะมีค่าเท่ากับ 8 นาโนเมตร ในขณะที่เมื่อค่า BAR มีค่าเท่ากับ 4 ความกว้างของแตร็คข้อมูลจะมีค่าประมาณ 16 นาโนเมตรและขนาดของบิตข้อมูลมีค่าเท่ากับ 4 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.18 (ค) ซึ่งเมื่อพิจารณาในกรณีที่ค่า BAR มีค่าเท่ากับ 1 พบว่าการลดขนาดความกว้างของแตร็คข้อมูลให้มีค่าเท่ากับ 8 นาโนเมตรส่งผลให้จำเป็นต้องลดขนาดของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลให้มีค่า 5 นาโนเมตร ซึ่งทำให้หัวอ่านข้อมูลขาดเสถียรภาพทางความร้อนและทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนทางความร้อนดังแสดงตามภาพประกอบ 2.19 นอกจากนี้ยังพบว่าการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลยังคงต้องลดค่า RA ให้มีค่าที่ต่ำกว่า 10 มิลลิโอะห์มตารางไมโครเมตรเพื่อรักษาอัตราการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล [101]



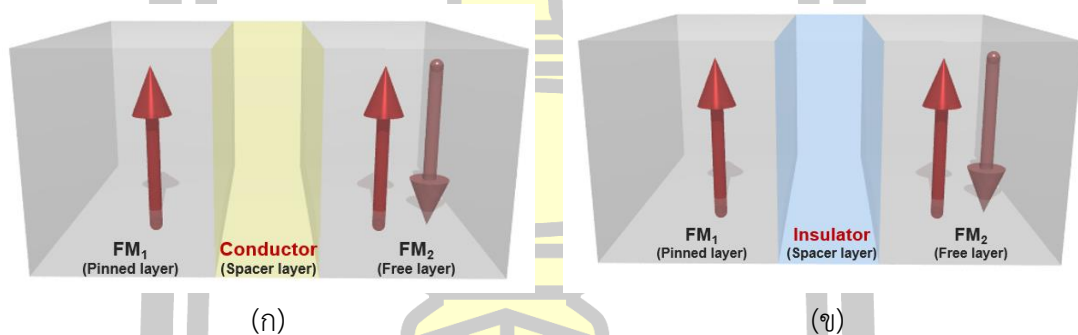
ภาพประกอบ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนบิตข้อมูล ความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ค่า RA และค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน [101]

การลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลโดยใช้ค่า BAR เท่ากับ 1 จะทำให้เกิดข้อจำกัดของเสถียรภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งการออกแบบหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลเท่ากับ 10 เทระบิตต่อตารางนิ้วควรมีค่า BAR เท่ากับ 4 [52] จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า นอกจากการออกแบบและลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล การคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบหัวเขียนกับหัวอ่านข้อมูลและประสิทธิภาพการทำงานของหัวเขียนกับหัวอ่านข้อมูลยังคงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เช่นกัน

สำหรับการออกแบบหัวอ่านข้อมูล นอกจากการพิจารณาขนาดของหัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมกับพื้นที่การบันทึกข้อมูล การพิจารณาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปีนวาล์วเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อการออกแบบหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลบิต 0 และ 1 โดยความสามารถในการจำแนกการแสดงค่าสัญญาณระหว่างบิต 0 และ 1 จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจของการเกิดค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3 ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก โดยมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ กระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการตรวจจับสนาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลและแสดงค่าสัญญาณบิต 0 กับบิต 1 ในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไปหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถแบ่งออกได้สองประเภทหลักๆ ตามกลไกการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก คือหัวอ่านข้อมูลแบบค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance, GMR) หรือหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR และหัวอ่านข้อมูลแบบค่าความต้านทานทางแม่เหล็กแบบทะลุผ่าน (tunneling magnetoresistance, TMR) หรือหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR โดยความแตกต่างของหัวอ่านข้อมูลทั้งสองแบบ คือกลไกการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินในโครงสร้างสปีนวาล์ว ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้น-สเปสเซอร์ที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ



ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นของหัวอ่านข้อมูล (ก) แบบ GMR และ (ข) แบบ TMR โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ

หัวอ่านข้อมูลแบบ GMR อาศัยการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงของสปิน (spin-dependent scattering) จากใช้วัสดุอนแมกเนตที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า (conductor) เป็นชั้นคั่นกลางระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.20 (ก) ในขณะที่หัวอ่านข้อมูลแบบ TMR อาศัยการเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่านของสปิน (spin-dependent tunneling) ในการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก โดยการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulator) และมีความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนเป็นชั้นสเปสเซอร์คั่นกลางระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.20 (ข) ซึ่งรายละเอียดของการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กแบบ GMR และ TMR จะถูกอธิบายในลำดับถัดไป

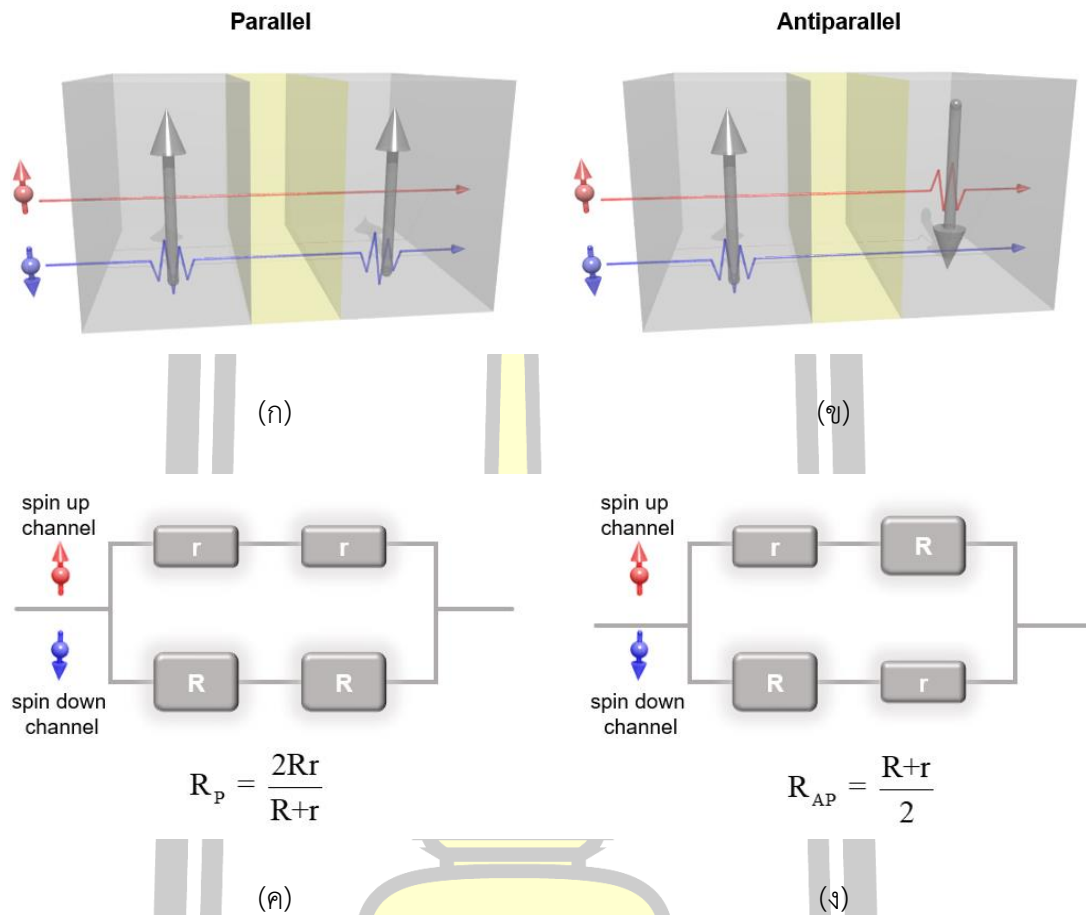
1) ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่

ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่หรือปรากฏการณ์ GMR คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจากการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเนตที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า โดยมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปินของกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว ปรากฏการณ์ GMR ถูกค้นพบในปี 1988 ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก Fe(12nm)/Cr(1nm)/Fe(12nm) [23] และโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแบบหลายชั้น $[Cr/Fe]_n$ [24] โดยพบว่าโครงสร้างดังกล่าวมีค่าอัตราส่วน MR ร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน ซึ่งจากการค้นพบปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กดังกล่าวส่งผลให้การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในด้านทฤษฎี [25]–[28] และการทดลอง [29]–[31] เพื่อหาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล หลังจากนั้นในปี 1991 การทดลองของ S.S.P Parkin และคณะ [32] แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน MR สูงสุดในโครงสร้างวัสดุ $[Co/Cu]_{60}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 65 ที่อุณหภูมิห้องและถูกประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในช่วงปี 1996 [33]

ปรากฏการณ์ GMR มีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปิน (spin-dependent scattering) หรือการเปลี่ยนแปลงแนวทางการเคลื่อนที่ของสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว โดยทั่วไปการกระเจิงของสปินสามารถแบ่งได้สองประเภทใหญ่ๆ คือการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (bulk scattering) และการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต (interfacial scattering) [54]–[56] การกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสปินโพลาไรเซชัน (polarisation) ของวัสดุ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโครงสร้างแถบพลังงาน (band structure) ของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุ โดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าสปินโพลาไรเซชันเท่ากับ 1 จะมีความสามารถเหนี่ยวนำกระแสสปินให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุได้ร้อยละ 100 ซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุที่สูง ในขณะที่การกระเจิงของสปินภายในบริเวณรอยต่อจะมีค่าขึ้นอยู่กับความสอดคล้องกันของโครงสร้างแถบพลังงาน (band matching) ระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ซึ่งในบริเวณรอยต่อจะเกิดการกระเจิงของสปินสูงสุด เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต

การกระเจิงของสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์วสามารถอธิบายได้จากการอาศัยแบบจำลองสองกระแส (two-current model) ของ Mott [102], [103] โดยทั่วไปคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในแถบพลังงาน d เนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบไม่เต็มออร์บิทัลของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน d ซึ่งทำให้เกิดการแยกของแถบพลังงานของสปิน (spin-split band) ออกเป็นสองแถบพลังงานซึ่งเป็นอิสระต่อกันคือแถบพลังงานของสปินขึ้นหรือสปินส่วนมาก (majority) และแถบพลังงานของสปินลงหรือสปินส่วนน้อย (minority) โดยแถบพลังงานของสปินขึ้นจะถูกเติมเต็ม (fully occupied) ในขณะที่แถบพลังงานของสปินลงยังคงมีบางส่วนที่ยังไม่ถูกเติมเต็ม ซึ่งความแตกต่างของแถบพลังงานของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีส่งผลให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่ไม่เท่ากับศูนย์และทำให้เกิดความน่าจะเป็นของการกระเจิงของสปินขึ้นและสปินลงที่แตกต่างกัน การซ้อนทับกันของแถบพลังงาน $3d$ และ $4s$ ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรส่งผลให้สปินส่วนมากมีการจัดเรียงตัวในแถบพลังงาน sp และสปินส่วนน้อยจะอยู่ในแถบพลังงาน d ซึ่งการแยกกันของแถบพลังงานทำให้เกิดความแตกต่างของสภาพนำไฟฟ้าของสปินส่วนมากและสปินส่วนน้อย โดยสภาพการนำไฟฟ้าของสปินส่วนมากจะมีค่าขึ้นอยู่กับ sp อิเล็กตรอน ซึ่งมีความหนาแน่นทางสถานะที่ต่ำส่งผลมีระยะอิสระเฉลี่ยที่สูงและสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง ในขณะที่สปินส่วนน้อยจะมีค่าขึ้นอยู่กับการผสมกันของแถบพลังงาน $sp-d$ ($sp-d$ hybridization) และสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่ำ โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุเป็นอิเล็กตรอนที่มีแถบพลังงาน sp เนื่องจากเป็นอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง มีระยะอิสระเฉลี่ยและสภาพการนำไฟฟ้าที่สูง จะเกิดการกระเจิงและเข้าไปจัดเรียงในออร์บิทัลที่ว่างของแถบพลังงาน d และทำให้เกิดปรากฏการณ์ GMR [1], [104]

การกระเจิงของสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์วจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โดยการกระเจิงของสปินจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปินวาล์วดังแสดงตามภาพประกอบ 2.21 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันดังแสดงตามภาพประกอบ 2.21 (ก) สปินส่วนน้อยจะเกิดการกระเจิงภายในแม่เหล็กเฟอร์โรทั้งสองชั้น ในขณะที่สปินส่วนมากซึ่งมีทิศทางเดียวกับแมกนีไทเซชันสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายและเกิดการกระเจิงของสปินที่ต่ำ ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานรวมที่ต่ำ เนื่องจากการกระเจิงของสปินส่วนมากเป็นตัวแปรหลักที่มีต่อค่าสภาพนำไฟฟ้าของโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 2.21 (ค) ในทางตรงกันข้ามเมื่อแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามดังแสดงในภาพประกอบ 2.21 (ข) ทั้งสปินขึ้นและสปินลงจะเกิดการกระเจิงที่สูงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นแม่เหล็กที่มีทิศทางแมกนีไทเซชันตรงข้ามกับทิศทางของสปิน ซึ่งทำให้เกิดค่าความต้านทานรวมที่สูงดังแสดงในภาพประกอบ 2.21 (ง)



ภาพประกอบ 2.21 การอธิบายค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้าง GMR จากการพิจารณา วงจรของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในโครงสร้างสปีนวาล์วที่มีการจัดเรียงตัว (ก) แบบขนาน (ข) แบบตรงกันข้าม ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของสปินขึ้นและสปินลงผ่าน โครงสร้างสปีนวาล์ว (ค) ในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและ (ง) จัดเรียงตัวแบบตรงกัน ข้าม [101]

การเปลี่ยนแปลงค่า GMR จะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็ก เฟอร์โร โดยโครงสร้างสปีนวาล์วจะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้ารวมสูงสุดและต่ำสุดในกรณีที่แมกนี- ไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณาวงจรของค่าความ ต้านทานทางไฟฟ้าตามภาพประกอบ 2.21 (ค) และ (ง) สามารถคำนวณค่าอัตราส่วน MR ได้จาก อัตราส่วนระหว่างความต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบ ขนานและแบบตรงกันข้ามกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบ ขนาน (ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำสุด) ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$\text{MR ratio} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \quad (2.6)$$

เมื่อ R_{AP} คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม มีหน่วยเป็น Ω (โอห์ม)

R_P คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางขนาน มีหน่วยเป็นโอห์ม

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{MR ratio} = \frac{(R - r)^2}{4Rr} \quad (2.7)$$

นอกจากการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดจากการอาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงของสปีนในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการทะลุผ่านของสปีนในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2) ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กการทะลุผ่าน

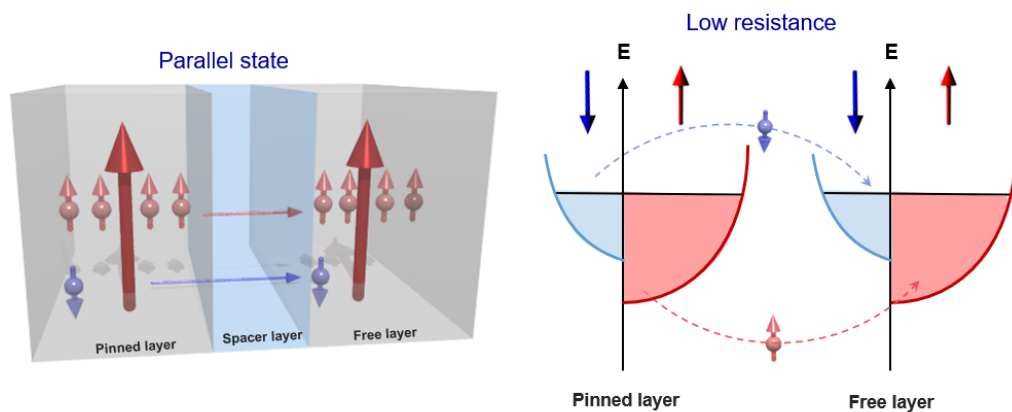
ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กการทะลุผ่านหรือปรากฏการณ์ TMR มีค่าขึ้นอยู่กับ การทะลุผ่านของสปีน (spin-dependent tunneling) จากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างรอยต่อการทะลุผ่าน (magnetic tunnel junction, MTJ) ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยฟิล์มบางฉนวนไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อน โดยทั่วไปความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้าจะต้องมีขนาดประมาณ 2-3 เท่าของระยะห่างระหว่างอะตอม เพื่อให้กระแสสปีนสามารถทะลุผ่านจากชั้นฉนวนไฟฟ้าไปยังชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์อีกชั้นได้ ปรากฏการณ์ TMR ถูกค้นพบครั้งแรกโดย M. Julliere ในปี 1975 [22] ก่อนการค้นพบปรากฏการณ์ GMR ในปี 1988 จากการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง Fe/Ge/Co โดยพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าร้อยละ 14 ที่อุณหภูมิ 4.2 เคลวิน อย่างไรก็ตามในขณะนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่อุณหภูมิต่ำยังคงไม่ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากข้อจำกัดและความยุ่งยากสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ จนกระทั่งการค้นพบปรากฏการณ์ GMR โดย P. Grunberg และคณะ [23] และ A. Fert และคณะ [24] ในปี 1988 ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ทำให้การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างแพร่หลายอีกครั้ง เพื่อนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาประสิทธิภาพการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการทำงานของหน่วยความจำ MRAM

การศึกษาการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR สำหรับการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งด้านทฤษฎีและการทดลอง โดยในปี 1995 การศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในเชิงการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง ของโครงสร้าง $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ [105] และ $\text{CoFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}$ [106] มีค่าเท่ากับร้อยละ 18 และ 11.8 ตามลำดับ ซึ่งในเวลาต่อมาผลการทดลองของ D. Wang และคณะในปี 2004 โดยการประยุกต์ใช้วัสดุ Al_2O_3 เป็นชั้นคั่นกลางจะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงถึงร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิห้อง [34] อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้โครงสร้าง MTJ ที่ใช้วัสดุ Al_2O_3 เป็นชั้นคั่นกลางในหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องมีค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าร้อยละ 150 และมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของการทะลุผ่านที่ต่ำ [107]

จากการศึกษาการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้าง MTJ จากการประยุกต์ใช้วัสดุ Al_2O_3 ซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ในเวลาต่อมาการศึกษาเชิงทฤษฎี [35], [36] แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุฉนวนไฟฟ้า MgO ที่มีโครงสร้างแบบผลึก (crystalline) เป็นชั้นคั่นกลางจะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR มากกว่าร้อยละ 1000 โดยในปี 2004 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในเชิงการทดลอง [37] ของโครงสร้าง $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าสูงถึงร้อยละ 220 ที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ TMR อย่างกว้างขวางจากการประยุกต์ใช้ชั้นฉนวนไฟฟ้า MgO กับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน เช่น $\text{FePt}/\text{MgO}/\text{Fe}$ [38] $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{CoFe}$ [39] $\text{Co}/\text{MgO}/\text{Co}$ [40] และ $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ [41]–[43] เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง MTJ สามารถทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงถึงร้อยละ 500 ที่อุณหภูมิห้อง โดยการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี 2008 กลุ่มวิจัยของ S. Ikeda และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ TMR ในโครงสร้าง $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ โดยพบว่าค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้าง MTJ ดังกล่าวมีค่าสูงถึงร้อยละ 604 ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจากผลการทดลองของงานวิจัยดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ TMR ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ มาใช้ในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล MRAM และหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน

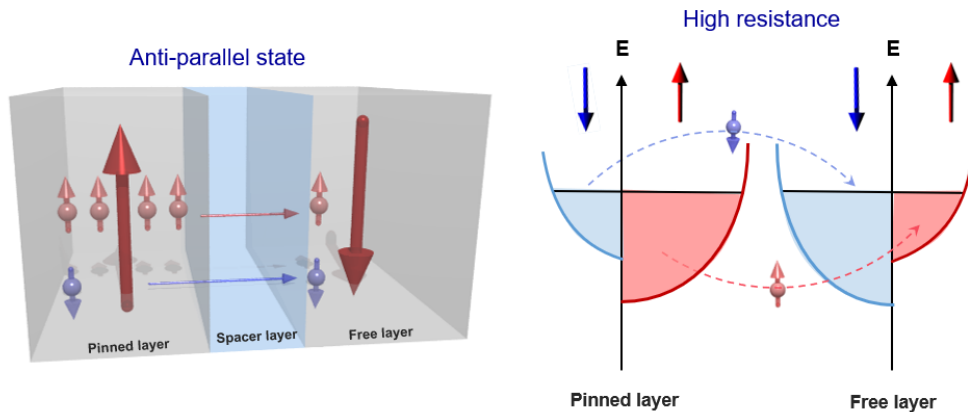
ปรากฏการณ์ TMR มีค่าขึ้นอยู่กับการทะลุผ่านของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว การเกิดปรากฏการณ์ TMR สามารถอธิบายได้จากการใช้แบบจำลองของจูเลียร์ (Julliere's model) โดยอาศัยสมมติฐานสองข้อคือ สปินของอิเล็กตรอนในกระบวนการทะลุผ่านจะไม่มี การสูญเสียของสปินหรือสปินจะถูกอนุรักษ์ตลอดระยะเวลาการทะลุผ่านและสปินขึ้นกับสปินลง

ภายในระบบมีค่าเป็นอิสระต่อกัน โดยทั่วไปการทะลุผ่านของกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเพอร์โร ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาการทะลุผ่านของกระแสสปินในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางขนานพบว่า สปินขึ้นหรือสปินส่วนมาก (majority spin) และสปินลงหรือสปินส่วนน้อย (minority spin) ภายในชั้นพินจะทะลุผ่านชั้นฉนวนไฟฟ้าและจัดเรียงตัวในสถานะเดียวกันภายในชั้นอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการทะลุผ่านของกระแสสปินที่สูง ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.22 (ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเพอร์โรจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม โดยการจัดเรียงโครงสร้างทางสถานะของสปินส่วนมากและสปินส่วนน้อยของชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้สปินส่วนมากภายในชั้นพินเกิดการทะลุผ่านไปยังชั้นอิสระและเกิดการจัดเรียงตัวในโครงสร้างทางสถานะของสปินส่วนน้อยภายในชั้นอิสระ ในขณะที่สปินส่วนน้อยภายในชั้นพินจะเกิดการทะลุผ่านและไปจัดเรียงตัวในโครงสร้างทางสถานะของสปินส่วนมากภายในชั้นอิสระ โดยในกรณีนี้จะทำให้เกิดการทะลุผ่านของกระแสสปินที่น้อย ซึ่งทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.22 (ข)



(ก)

พหุ ประถม โท ชีวะ



(ข)

ภาพประกอบ 2.22 การแสดงแผนผังการทะลุผ่านของกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นฉนวนไฟฟ้า (ก) ในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนาน และ (ข) แบบตรงกันข้าม [33]

การพิจารณากลไกการเกิดปรากฏการณ์ TMR จากการอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็นของการทะลุผ่านของสปินภายในโครงสร้าง MTJ ซึ่งแสดงถึงโอกาสในการทะลุผ่านชั้นฉนวนไฟฟ้าของกระแสสปินโพลาไรซ์ โดยโอกาสการทะลุผ่านของกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความสอดคล้องของโครงสร้างแถบพลังงาน (band matching) ระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งผลการศึกษาในเชิงทฤษฎี [35], [36] และการทดลอง [44] แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ชั้นฉนวนไฟฟ้า MgO ที่มีโครงสร้างแบบผลึกและมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนคั่นกลางระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ จะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงสุด เนื่องจากความสอดคล้องของโครงสร้างแถบพลังงานระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ และชั้นฉนวนไฟฟ้า MgO โดยในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนาน กระแสสปินจะมีโอกาสในการทะลุผ่านไปยังชั้นแม่เหล็กอิสระได้สูงและทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำสุด ในขณะที่การจัดเรียงของแมกนีไทเซชันแบบตรงกันข้าม จะทำให้กระแสสปินมีโอกาสในการทะลุผ่านที่น้อยและมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุด ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในทั้งสองกรณีทำให้โครงสร้าง MTJ ที่ประกอบด้วย $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}/\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ มีค่า ΔR หรือค่าอัตราส่วน MR ที่สูง ซึ่งส่งผลให้โครงสร้าง MTJ ดังกล่าวถูกประยุกต์ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเซลล์ MRAM ในปัจจุบัน

ปัจจุบันกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดปรากฏการณ์ TMR ในการแสดงสัญญาณการอ่านข้อมูลในรูปแบบของค่าไบนาเรียบิต เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR มีค่าอัตราส่วน MR ที่สูง ซึ่งทำให้มีความสามารถในการแสดงค่าความแตกต่างระหว่างค่า

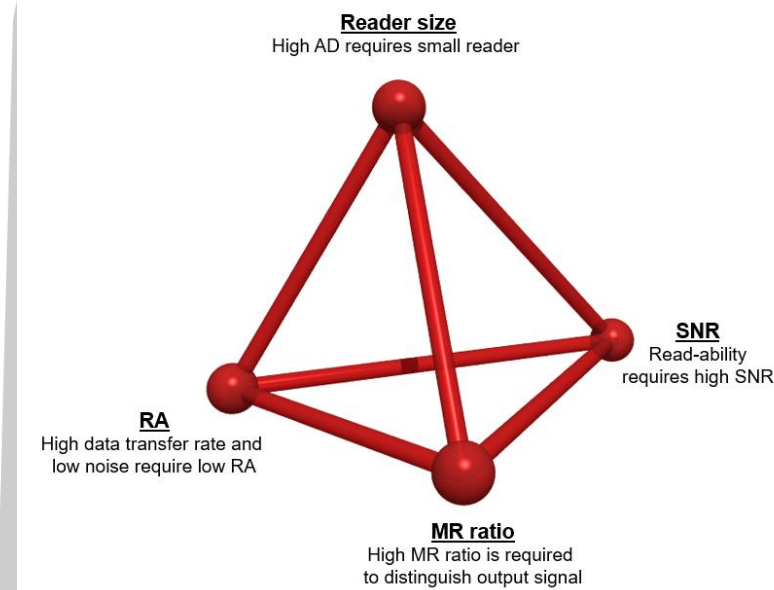
สัญญาณบิต 0 และ 1 อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีค่ามากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้วนำไปสู่ข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านจากการลดขนาดของหัวอ่านและหัวเขียนข้อมูลให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับบิตข้อมูล โดยรายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงจะถูกอธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3) หัวอ่านข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง

หัวอ่านข้อมูลเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากกระบวนการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับของการบันทึกข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล การลดขนาดพื้นที่ของบิตข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลให้มีค่าที่สูงขึ้นนำไปสู่การลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่เหมาะสมกับพื้นที่การบันทึกข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าประมาณ 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [45] การเพิ่มความจุข้อมูลให้มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการลดขนาดของบิตข้อมูลและเพิ่มค่าแอนไอโซโทโรปีของชั้นบันทึกข้อมูลให้มีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้แผ่นบันทึกข้อมูลมีเสถียรภาพทางความร้อนในการบันทึกข้อมูล การลดขนาดของเกรนการบันทึกข้อมูลและเพิ่มค่าแอนไอโซโทโรปีของวัสดุนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการเขียนข้อมูลด้วยเทคโนโลยีการใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการเขียนข้อมูล (HAMR) [45]–[47] และการใช้คลื่นไมโครเวฟเข้ามาช่วยในการเขียนข้อมูล (MAMR) [48]–[50] เนื่องจากหัวเขียนข้อมูลที่มีขนาดเล็กมีข้อจำกัดสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่ามากกว่า 2 เทสลา นอกจากการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล เทคโนโลยีการอ่านข้อมูลยังคงได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ที่มีค่า RA ที่สูงทำให้เกิดข้อจำกัดสำหรับการใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [53]

ประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วน MR ค่า RA และค่า SNR ของหัวอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.23 โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีจะต้องมีค่าอัตราส่วน MR และค่า SNR ที่สูงเพื่อให้หัวอ่านข้อมูลมีความสามารถในการจำแนกการแสดงสัญญาณบิต 0 และ 1 และมีค่าสัญญาณรบกวนในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลที่ต่ำ นอกจากนี้หัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องมีค่า RA ที่ต่ำเพื่อให้หัวอ่านข้อมูลมีอัตราการใช้พลังงาน (power consumption) ที่ต่ำ มีอัตราการส่งผ่านข้อมูล (data transfer rate) ที่สูงและหลีกเลี่ยงผลของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนซึ่งเป็นผลจากการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือปรากฏการณ์ความร้อนของจูล (Joule heating) [53] การลดขนาดของหัวอ่าน

ข้อมูลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า RA และการลดลงของค่าอัตราส่วน MR และค่า SNR ซึ่งส่งผลให้หัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่น้อยลง ดังนั้นการศึกษาหัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงและมีขนาดเล็กจึงได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการทดลอง [53], [68], [69], [108] เพื่อศึกษาหัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว



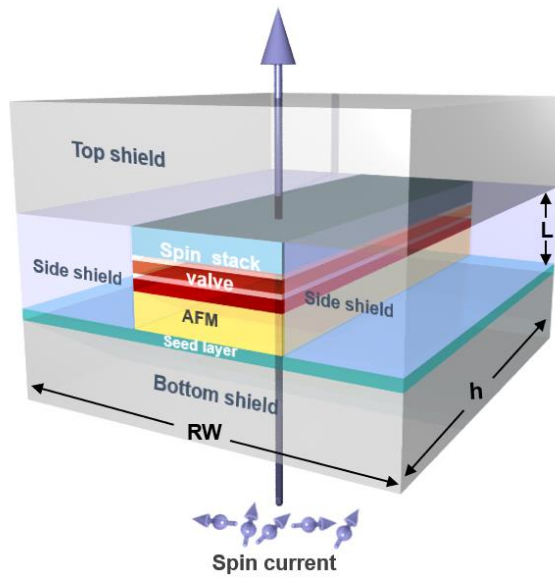
ภาพประกอบ 2.23 เงื่อนไขการออกแบบหัวอ่านข้อมูลเพื่อลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล (R) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของหัวอ่านข้อมูล (A_{head}) ดังแสดงในสมการที่ (2.8) โดยการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลจากการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะทำให้เกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 2.24

$$R \propto \frac{1}{A_{\text{head}}} = \frac{l}{(RW)(h)} \quad (2.8)$$

เมื่อ RW คือความกว้างของหัวอ่านข้อมูล มีหน่วยเป็นนาโนเมตร

h คือความยาวของหัวอ่านข้อมูล (stripe height) มีหน่วยเป็นนาโนเมตร



ภาพประกอบ 2.24 โครงสร้างสปินวาล์วที่ทำการป้อนกระแสสปินในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้าง

เพื่อที่จะรักษาค่าความต้านทานของหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าคงที่ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่จะมีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล ($RA \propto A$) [19] โดยพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลสามารถพิจารณาได้จาก

$$RA \propto (RW)(h) \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ได้พบว่า ความจุข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับขนาดของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

$$AD \propto \frac{1}{A_{\text{bit}}} \quad (2.10)$$

เมื่อ AD คือความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ได้

A_{bit} คือขนาดของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยทั่วไป A_{bit} จะมีค่าประมาณกับพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างสปินวาล์วที่ใช้ในการอ่านข้อมูล ซึ่ง $A_{\text{bit}} = RW \cdot L$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความจุข้อมูลและพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างสปินวาล์วที่ใช้ในการอ่านข้อมูล ดังแสดงในสมการที่ (2.11)

$$AD \propto \frac{1}{(RW)(L)} \quad (2.11)$$

เมื่อ L คือความหนาของสปินวาล์ว

จากนั้นเมื่อแทนค่า $RW \propto RA/h$ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลและค่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังแสดงในสมการที่ (2.12)

$$AD \propto \frac{1}{RA} \left(\frac{h}{L} \right) \quad (2.12)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.12) แสดงให้เห็นว่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าแปรผกผันกับความหนาของโครงสร้างสปินวาล์วและค่า RA ของหัวอ่านข้อมูล [19] ซึ่งการลดขนาดของบิตข้อมูล นำไปสู่การลดความหนาของชั้นฟิล์มภายในโครงสร้างสปินวาล์ว โดยขนาดของโครงสร้างของสปินวาล์วจะต้องมีความหนาน้อยกว่าขนาดของสองบิตข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้างเคียง [52] นอกจากนี้ยังพบว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีค่าความจุข้อมูลที่สูงจำเป็นต้องมีค่า RA ต่ำ เพื่อให้หัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี

ค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลเป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงอัตราการใช้พลังงานและความเร็วของการส่งผ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูล หัวอ่านข้อมูลที่มีค่า RA ที่สูงจะมีอัตราการใช้พลังงานที่มากขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลดังแสดงในสมการ

$$P = I^2 R \quad (2.13)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์

R คือความต้านทานภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล มีหน่วยเป็นโอห์ม

นอกจากค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการใช้พลังงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลยังส่งผลต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูล การลดขนาดของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า RA และลดอัตราการส่งผ่านข้อมูล เนื่องจากความกว้างของแบนด์วิดท์ (bandwidth) ที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของหัวอ่านข้อมูล โดยในกระบวนการอ่านข้อมูลค่าสัญญาณการอ่านย้อนกลับ (readback signal) ที่เกิดจากปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะถูกแสดงในรูปแบบคลื่นแรงดันไฟฟ้า โดยสัญญาณการอ่านข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งผ่านวงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter) เพื่อประมวลผลค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลและถอดรหัสสัญญาณของบิตข้อมูล [109] โดยวงจร

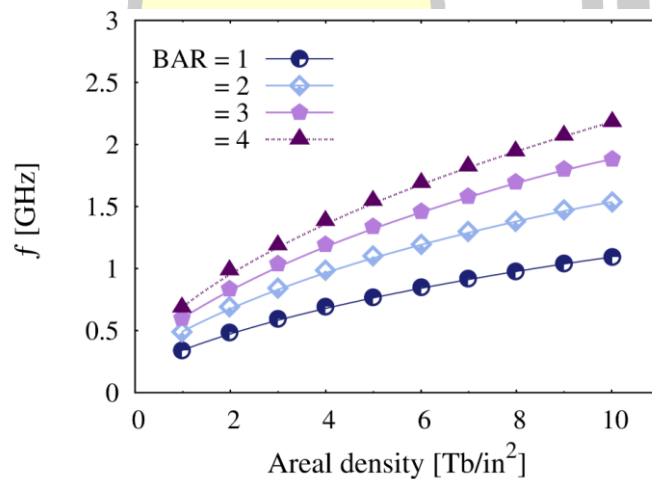
กรองผ่านต่ำจะถูกใช้เพื่อจำกัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกแถบความถี่ โดยความกว้างของแบนด์วิดท์ของวงจรกรองผ่านต่ำจะมีค่าเท่ากับความถี่โรลออฟ (roll-off frequency) ซึ่งมีค่าแปรผกผันกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลดังแสดงในสมการที่ (2.14) โดยในกรณีที่ค่าความต้านทานของหัวอ่านมีค่าสูงขึ้น ความกว้างของแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงทำให้อัตราการส่งผ่านข้อมูลมีค่าลดลง

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.14)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล มีหน่วยเป็นฟารัด (farad, F)

R คือค่าความต้านทานของหัวอ่านข้อมูล มีหน่วยเป็นโอห์ม

จากงานวิจัยของ G.C. Han และคณะ [52] ที่ทำการศึกษาผลของ BAR ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความกว้างของแตรีกซ์ข้อมูลและบิตข้อมูลที่ส่งผลต่ออัตราการส่งผ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขนาดแผ่นดิสก์เท่ากับ 2.5 นิ้วและหมุนด้วยความเร็ว 7500 รอบต่อนาที (revolutions per minute, rpm) พบว่าความถี่โรลออฟหรือความกว้างของแบนด์วิดท์จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าความจุข้อมูล [52] ในขณะที่ความกว้างของแบนด์วิดท์จะมีค่าแปรผกผันกับค่า BAR หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.25

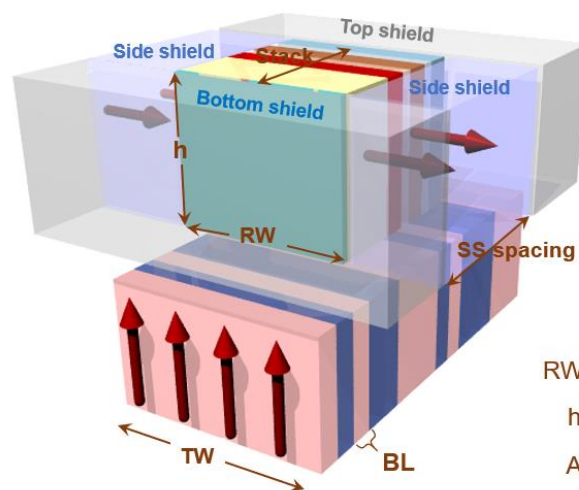


ภาพประกอบ 2.25 ความถี่โรลออฟที่เป็นฟังก์ชันของค่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ค่า BAR ต่างๆ [52]

ในลำดับถัดไปจะทำการยกตัวอย่างการคำนวณค่า RA ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลเท่ากับ 10 เทระบิตต่อตารางนิ้วและ BAR มีค่าเท่ากับ 4 โดยมีความถี่โรลออฟเท่ากับ 2.2 กิกะเฮิร์ต

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล โดยกำหนดให้ค่าความจุไฟฟ้าให้ มีค่าเท่ากับ 0.5 พิโกฟารัด [52], [110] พบว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลมีค่า เท่ากับ 145 โอห์ม โดยการออกแบบหัวอ่านให้มีเสถียรภาพทางความร้อนพบว่า ความกว้างของ หัวอ่านข้อมูลต้องมีค่าเท่ากับ 0.7 เท่าของความกว้างของแทร็คข้อมูลและมีความสูงเท่ากับ 1.1 เท่าของ ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.26 (ก) [111] จะพบว่าค่า RA ของหัวอ่าน ข้อมูลจะมีค่าประมาณ 20 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ซึ่งผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าหัวอ่านข้อมูล แบบ TMR มีค่า RA ที่สูงกว่า 20 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตรอย่างมาก เนื่องจากความต้านทานทาง ไฟฟ้าภายในชั้นฉนวนไฟฟ้าส่งผลให้ค่า RA ของหัวอ่านข้อมูล TMR มีค่าสูง ดังนั้นหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR จึงไม่มีความเหมาะสมสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูล 10 เทระบิตต่อตารางนิ้ว

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่า RA ของหัวอ่านที่ความถี่โรลออฟมีค่าเท่ากับ 2.2 กิกะเฮิร์ตพบว่า ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ซึ่งมีค่าประมาณ 50 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ดังนั้นเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการออกแบบหัวอ่านข้อมูล จำเป็นต้องเพิ่มค่า RA ของหัวอ่านข้อมูล โดยการลดค่าความกว้างแบนด์วิธให้ มีค่าเท่ากับ 1 กิกะเฮิร์ต ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 318 โอห์ม และค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเท่ากับ 44 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.26 (ข) ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน ข้อมูลแบบ CPP-GMR มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

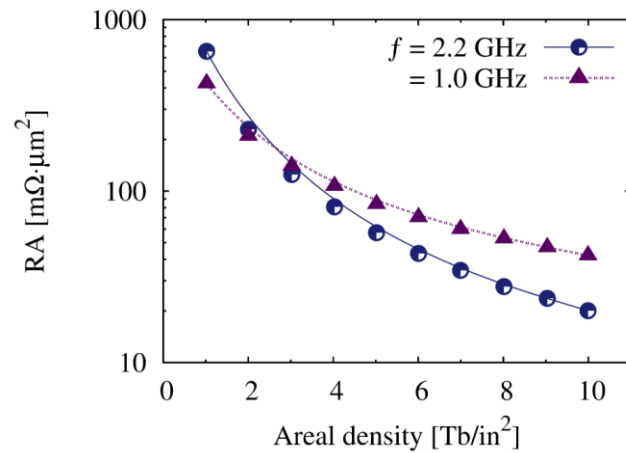


$$RW = 0.7(TW)$$

$$h = 1.1(RW)$$

$$A = 138 \text{ nm}^2$$

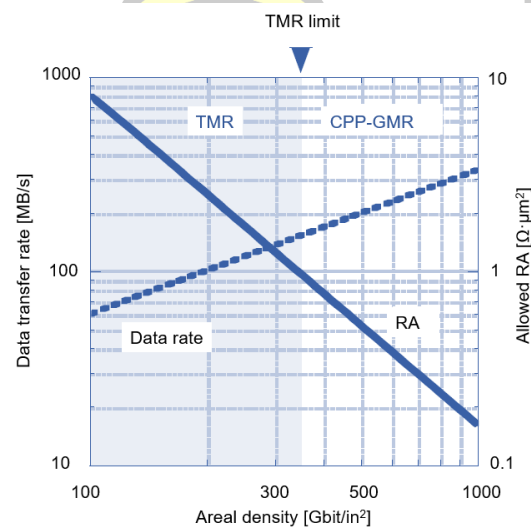
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2.26 การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของหัวอ่านข้อมูล และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลกับความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ความถี่โรลของเฟเท่ากับ 2.2 และ 1.0 กิโลเฮิร์ต [52]

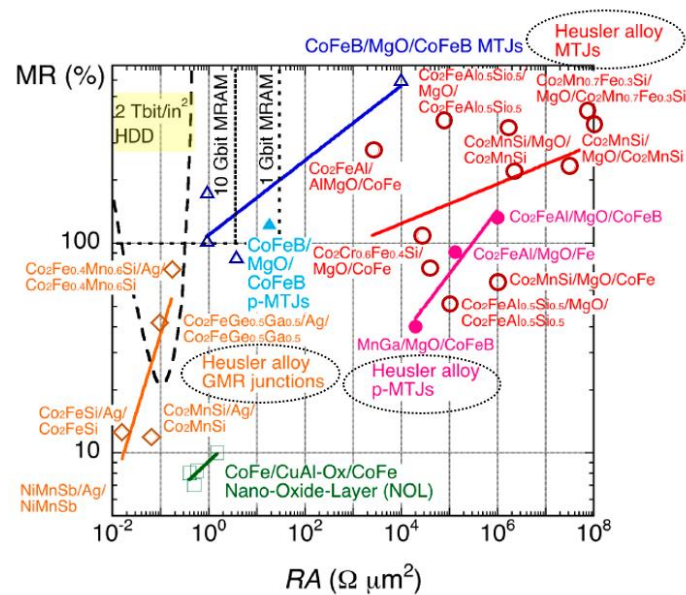
นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาอัตราการส่งผ่านข้อมูลและค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลในเชิงทฤษฎีโดย K. Nagasaka [51] แสดงให้เห็นว่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีค่าแปรผกผันกับค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.27 โดยกรณีที่ต้องการให้ความจุข้อมูลมีค่ามากกว่า 500 กิกะบิตต่อตารางนิ้ว (Gbit/in²) และมีอัตราการส่งผ่านข้อมูล 200 เมกะบิตต่อวินาที (MB/s) หัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่า RA ที่น้อยกว่า 500 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตรซึ่งเกินขีดความสามารถของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ในปัจจุบันที่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร



ภาพประกอบ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านข้อมูล ค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลและความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [51]

จากข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูล TMR ข้างต้นเราสามารถทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัตราการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งจำเป็นต้องลดค่า RA ของหัวอ่านข้อมูล โดยทำการเพิ่มความยาวของหัวอ่านข้อมูล (stripe height) เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้าและรักษาค่าความต้านทานของหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าคงที่เมื่อความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง [112] เพื่อไม่ให้เกิดการลดลงของค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลและค่า SNR นอกจากนี้การเพิ่มความยาวของหัวอ่านข้อมูลยังทำให้เกิดการลดลงของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันจากผลของความร้อน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานก็ตกกันภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามการเพิ่มความยาวของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดปัญหาของผลของค่าแอนไอโซโทรปีรูปร่าง (shape anisotropy) ซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ซึ่งโดยปกติจะมีทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงในขณะที่ยังไม่มีการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในกระบวนการอ่านข้อมูลมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนความยาวของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดความไม่สมมาตรของสัญญาณการอ่านข้อมูลของบิต 0 และ 1 [112]

การเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีย่านค่ามากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้วนำไปสู่ข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR มีค่า RA ที่สูง โดยปัจจุบันหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ที่ใช้วัสดุ CoFeB/MgO/CoFeB มีค่า RA ต่ำสุดประมาณ 1000 มิลลิโอมิตารางไมโครเมตร เนื่องจากคุณสมบัติการต้านทานทางไฟฟ้าของชั้นฉนวนไฟฟ้าที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ในขณะที่หัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้วจำเป็นต้องมีค่าอัตราส่วน MR ที่อย่างน้อยร้อยละ 20 และมีค่า RA 100 มิลลิโอมิตารางไมโครเมตร [53] ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.28 ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านแบบ CPP-GMR ที่มีค่า RA ภายในโครงสร้างข้อมูลที่น้อยกว่า 100 มิลลิโอมิตารางไมโครเมตร จึงได้รับการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลและประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลสูงในอนาคต

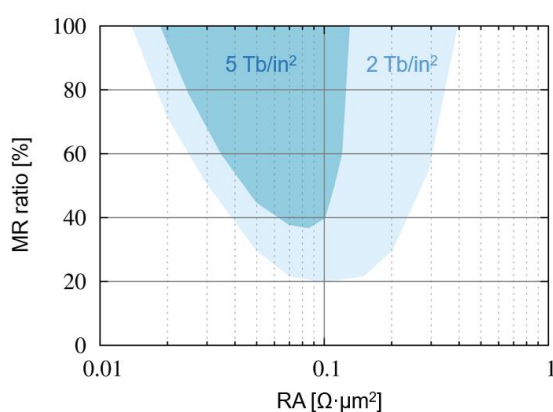


ภาพประกอบ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR และ GMR [53]

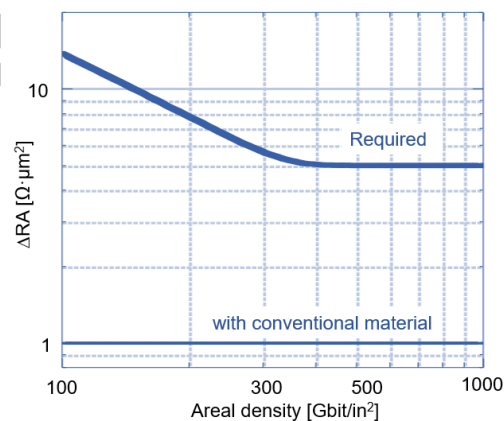
นอกจากนี้ผลการคำนวณของ M. Takagishi และคณะ [19] ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องลดค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูล 2 และ 5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว หัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจะต้องมีค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าอย่างน้อยร้อยละ 20 และ 37 และมีค่า RA ไม่เกิน 100 และ 85 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.29 (ก) เพื่อออกแบบให้หัวอ่านข้อมูลมีความสามารถในการจำแนกและแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลที่ดี มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลที่สูงและมีอัตราของการใช้พลังงานที่ต่ำ

ถึงแม้ว่าหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR จะมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง เนื่องจากมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรธรรมดา (conventional ferromagnet) เป็นโครงสร้างสปีนวาล์วยังคงมีค่า ΔRA หรือค่าอัตราส่วน MR ที่ต่ำสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว ดังแสดงในภาพประกอบ 2.29 (ข) โดยในโครงสร้างหัวอ่านแบบ CPP-GMR ค่า ΔRA ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรธรรมดามีค่าประมาณ 1 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ในขณะที่การศึกษาในเชิงทฤษฎีของ K. Nagasaka [51] ชี้ให้เห็นว่าหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้วจำเป็นต้องมีค่า ΔRA อย่างน้อยประมาณ 5 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร เนื่องจาก

หัวอ่านข้อมูลที่มีค่า ΔRA ที่สูงจะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR หรือความสามารถในการแสดงความแตกต่างระหว่างสัญญาณบิต 0 และ 1 และค่า SNR ที่สูง



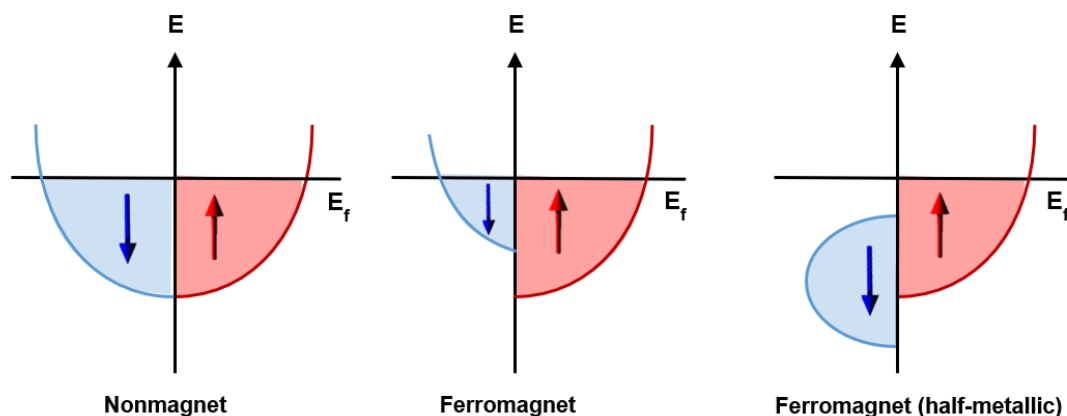
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2.29 (ก) ค่า RA และอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 และ 5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [19] (ข) ค่า ΔRA ของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรธรรมดาและความต้องการค่า ΔRA ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [51]

การศึกษาการเพิ่มค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน ซึ่งจากผลการศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีตามแบบจำลองของ Valet และ Fert [54] แสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต [54]–[56] โดยการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อจะมีค่าขึ้นอยู่กับความสอดคล้องของโครงสร้างแถบพลังงานระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ในขณะที่การกระเจิงของสปินภายในวัสดุจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสปินโพลาไรเซชัน (spin polarisation) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของโครงสร้างแถบพลังงานของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ของวัสดุ ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.30 โดยวัสดุนอนแมกเนตจะมีค่าสปินโพลาไรเซชันเท่ากับศูนย์ และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบกึ่งโลหะ (half-metallic) จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง เนื่องจากแถบพลังงานของสปินส่วนมากและสปินส่วนน้อยมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบโลหะและสารกึ่งตัวนำตามลำดับ



$$\text{Spin polarisation} = \frac{\text{DOS}_{\uparrow} - \text{DOS}_{\downarrow}}{\text{DOS}_{\uparrow} + \text{DOS}_{\downarrow}}$$

ภาพประกอบ 2.30 การจัดเรียงตัวของโครงสร้างแถบพลังงานของสปินส่วนมากและสปินส่วนน้อยที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุอนแมกเนต แม่เหล็กเฟอร์โร และแม่เหล็กเฟอร์โรแบบกึ่งโลหะ (ฮอยเลอร์อัลลอยด์)

ความต้องการเพิ่มการกระเจิงของสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กนำไปสู่การศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ เช่น การศึกษาชนิดของวัสดุอนแมกเนตและแม่เหล็กเฟอร์โรที่ทำให้เกิดการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อ [72], [108], [113] การศึกษาการกระเจิงของสปินภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจากการศึกษาชนิดของวัสดุต่างๆ ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร [57]–[59] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสม [60]–[63] และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสมแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ [64]–[71] เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาปรากฏการณ์ CPP-GMR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ที่มีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูงที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงภายในชั้นวัสดุและการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล การพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลนำไปสู่การศึกษาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสมแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ชนิดต่างๆ ที่ทำให้หัวอ่านข้อมูลมีค่า RA ที่ต่ำและมีค่าอัตราส่วน MR ที่เพิ่มสูงขึ้น ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.1 ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหาข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR และพัฒนาประสิทธิภาพการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคต

ตารางที่ 2.1 การศึกษาค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ในเชิงการทดลอง

โครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก	RA [$m\Omega \cdot \mu m^2$]	ค่าอัตราส่วน MR [%]	อุณหภูมิ [เคลวิน]	อ้างอิง
Co ₂ FeAl _{0.5} Si _{0.5} /Ag/Co ₂ FeAl _{0.5} Si _{0.5} [2010]	14 15	80 34	14 290	[70]
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} /Ag/ Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} [2011]	47 55	129.1 41.7	10 300	[114]
CoFe/Co ₂ FeAl _{0.5} Si _{0.5} /Ag/ Co ₂ FeAl _{0.5} Si _{0.5} /CoFe [2011]	19.5	24.6	290	[113]
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} /Ag/ Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} [2013]	48	45.8	300	[115]
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} /Ag/ Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} [2013]	33	57	300	[69]
Co ₂ FeSi/Ag/Co ₂ FeSi [2013]	42 48	20 60	5 300	[73]
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} /NiAl/Ag/NiAl/ Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5} [2016]	70 120	82 285	300 10	[108]
Co ₂ Fe _{0.4} Mn _{0.6} Si/Ag ₃ Mg/Co ₂ Fe _{0.4} Mn _{0.6} Si [2017]	40	63	300	[67]
[Co ₂ Fe(Al _{0.5} Si _{0.5})/Ag] ₆ [2018]	55	43	300	[65]

ปัจจุบันการศึกษาคูณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงกำลังได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการทดลองดังรายละเอียดในตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ตามการศึกษাপรากฎการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ในเชิงการทดลองยังคงมีความยุ่งยากและความซับซ้อนในการปลูกผลึก การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุและการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากของการศึกษাপรากฎการณ์ CPP-GMR ในเชิงการทดลองดังกล่าว จึงได้มีการศึกษাপรากฎการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีจาก

การศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ [10], [74], [76], [116] โดยการอาศัยการใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินสำหรับการศึกษาคูสมบัติการส่งผ่านสปินและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดที่มีเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลมากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว เพื่อให้มีความเข้าใจพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินที่ใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยมีรายละเอียดดังนี้

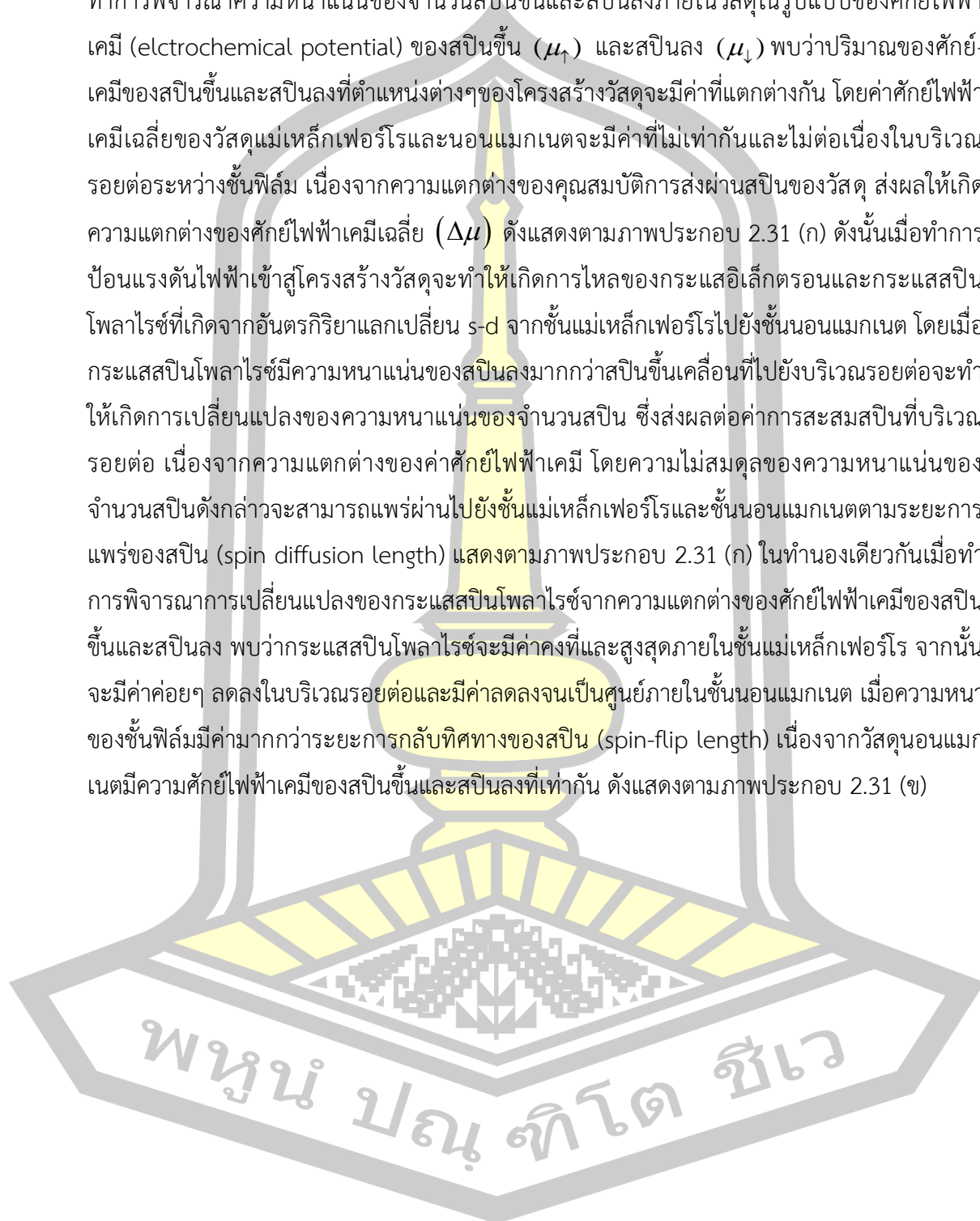
2.3 การส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

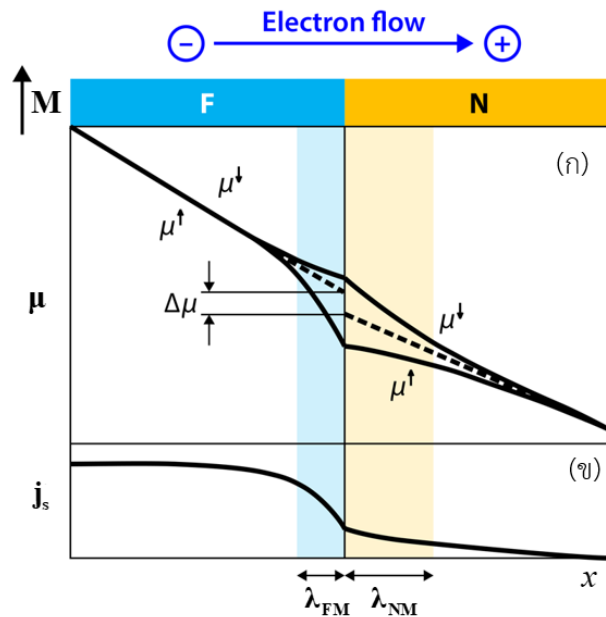
การทำงานของข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสำหรับการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล การศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในทางทฤษฎีสามารถอธิบายได้จากการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน (spin transport behavior) [10], [74], [76], [116] จากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุ การอธิบายพื้นฐานของการเกิดพฤติกรรมการส่งผ่านสปินอาศัยการใช้ทฤษฎีสองกระแสของ Mott ในการศึกษาการสะสมสปิน (spin accumulation) และกระแสสปิน (spin current) ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจากการพิจารณาสภาพนำไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลงของวัสดุที่เป็นอิสระต่อกัน

2.3.1 สมการดิฟ-ดิฟฟิวชัน (drift-diffusion equation)

การสะสมสปินเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่สำคัญสำหรับการอธิบายการส่งผ่านกระแสสปินโพลาไรซ์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจากการเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ การสะสมสปินถูกศึกษาครั้งแรกในเชิงทฤษฎีในปี 1976 โดย A.G. Aronov [117] สำหรับการอธิบายการป้อนกระแสสปินผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ประกบติดกับวัสดุอนแมกเนต ซึ่งในเวลาต่อ M. Johnson และ R.H. Silsbee [118] แสดงให้เห็นว่าการเกิดการสะสมสปินในโครงสร้างแม่เหล็กเฟอร์โรและอนแมกเนตในการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ โดยการป้อนกระแสสปินผ่านโครงสร้างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจะทำให้เกิดการแพร่ความไม่สมดุล (nonequilibrium) ของสปินไปยังชั้นอนแมกเนตที่อยู่ติดกัน จนกระทั่งในปี 2001 F.J. Jadema และคณะ [119] ได้ทำการวัดการสะสมสปินที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาโครงสร้างสปินวาล์วแบบแลตเทอโรล (lateral spin valve) ที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ Py/Cu/Py ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาการสะสมสปินเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง [120]–[124]

การอธิบายการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุอาศัยทฤษฎีสองกระแสของ Mott โดยเมื่อทำการพิจารณาความหนาแน่นของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงภายในวัสดุในรูปแบบของศักย์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential) ของสปินขึ้น (μ_{\uparrow}) และสปินลง (μ_{\downarrow}) พบว่าปริมาณของศักย์เคมีของสปินขึ้นและสปินลงที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างวัสดุจะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีเฉลี่ยของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตจะมีค่าที่ไม่เท่ากันและไม่ต่อเนื่องในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีเฉลี่ย ($\Delta\mu$) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.31 (ก) ดังนั้นเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างวัสดุจะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนและกระแสสปินโพลาริซที่เกิดจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d จากชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรไปยังชั้นนอนแมกเนต โดยเมื่อกระแสสปินโพลาริซมีความหนาแน่นของสปินลงมากกว่าสปินขึ้นเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอยต่อจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของจำนวนสปิน ซึ่งส่งผลต่อค่าการสะสมสปินที่บริเวณรอยต่อ เนื่องจากความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าเคมี โดยความไม่สมดุลของความหนาแน่นของจำนวนสปินดังกล่าวจะสามารถแพร่ผ่านไปยังชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนตตามระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) แสดงตามภาพประกอบ 2.31 (ก) ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสสปินโพลาริซจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีของสปินขึ้นและสปินลง พบว่ากระแสสปินโพลาริซจะมีค่าคงที่และสูงสุดภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร จากนั้นจะมีค่าค่อยๆ ลดลงในบริเวณรอยต่อและมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ภายในชั้นนอนแมกเนต เมื่อความหนาแน่นของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการกลับทิศทางของสปิน (spin-flip length) เนื่องจากวัสดุนอนแมกเนตมีความศักย์ไฟฟ้าเคมีของสปินขึ้นและสปินลงที่เท่ากัน ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.31 (ข)





ภาพประกอบ 2.31 การป้อนกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ประกบติดกับชั้นนอนแมกเนต (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีของสปินขึ้นและสปินลงต่อตำแหน่ง ซึ่งทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีเฉลี่ย (เส้นประ) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม (ข) การเปลี่ยนแปลงของกระแสสปินที่พิจารณาจากความต่างระหว่าง μ_{\uparrow} และ μ_{\downarrow} โดยพื้นที่สีฟ้าอ่อนและสีเหลืองแสดงระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตตามลำดับ [125]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีและการสะสมสปินสามารถพิจารณาผ่านทางค่าศักย์เคมี (chemical potential) ของวัสดุ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีมีค่าแปรผันตรงกับค่าศักย์เคมี ซึ่งถูกนิยามจากค่าพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอิเล็กตรอนหนึ่งตัวเข้าสู่ระบบและการอธิบายค่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน [126] เมื่อกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงจากสถานะสมดุลของวัสดุ โดยค่าศักย์เคมีจะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินต่อความหนาแน่นทางสถานะที่ระดับพลังงานเฟอร์มีดังแสดงในสมการที่ (2.15) โดยการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของสปินขึ้นและสปินลงส่วนเกินจากสถานะสมดุลจะมีค่าเท่ากับค่าการสะสมสปิน

$$\mu_{ch} = \frac{n - n_{eq}}{N(E_F)} = \frac{m}{N(E_F)} \quad (2.15)$$

เมื่อ μ_{ch} คือศักย์เคมี มีหน่วยเป็นจูล

$N(E_F)$ คือความหนาแน่นทางสถานะที่ระดับพลังงานเฟอร์มี

m คือค่าการสะสมสปีน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $m = n - n_{eq} = (n^\uparrow - n_{eq}^\uparrow) - (n^\downarrow - n_{eq}^\downarrow)$ โดย n_{eq} คือจำนวนสปีนที่สภาวะสมดุลและ $n^{\uparrow(\downarrow)}$ คือความหนาแน่นของสปีนขึ้น (ลง) ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุ

ในขณะที่ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ศักย์ไฟฟ้าเคมีของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับศักย์เคมีและพลังงานศักย์ซึ่งเกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุดังแสดงในสมการที่ (2.16)

$$\mu = \mu_{ch} - eV \quad (2.16)$$

เมื่อ e คือประจุของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

V คือศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (2.15) และ (2.16) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเคมีและการสะสมสปีนของวัสดุ โดยพบว่าค่าการสะสมสปีนมีค่าแปรผันตรงกับความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าเคมีของสปีนขึ้นและสปีนลง

$$\bar{m} \propto \bar{\mu} = \mu^\uparrow - \mu^\downarrow \quad (2.17)$$

ดังนั้นการศึกษการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนต่อตำแหน่งจึงสามารถถูกใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของศักย์เคมีจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุได้

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.16) เมื่อทำการป้อนกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเคมีเชิงตำแหน่ง เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนและแรงดันไฟฟ้าภายในโครงสร้างวัสดุต่อตำแหน่ง โดยการเปลี่ยนแปลงเชิงตำแหน่งของศักย์ไฟฟ้าเคมีจะมีค่าเท่ากับ

$$\nabla \bar{\mu} = \frac{\nabla \bar{n}}{N(E_F)} - e\bar{E} \quad (2.18)$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

\bar{E} คือสนามไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\bar{E} = \nabla V$

จากสมการที่ (2.18) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของศักย์เคมีสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อตำแหน่ง (∇n) และผลของสนามไฟฟ้า (\bar{E}) โดยในสมการที่ (2.18) สามารถเขียนในการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเคมีต่อตำแหน่งในรูปแบบของความ

หนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากการใช้ความสัมพันธ์ $\vec{j} = (-\sigma/e)\nabla\bar{\mu}$ และการใช้ความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์ (Einstein relation) สำหรับการอธิบายสภาพการนำไฟฟ้าและการแพร่ของวัสดุ $\sigma = e^2 N(E_F) D$ [127], [128] ดังนั้นจะได้สมการสำหรับการอธิบายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวนำในกระบวนการป้อนกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กดังแสดงในสมการที่ (2.19)

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} - De\nabla\bar{n} \quad (2.19)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (โอห์ม·เมตร)⁻¹ ($\Omega \cdot m$)⁻¹

D คือค่าคงที่การแพร่ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s)

สมการอธิบายความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.19) ถูกเรียกว่าสมการดิฟ-ดิฟฟิวชัน (drift-diffusion equation) ซึ่งใช้ในการอธิบายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวนำจากสองส่วนคือผลของสนามไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อตำแหน่ง โดยผลของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อน (drift current density) ในขณะที่ความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสการแพร่ (diffusion current)

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวนำผ่านโครงสร้างวัสดุจะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามความสัมพันธ์ของสมการดิฟ-ดิฟฟิวชันดังแสดงในสมการที่ (2.19) อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและสปิน โดยสปินเป็นคุณสมบัติภายในที่อธิบายการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือความหนาแน่นของกระแสประจุ (charge current density, \vec{j}_c) และความหนาแน่นของกระแสสปิน (spin current density, \vec{j}_m) โดยความหนาแน่นของกระแสประจุสามารถพิจารณาจากผลรวมของจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุโดยไม่คำนึงถึงทิศทางสปินของอิเล็กตรอน ($\vec{j}_c = j_{\uparrow} + j_{\downarrow}$) ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสสปินจะถูกพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นและสปินลง ($\vec{j}_m = j_{\uparrow} - j_{\downarrow}$)

การพิจารณาความหนาแน่นของกระแสประจุและความหนาแน่นของกระแสสปินอาศัยการพิจารณาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากสมการดิฟ-ดิฟฟิวชันสำหรับการอธิบายความหนาแน่นของกระแสสปินขึ้นและสปินลง [127], [128] ดังแสดงในสมการที่ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับ

$$\vec{j}_\uparrow = \sigma_\uparrow \vec{E} - D_\uparrow e \nabla n_\uparrow \quad (2.20)$$

$$\vec{j}_\downarrow = \sigma_\downarrow \vec{E} - D_\downarrow e \nabla n_\downarrow \quad (2.21)$$

เมื่อ $\sigma_{\uparrow(\downarrow)}$ คือสภาพนำไฟฟ้าของสปีนขึ้น(ลง) มีหน่วยเป็น (โอห์ม-เมตร)⁻¹

$D_{\uparrow(\downarrow)}$ คือค่าคงที่การแพร่ของสปีนขึ้น(ลง) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

$\nabla n_{\uparrow(\downarrow)}$ คือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่มีสปีนขึ้น (ลง) ต่อตำแหน่ง มีหน่วยเป็นหนึ่งต่อเมตรกำลังสี่ (1/m⁴)

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.20) และ (2.21) สามารถพิจารณาค่ากระแสสปีนจากผลต่างของความหนาแน่นกระแสสปีนขึ้นและสปีนลง

$$\vec{j}_m = \vec{j}_\uparrow - \vec{j}_\downarrow = (\sigma_\uparrow - \sigma_\downarrow) \vec{E} - D_\uparrow e \nabla n_\uparrow + D_\downarrow e \nabla n_\downarrow \quad (2.22)$$

กำหนดให้ $n_\uparrow = \left(\frac{n_\uparrow + n_\downarrow}{2} \right) + \left(\frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{2} \right)$ และ $n_\downarrow = \left(\frac{n_\uparrow + n_\downarrow}{2} \right) - \left(\frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{2} \right)$ [91]

จะได้

$$\vec{j}_m = (\sigma_\uparrow - \sigma_\downarrow) \vec{E} - \frac{eD_\uparrow}{2} \nabla (n_\uparrow + n_\downarrow) - \frac{eD_\uparrow}{2} \nabla (n_\uparrow - n_\downarrow) + \frac{eD_\downarrow}{2} \nabla (n_\uparrow + n_\downarrow) - \frac{eD_\downarrow}{2} \nabla (n_\uparrow - n_\downarrow)$$

$$\vec{j}_m = (\sigma_\uparrow - \sigma_\downarrow) \vec{E} - \frac{e(D_\uparrow - D_\downarrow)}{2} \nabla (n_\uparrow + n_\downarrow) - \frac{e(D_\uparrow + D_\downarrow)}{2} \nabla (n_\uparrow - n_\downarrow)$$

$$\vec{j}_m = \left(\frac{\sigma_\uparrow - \sigma_\downarrow}{\sigma_\uparrow + \sigma_\downarrow} \right) \sigma_\uparrow + \sigma_\downarrow \vec{E} - \frac{e}{2} \left(\frac{D_\uparrow - D_\downarrow}{D_\uparrow + D_\downarrow} \right) (D_\uparrow + D_\downarrow) \nabla (n_\uparrow + n_\downarrow) - \frac{e}{2} (D_\uparrow + D_\downarrow) \nabla (n_\uparrow - n_\downarrow)$$

ดังนั้น

$$\vec{j}_m = \beta \sigma \vec{E} - \beta' \frac{eD_0}{2} \nabla \bar{n} + \frac{eD_0}{2} \nabla \bar{m} \quad (2.23)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $\sigma = \sigma_\uparrow + \sigma_\downarrow$

β คือค่าสปีนโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้า (spin polarisation parameter for the

conductivity) มีค่าเท่ากับ $\beta = \frac{\sigma_\uparrow - \sigma_\downarrow}{\sigma_\uparrow + \sigma_\downarrow}$

β' คือค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (the spin polarisation parameter for the diffusion constant) มีค่าเท่ากับ $\beta' = \frac{D_{\uparrow} - D_{\downarrow}}{D_{\uparrow} + D_{\downarrow}}$

D_0 คือค่าคงที่การแพร่ $D_0 = D_{\uparrow} + D_{\downarrow}$

\bar{n} คือการสะสมประจุ (charge accumulation) มีค่าเท่ากับ $\bar{n} = n_{\uparrow} + n_{\downarrow}$

\bar{m} คือการสะสมสปิน มีค่าเท่ากับ $\bar{m} = n_{\uparrow} - n_{\downarrow}$

จากการพิจารณาความหนาแน่นกระแสสปินในสมการที่ (2.23) โดยการอาศัยความสัมพันธ์ของสมการดิฟ-ดิฟฟิวชันสำหรับการพิจารณาความหนาแน่นของกระแสสปินขึ้นและสปินลง แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสสปินมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อนที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสการแพร่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของการสะสมประจุและการสะสมสปินตามลำดับ โดยจากสมการดิฟ-ดิฟฟิวชันข้างต้นเป็นการอธิบายการสะสมสปินและกระแสสปินไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งในกรณีที่ต้องการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินต่อเวลาสามารถพิจารณาได้จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equations) สำหรับการอธิบายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นและสปินลงที่รวมผลของการกระเจิงของการกลับทิศทางของสปิน [91] ดังแสดงในสมการที่ (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ

$$e \frac{\partial n_{\uparrow}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_{\uparrow} = -e \frac{n_{\uparrow}}{\tau_{\uparrow\downarrow}} + e \frac{n_{\downarrow}}{\tau_{\downarrow\uparrow}} \quad (2.24)$$

$$e \frac{\partial n_{\downarrow}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_{\downarrow} = -e \frac{n_{\downarrow}}{\tau_{\downarrow\uparrow}} + e \frac{n_{\uparrow}}{\tau_{\uparrow\downarrow}} \quad (2.25)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.24) และ (2.25) พบว่าการเคลื่อนที่ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นและสปินลงมีค่าขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสสปินขึ้นและสปินลงต่อตำแหน่ง โดยอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นและสปินลงจะมีการกระเจิงและปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อจัดเรียงตัวในสถานะสมดุลของวัสดุ จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินจากผลต่างของสมการที่ (2.24) และ (2.25) จากการใช้สมมติฐานที่ว่า $\tau_{\downarrow\uparrow} = \tau_{\uparrow\downarrow}$ จะได้

$$\frac{\partial \bar{m}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{j}_m}{\partial x} = -\frac{\bar{m}}{\tau_{sf}} \quad (2.26)$$

เมื่อ τ_{sf} คือระยะเวลาการกลับทิศทางของสปินมีค่าเท่ากับ $\tau_{sf}^{-1} = \tau_{\uparrow\downarrow}^{-1} + \tau_{\downarrow\uparrow}^{-1}$

ความสัมพันธ์ในสมการ (2.26) แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของการสะสมสปิน การเปลี่ยนแปลงของกระแสสปินต่อตำแหน่งและการกระเจิงของสปินซึ่งทำให้การสะสมสปินมีค่าลดลงและแนวโน้มการกลับทิศทางเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของวัสดุ ดังนั้นเพื่อที่จะพิจารณาการสะสมสปินและกระแสสปินสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายแบบจำลองการสะสมสปิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.2 แบบจำลองการสะสมสปิน

กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์พอาศัยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลและอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการป้อนแรงดันไบอัสเข้าสู่โครงสร้างสปินวาล์วเพื่อแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนของความต่างระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ในเชิงทฤษฎีการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน จากการพิจารณาการสะสมสปินและกระแสสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายแบบจำลองการสะสมสปินเพื่อใช้ในการอธิบายค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสปินวาล์ว

การสะสมสปินเป็นปริมาณเชิงฟิสิกส์ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็ก การศึกษาการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กถูกเสนอขึ้นโดย Zhang Lavy และ Fert (ZLF) [129]–[131] สำหรับการพิจารณาอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุและแมกนีไทเซชัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านแรงบิดสปินหรือสปินทอร์คจากกระแสสปินโพลาไรซ์กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุผ่านทางอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน $s-d$ ซึ่งส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุเกิดการปรับเปลี่ยนทิศทาง โดยทั่วไปแบบจำลองการสะสมสปินอาศัยพื้นฐานสมการดิฟ-ดิฟิวชันสำหรับการอธิบายการหมุนวนของการสะสมสปินรอบแมกนีไทเซชัน โดยสมการการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินตามแบบจำลองของ ZLF [129]–[131] มีค่าดังแสดงในสมการ

$$\frac{d\vec{m}}{dt} + (J/\hbar)\vec{m} \times \hat{M} = -\frac{\vec{m}}{\tau_{sf}} \quad (2.27)$$

เมื่อ \vec{m} คือการสะสมสปิน

\hat{M} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชัน

J คือค่าคงที่ของพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของอิเล็กตรอนและแมกนีไทเซชัน มีหน่วยเป็นจูล

\hbar คือค่าคงที่ลดรูปของพลังค์ (reduced Planck constant) มีหน่วยเป็นจูล-วินาที

τ_{sf} คือระยะเวลาการคลายตัวของสปินของอิเล็กตรอนตัวนำ (spin-flip relaxation time) มีหน่วยเป็นวินาที

จากการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินในสมการที่ (2.27) แสดงให้เห็นการสะสมสปินมีค่าขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างการสะสมสปินและแมกนีไทเซชัน ซึ่งการสะสมสปินจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการคลายตัวของสปินของอิเล็กตรอนตัวนำ อย่างไรก็ตามการพิจารณาการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินในสมการที่ (2.27) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินในโครงสร้างวัสดุสองชั้นเท่านั้น เนื่องจากค่าการสะสมสปินจะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาที่มีค่ามากกว่าระยะเวลาการคลายตัวของสปินและไม่สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นภายในวัสดุชั้นต่อไปได้

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการปรับแต่งแบบจำลองข้างต้น โดยการสะสมสปินจะถูกนิยามจากความแตกต่างของค่าสะสมสปินกับค่าสะสมสปินที่สภาวะสมดุล (spin accumulation at equilibrium, \vec{m}_0) ของวัสดุ จากการพิจารณาความต่างของความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี [76] ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินในโครงสร้างวัสดุแบบหลายชั้นได้ นอกจากนี้ยังมีการปรับแต่งรูปแบบสมการการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินโดยเพิ่มผลของการเคลื่อนที่แบบหมุนงูเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเสนอการพิจารณาผลของสปินดีเฟสซิง (spin dephasing) [132]–[134] ในรูปแบบของ $(J/\hbar) \frac{l_L}{l_\perp} \hat{M} \times (\vec{m} \times \hat{M})$ โดย l_L คือระยะการหมุนวนของสปินแบบลามอร์ (Lamor spin precession length) และ l_\perp คือระยะสปินโคฮีเรนซ์ (spin coherence length) [134] โดยทั่วไประยะสปินโคฮีเรนซ์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของสปิน ส่งผลให้แบบจำลองดิฟ-ดิฟฟิวชันส่วนมากไม่พิจารณาผลของสปินดีเฟสซิง โดยทำการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้กระแสสปินตั้งฉาก (transverse spin current) จะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือถูกดูดซึม (absorbed) ในบริเวณรอยต่อ อย่างไรก็ตามเทอมของสปินดีเฟสซิงยังเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งแสดงถึงอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างการหมุนวนของสปินและการกระเจิงจากการมีสิ่งเจือปน (impurity scattering) ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการอธิบายการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉาก (transvers spin accumulation) ที่เกิดขึ้นในพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน ซึ่งการไม่พิจารณาผลของ

สปินดีเฟสจึงอาจทำให้ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ในพฤติกรรมการส่งผ่านสปินได้อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิจารณาการกระเจิงของสปินภายในบริเวณรอยต่อของการแพร่ ซึ่งคาดว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติการส่งผ่านสปิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพิจารณาผลของสปินดีเฟสซึ่งในบริเวณรอยต่อ โดยการปรับแต่งสมการการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินที่คิดผลของการเคลื่อนที่แบบหน่วงตามขวาง (transvers damping term) และการพิจารณาค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลมีค่าไม่เท่ากับศูนย์มีค่าดังนี้

$$\frac{d\bar{m}}{dt} + (J/\hbar)\bar{m} \times \hat{M} + (J/\hbar)\frac{\ell_{\perp}}{\ell_{\parallel}}\hat{M} \times (\bar{m} \times \hat{M}) = -\frac{\bar{m} - \bar{m}_{\infty}}{\tau_{sf}} \quad (2.28)$$

เมื่อ \bar{m}_{∞} คือการสะสมสปินที่สภาวะสมดุล มีค่าเท่ากับ $\bar{m}_{\infty} = (n_{eq}^{\uparrow} - n_{eq}^{\downarrow})\hat{M}$ มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3) และมีทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ

การนิยามการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินในสมการที่ (2.28) แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่แบบหน่วงของการสะสมสปินเข้าสู่ค่าสมดุลของวัสดุ (\bar{m}_{∞}) ดังแสดงในเทอมขวามือ โดยค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีและมีทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ

นอกจากนั้นเมื่อทำการพิจารณากระแสแมกนีไทเซชัน (magnetization current) หรือกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุสามารถเขียนในเทอมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการสะสมสปินดังสมการ

$$\vec{j}_m = \beta j_e \hat{M} - 2D_0 \left[\frac{\partial \bar{m}}{\partial x} - \beta \beta' \hat{M} \left(\hat{M} \cdot \frac{\partial \bar{m}}{\partial x} \right) \right] \quad (2.29)$$

เมื่อ j_e คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m^2)

x คือทิศทางของการป้อนกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลเฉลยของการสะสมสปินที่สภาวะสมดุล พบว่าการสะสมสปินประกอบไปด้วยสองส่วนคือองค์ประกอบที่ขนาน (longitudinal) กับแมกนีไทเซชันและองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน โดยการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับเวลาการกลับทิศทางของสปินซึ่งมีค่านี้น้อยกว่าระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชัน ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการพิจารณาแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินในงานวิจัยที่ [132] สำหรับการอธิบายองค์ประกอบของ

ค่าการสะสมสปินอาศัยการแทน $\frac{d\bar{m}}{dt}$ ในสมการที่ (2.28) ด้วย $\frac{\partial \bar{m}}{\partial t} + \frac{\partial j_m}{\partial x}$ จะได้

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{j}_m}{\partial x} - (J/\hbar) \vec{m} \times \hat{M} + (J/\hbar) \frac{\ell_L}{\ell_\perp} \hat{M} \times (\vec{m} \times \hat{M}) - \frac{\vec{m} - \vec{m}_\infty}{\tau_{sf}} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินได้ดังนี้

$$\frac{1}{2D_0} \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = \frac{\beta j_e}{2D_0} \frac{\partial \hat{M}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial x^2} - \beta \beta' \hat{M} \left(\hat{M} \cdot \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial x^2} \right) - \frac{\vec{m} \times \hat{M}}{\lambda_J^2} - \frac{\hat{M} \times (\vec{m} \times \hat{M})}{\lambda_\phi^2} - \frac{\vec{m} - \vec{m}_\infty}{\lambda_{sf}^2} \quad (2.31)$$

เมื่อ λ_J คือระยะการหมุนวนของสปิน (spin precession length) มีค่าเท่ากับ $\lambda_J = \sqrt{2\hbar D_0 / J}$
 λ_ϕ คือระยะสปินดีเฟสซิง มีค่าเท่ากับ $\lambda_\phi = \sqrt{2\hbar D_0 \ell_\perp / (J \ell_L)}$
 λ_{sf} คือระยะการกลับทิศทางของสปิน มีค่าเท่ากับ $\lambda_{sf} = \sqrt{2\hbar D_0 \tau_{sf}}$

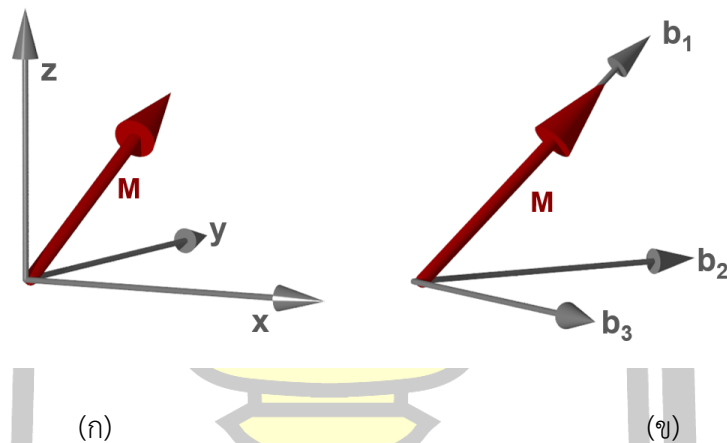
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กออกเป็นชั้นบางๆ เพื่อทำการพิจารณาแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุและกำหนดให้แมกนีไทเซชันมีความต่อเนื่องและมีค่าสม่ำเสมอ (uniform) ระหว่างชั้นฟิล์มบาง ส่งผลให้การพิจารณาเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งในเทอมแรกทางขวามือหรือที่ถูกรเรียกว่าซอร์สเทอม (source term) มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยในกรณีที่พิจารณาผลของซอร์สเทอมสามารถถูกรวมกับการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณาความต่อเนื่องของกระแสสปินที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม [129]

โดยทั่วไปการศึกษาการสะสมสปินโดยใช้แบบจำลองของ ZLF [129]–[131] สามารถอธิบายได้เฉพาะในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในระนาบ -yz และ z ตามลำดับเท่านั้น ทำให้เกิดข้อจำกัดของการอธิบายการสะสมสปินในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางใดๆ ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวได้มีการเสนอการใช้เมตริกซ์การแปลง (transfer matrix approach) [132] เพื่อแปลงการจัดเรียงแมกนีไทเซชันในระบบพิกัดฉาก (global coordinate) ให้อยู่ในระบบพิกัดพื้นฐาน (basis coordinate) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.32 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.31) ค่าการสะสมสปินจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่ขนาน (\vec{m}_\parallel) และองค์ประกอบที่ตั้งฉาก (\vec{m}_\perp) จากการใช้เมตริกซ์การแปลงเพื่อหมุนระบบพิกัดของแมกนีไทเซชันให้อยู่ในระบบพิกัดพื้นฐานที่ประกอบไปด้วย \hat{b}_1 , \hat{b}_2 และ \hat{b}_3 โดยทิศทางของ \hat{b}_1 ใช้สำหรับการอธิบายองค์ประกอบของการสะสมสปินที่มีทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชัน ในขณะที่ทิศทาง \hat{b}_2 และ \hat{b}_3 ใช้ในการอธิบายองค์ประกอบของการสะสมสปินที่มีทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน ดังนั้นผลเฉลยของการสะสมสปินที่สภาวะสมดุล ($\partial \vec{m} / \partial t = 0$) ในองค์ประกอบขนานและตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \bar{m}_\parallel(x) &= \left[m_\parallel(\infty) + (m_\parallel(0) - m_\parallel(\infty))e^{-x/\lambda_{sd}} \right] \hat{b}_1 \\
 \bar{m}_{\perp,2}(x) &= 2e^{-k_1 x} \left[u \cos(k_2 x) - v \sin(k_2 x) \right] \hat{b}_2 \\
 \bar{m}_{\perp,3}(x) &= 2e^{-k_1 x} \left[u \sin(k_2 x) + v \cos(k_2 x) \right] \hat{b}_3
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

โดยกำหนดให้ $(k_1 \pm ik_2) = \sqrt{\lambda_{trans}^{-2} \pm i\lambda_j^{-2}}$

เมื่อ λ_{trans} คือระยะตามขวาง (transverse length) ซึ่งถูกนิยามจาก $\lambda_{trans}^{-2} = \lambda_\phi^{-2} + \lambda_{sf}^{-2}$ โดยระยะตามขวางเป็นการรวมการพิจารณาการเคลื่อนที่แบบห่วงจากเทอมบลอช-ไลค์ (Bloch-like term) ในแบบจำลองของ ZLF และการห่วงตามขวางที่ถูกเสนอขึ้นโดย C. Petitjean และคณะ [134] ในขณะที่การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ $m_\parallel(0)$ u และ v ในสมการที่ (2.32) อาศัยการคำนวณได้จากการใช้เงื่อนไขความต่อเนื่องของกระแสสปิน โดยค่า $m_\parallel(\infty) = |\bar{m}_\infty|$



ภาพประกอบ 2.32 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน (ก) ในระบบพิกัดฉากและ (ข) ในระบบพิกัดพื้นฐาน [77]

การพิจารณาองค์ประกอบของการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้างวัสดุจากการใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.3 การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

การแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่ำสุดและสูงสุดภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1

ตามลำดับ โดยทั่วไปการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีสามารถอธิบายได้จากการศึกษาพฤติกรรมกระแสที่ส่งผ่านสปิน ซึ่งถูกพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและกระแสสปินจากการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุ ดังนั้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมสปินและกระแสสปินจึงเป็นวิธีการที่นำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

การเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเคมีของวัสดุ $\vec{j} = (-\sigma/e)\nabla\bar{\mu}$ [126], [128] เมื่อความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างมีค่าแปรผันตรงกับกระแสสปินดังนั้นจะได้

$$\vec{j}_m = (-\sigma/e)\nabla\bar{\mu} \quad (2.33)$$

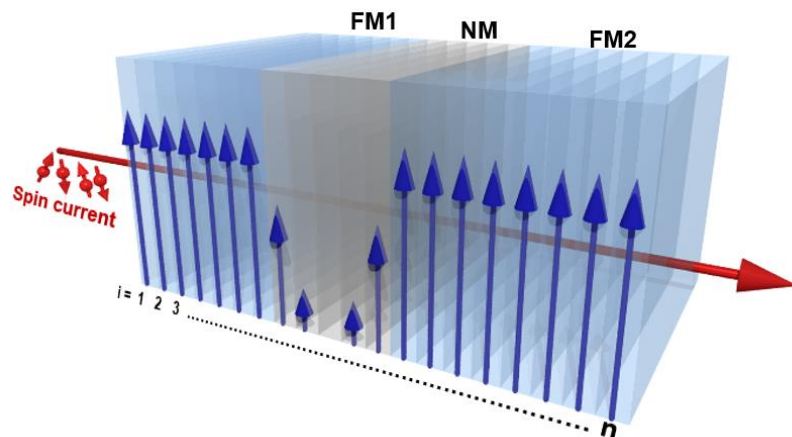
ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเคมีของวัสดุจะมีค่าแปรผันตรงกับกระแสสปินของวัสดุดังแสดงในความสัมพันธ์ $\bar{\mu} \propto \bar{\mu}_{ch} = \frac{\bar{n} - \bar{n}_{eq}}{N(E_F)} = \frac{\bar{m}}{N(E_F)}$ เมื่อแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการที่ (2.33) และทำการพิจารณาขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินจะได้

$$-\frac{1}{\sigma} = \frac{\nabla m}{j_m e N(E_F)} \quad (2.34)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.34) พบว่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของโครงสร้างวัสดุจะมีค่าแปรผันตรงกับอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินดังสมการ

$$\rho \propto \frac{\nabla m}{j_m}; \quad R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.35)$$

การพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กอาศัยการแบ่งโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กออกเป็นชั้นบางๆ เพื่อทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุดังแสดงตามภาพประกอบ 2.33



ภาพประกอบ 2.33 การแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นออกเป็นชั้นบางๆ เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินและกระแสสปิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุ

การคำนวณค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance area product, RA) ณ ตำแหน่งต่างๆ จากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งและขนาดของค่ากระแสสปิน [135], [136] ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2.35) โดยค่า RA ที่ตำแหน่ง i มีค่าเท่ากับ

$$RA_i = k \frac{|\Delta m|}{j_m} \quad (2.36)$$

เมื่อ $|\Delta m|$ คือขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่ง มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ $|\Delta m| = \sqrt{\Delta m_x^2 + \Delta m_y^2 + \Delta m_z^2}$

j_m คือขนาดของกระแสสปินมีค่าเท่ากับ $j_m = \sqrt{j_{m,x}^2 + j_{m,y}^2 + j_{m,z}^2}$ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร

โดยกำหนดให้ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ $k = \frac{V_{cell} \Delta E}{e^2}$ โดยที่ V_{cell} คือปริมาตรของชั้นบาง (thin layers) ที่ใช้ในการพิจารณาค่าการสะสมสปิน มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

$\Delta E = k_B T$ คืออุณหภูมิอิเล็กตรอนิกส์ (electronic temperature) เป็นค่าความกว้างของระดับพลังงานย่อยสำหรับการคำนวณค่าความหนาแน่นทางสถานะ (DOS) ของวัสดุด้วยวิธี *ab-initio* e คือประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างวัสดุสามารถพิจารณาได้จากการคำนวณค่า RA รวมจากผลรวมของค่า RA ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังสมการ

$$RA = \sum_{i=1}^n RA_i \quad (2.37)$$

เมื่อ n คือจำนวนชั้นบางทั้งหมดภายในโครงสร้าง การพิจารณาค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุสามารถคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่าน ข้อมูลได้จากความสัมพันธ์

$$MR \text{ ratio}[\%] = \frac{RA_{AP} - RA_p}{RA_p} \times 100\% \quad (2.38)$$

เมื่อ RA_{AP} คือค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

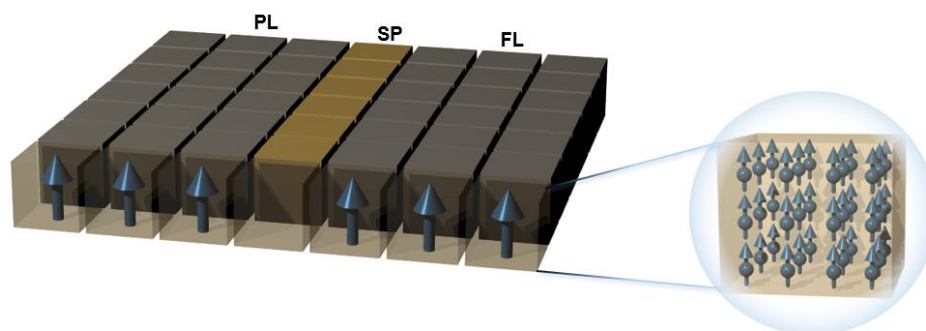
RA_p คือค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

นอกจากการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้างวัสดุ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุต่อเวลาอย่างคงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก เนื่องจากการส่งผ่านของสปินจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ การศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยแบบจำลองในระดับจุลภาคที่ใช้โดยทั่วไปไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กได้ เนื่องจากผลของรอยต่อภายในชั้นวัสดุทำให้เกิดข้อจำกัดและไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กได้อย่างครอบคลุม ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายแบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการศึกษาพลวัตของสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4 แบบจำลองในระดับอะตอม

โดยทั่วไปการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็กอาศัยการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคเพื่ออธิบายคุณสมบัติแม่เหล็กและนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล วิธีการศึกษาคุณสมบัติแม่เหล็กด้วย

แบบจำลองในระดับจุลภาคใช้การแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กออกเป็นเซลล์เล็กๆ หลายเซลล์ ซึ่งภายในเซลล์จะประกอบด้วยอะตอมหลายๆ อะตอมดังแสดงตามภาพประกอบ 2.34 จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในเซลล์และกำหนดให้ทั้งเซลล์มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน หลังจากนั้นอาศัยคุณสมบัติของแต่ละเซลล์สำหรับการพิจารณาและอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในปัจจุบันส่งผลให้อุปกรณ์การบันทึกข้อมูลถูกออกแบบให้มีขนาดที่เล็กลงและมีความจุข้อมูลที่มากขึ้น ซึ่งนำไปสู่ข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการศึกษาและอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในวัสดุแม่เหล็ก เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลถูกออกแบบให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโนเมตร



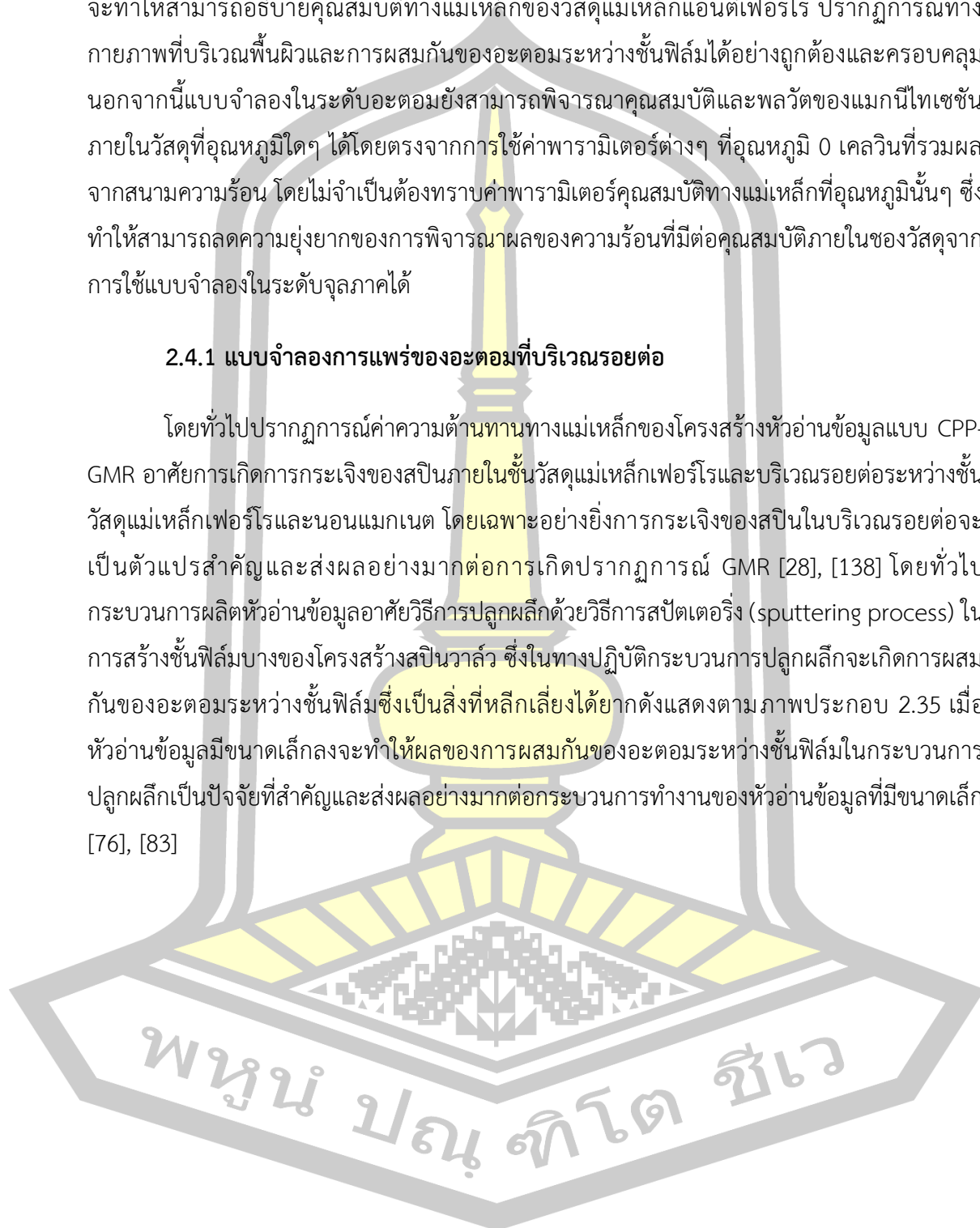
ภาพประกอบ 2.34 การแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเน็ตออกเป็นเซลล์ขนาดเล็กในแบบจำลองในระดับจุลภาค จากนั้นทำการคำนวณโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์จากการเฉลี่ยค่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในเซลล์

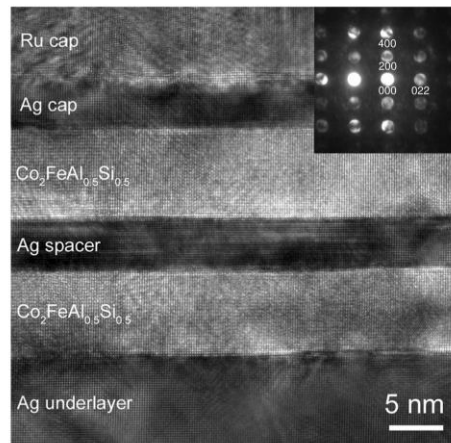
การออกแบบอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลให้มีขนาดที่เล็กลงทำให้เกิดข้อจำกัดของแบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการอธิบายคุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็ก เช่น การศึกษาแม่เหล็กเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่มีทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กภายในแลตทิซย่อย (sub-lattice) แบบตรงกันข้าม การศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กภายในบริเวณพื้นผิวและรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเป็นต้น นอกจากนี้แบบจำลองในระดับจุลภาคยังมีความยุ่งยากสำหรับการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เนื่องจากในกรณีที่ต้องการพิจารณาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ เพื่อนำมาเป็นค่าตัวแปรขาเข้าของแบบจำลอง จากข้อจำกัดของแบบจำลองในระดับจุลภาคจึงได้มีการนำเสนอแบบจำลองในระดับอะตอม [137] สำหรับการพิจารณาและอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยแบบจำลองในระดับอะตอมอาศัยการศึกษาพลวัตของสปินโมเมนต์แต่ละตัวภายในวัสดุ เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลง

ของแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติภายในวัสดุ ซึ่งการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสปินโมเมนต์แต่ละตัว จะทำให้สามารถอธิบายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ปรากฏการณ์ทางกายภาพที่บริเวณพื้นผิวและการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มได้อย่างถูกต้องและครอบคลุม นอกจากนี้แบบจำลองในระดับอะตอมยังสามารถพิจารณาคุณสมบัติและพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ ได้โดยตรงจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 0 เคลวินที่รวมผลจากสนามความร้อน โดยไม่จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ ซึ่งทำให้สามารถลดความยุ่งยากของการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติภายในของวัสดุจากการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคได้

2.4.1 แบบจำลองการแพร่ของอะตอมที่บริเวณรอยต่อ

โดยทั่วไปปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR อาศัยการเกิดการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อจะเป็นตัวแปรสำคัญและส่งผลอย่างมากต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR [28], [138] โดยทั่วไปกระบวนการผลิตหัวอ่านข้อมูลอาศัยวิธีการปลูกผลึกด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (sputtering process) ในการสร้างชั้นฟิล์มบางของโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งในทางปฏิบัติกระบวนการปลูกผลึกจะเกิดการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยากดังแสดงตามภาพประกอบ 2.35 เมื่อหัวอ่านข้อมูลมีขนาดเล็กลงจะทำให้ผลของการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มในกระบวนการปลูกผลึกเป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลอย่างมากต่อกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็ก [76], [83]





ภาพประกอบ 2.35 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ซึ่งแสดงถึงการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นวัสดุในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ Ag/Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Ag/Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Ag/Ru [113]

โดยทั่วไปแบบจำลองส่วนใหญ่ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุหัวอ่านข้อมูลอาศัยการจำลองโครงสร้างบริเวณรอยต่อแบบอุดมคติซึ่งไม่มีการแพร่ของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม ทำให้แบบจำลองดังกล่าวขาดความเสมือนจริงและไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางได้อย่างครอบคลุม ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความเสมือนจริงและให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องมากขึ้น การอาศัยแบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการพิจารณาการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มและการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่บริเวณรอยต่อจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

การพิจารณาการแพร่ของอะตอมในบริเวณรอยต่อของแบบจำลองในระดับอะตอมอาศัยการใช้สมการไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent) ดังแสดงในสมการที่ (2.39) สำหรับการศึกษาความน่าจะเป็นของการจัดเรียงอะตอมระหว่างชั้นวัสดุ

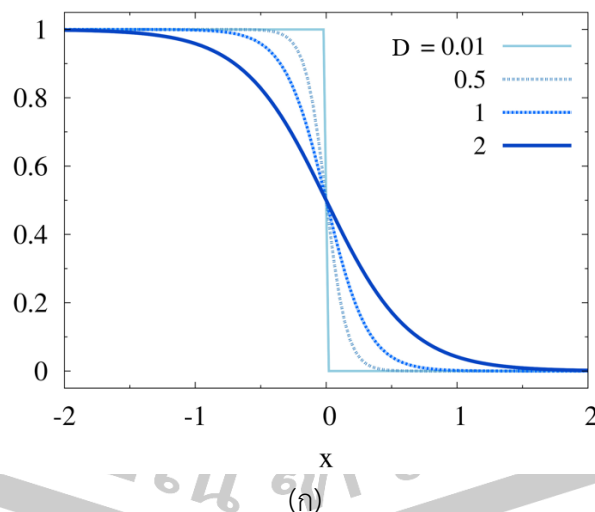
$$P = \frac{1}{2} \left[-\tanh\left(\frac{x-x_0}{D}\right) + 1 \right] \quad (2.39)$$

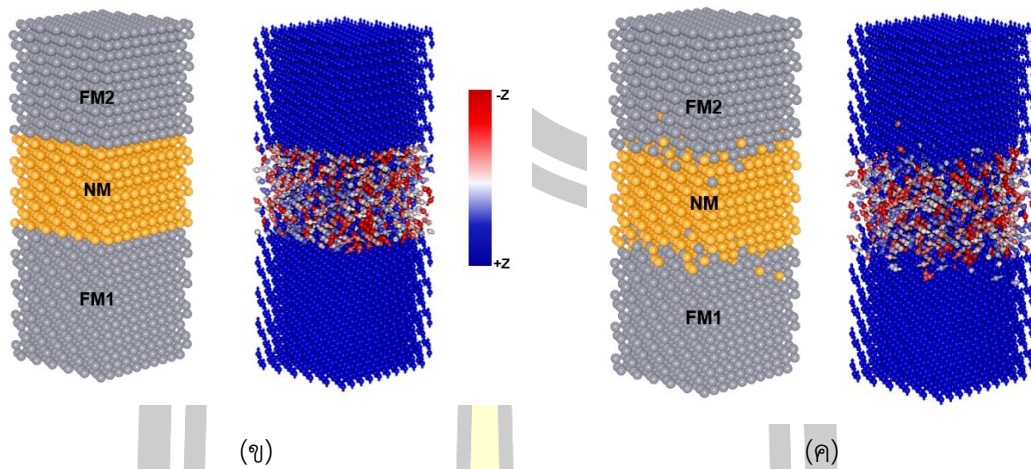
เมื่อ x คือตำแหน่งต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุ

x_0 คือตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณรอยต่อ

D คือค่าคงที่การแพร่ของอะตอม ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการแพร่ของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันในสมการที่ (2.39) โดยการพิจารณาผลของค่าคงที่การแพร่ที่มีต่อลักษณะความน่าจะเป็นการจัดเรียงอะตอมที่บริเวณรอยต่อพบว่า ความกว้างของการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าผันตรงกับค่าคงที่การแพร่ของอะตอม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.36 (ก) เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งกึ่งกลางบริเวณรอยต่อ $x=0$ จากนั้นเมื่อประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.39) เพื่อพิจารณาการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มในโครงสร้างวัสดุสามชั้นที่ประกอบด้วยชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเนต พบว่าวัสดุแม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณรอยต่อแบบอุดมคติเมื่อกำหนดให้ค่าคงที่การแพร่ของอะตอมมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือไม่ทำการพิจารณาผลของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ที่มีต่อการจัดเรียงตัวของอะตอม ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.36 (ข) ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการพิจารณาผลของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ โดยการกำหนดค่าคงที่การแพร่ของอะตอมให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง พบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มจะเกิดการผสมกันของอะตอม ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.36 (ค) เนื่องจากความน่าจะเป็นของการจัดเรียงตัวของอะตอมระหว่างชั้นวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ ดังนั้นการอาศัยแบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการพิจารณาการจัดเรียงตำแหน่งของอะตอมภายในโครงสร้างวัสดุ จึงทำให้สามารถพิจารณาผลของการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นวัสดุที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึก ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองมีความเสมือนจริงในการพิจารณาพฤติกรรม การส่งผ่านสปินและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น





ภาพประกอบ 2.36 (ก) การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่ค่า D ใดๆ เมื่อกำหนดให้ x_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ การเปรียบเทียบการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อในโครงสร้างแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุอนแมกเนต เมื่อกำหนดให้ D มีค่าเท่ากับ (ข) ศูนย์ และ (ค) หนึ่ง ตามลำดับ

จากการพิจารณาวิธีการคำนวณการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อ ในลำดับถัดไปจะทำการยกตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอะตอมภายในโครงสร้างวัสดุสามชั้น FM/NM/FM ดังนี้

1. กำหนดความหนาของชั้นฟิล์มที่ต้องการพิจารณา เช่น FM1(3nm)/NM (2nm)/FM2(3nm)
2. พิจารณาตำแหน่งของอะตอมโดยการใช้ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ร่วมกับการใช้ตัวเลขสุ่ม (random number) ที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนและมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง เพื่อคำนวณความน่าจะเป็นของการจัดเรียงอะตอม โดยความน่าจะเป็นของอะตอม FM2 บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น NM/FM2 มีค่าเท่ากับ

$$P_{FM_2} = \frac{1}{2} \left[-\tanh \left(\frac{x - (t_{FM_1} + t_{NM})}{D} \right) + 1 \right]$$

และความน่าจะเป็นของอะตอม NM บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น FM1/NM มีค่าเท่ากับ

$$P_{NM} = \frac{1}{2} \left[-\tanh \left(\frac{x - t_{FM_1}}{D} \right) + 1 \right]$$

3. การจัดเรียงตัวของอะตอมในแต่ละตำแหน่ง x y และ z โดยอาศัยการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นกับตัวเลขสุ่ม โดยเริ่มจากการคำนวณจากชั้น FM2 ชั้น NM และชั้น FM1 ตามลำดับ ในกรณีที่ตัวเลขสุ่มมีค่ามากกว่า P_{FM_2} จะแสดงอะตอมของวัสดุ FM2 และกรณีที่ตัวเลขสุ่มมีค่ามากกว่า P_{NM} จะแสดงอะตอมของวัสดุ NM ตามลำดับ

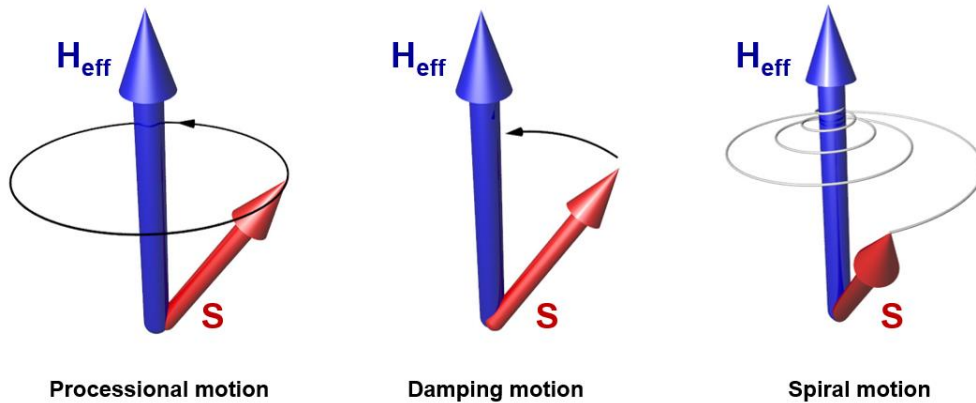
4. จากนั้นพิจารณาดำแหน่งของอะตอมที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น FM1/NM จะแสดงอะตอมของวัสดุ FM1

การประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างวัสดุทำให้สามารถแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลองในระดับจุลภาคที่ไม่สามารถอธิบายการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มได้อย่างครอบคลุม นอกจากนี้แบบจำลองในระดับจุลภาคยังคงมีความยุ่งยากสำหรับการอธิบายผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เนื่องจากการศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่อุณหภูมินั้นๆ เพื่อจะใช้เป็นตัวแปรขาเข้าของแบบจำลองเพื่อที่จะลดความยุ่งยากของแบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก การประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอม ซึ่งสามารถพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของสปินได้โดยตรงจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุที่อุณหภูมิ 0 เคลวินที่รวมผลจากสนามความร้อน จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขข้อจำกัดของการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจพลวัตของสปินภายในโครงสร้างวัสดุของแบบจำลองในระดับอะตอมที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติภายในของวัสดุและผลของปัจจัยภายนอก ได้แก่ ผลของความร้อน สนามแม่เหล็กภายนอกและการป้อนกระแสไฟฟ้า ในลำดับถัดไปจะพิจารณาอธิบายพื้นฐานสมการการเคลื่อนที่ของสปินและปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสปินภายในวัสดุ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.2 พลวัตของสปินและสมการ LLG

โดยทั่วไปการอธิบายการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุอาศัยการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์เชิงมุมที่เกิดจากแรงบิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อสปินของอิเล็กตรอนภายในชั้นวัสดุ ซึ่งถูกเสนอขึ้นโดย L.D. Landau และ E.M. Lifshitz ในปี 1935 [139] โดยสมการของ Landau-Lifshitz (LL) ถูกประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์แม่เหล็กเทียบกับเวลา ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเมนต์แม่เหล็กแบบหมุนวน (precessional motion) ที่มีลักษณะคล้ายกรวยรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ดังแสดงในภาพประกอบ 2.37 (ก) ในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำหรือที่สภาวะสมดุล โมเมนต์แม่เหล็กจะทำมุมคงที่กับค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลหรือมีการเคลื่อนที่หมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลด้วยวงรอบที่คงที่ เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบไม่มีการสูญเสียพลังงาน อย่างไรก็ตามนอกจากการเคลื่อนที่แบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล โมเมนต์

แม่เหล็กยังมีการเคลื่อนที่แบบหน่วงเข้าหา (damping motion) เข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ดังแสดงในภาพประกอบ 2.37 (ข) โดยแรงบิดที่มากระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็กจะทำให้เกิดการลดขนาดของมุมหรือวงรอบของโมเมนต์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่รอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล โดยแรงบิดดังกล่าวจะส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของประสิทธิผล



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบ 2.37 การเคลื่อนที่ของสปิน (ก) แบบหมุนวนรอบ (ข) แบบหน่วงและ (ค) แบบก้นหอย เข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผล เมื่อลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของสปินและลูกศรสีน้ำเงินแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล

จากการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่มีต่อการเคลื่อนที่ของโมเมนต์แม่เหล็ก โดยการใช้สมการ LL ในทำนองเดียวกันในกรณีที่ต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสปินในแบบจำลองในระดับอะตอมสามารถใช้การแทนค่าสปินลงในสมการ LL เพื่อสำหรับการศึกษาการเคลื่อนที่ของสปินที่ถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผลแทนการพิจารณาโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ ดังนั้นจะได้สมการอธิบายการเคลื่อนที่ของสปินในรูปแบบของสมการ LL ดังแสดงตามสมการ

$$\frac{\partial \hat{S}}{\partial t} = -\gamma \hat{S} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\alpha_{LL}}{\mu_s} \hat{S} \times (\hat{S} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.40)$$

เมื่อ γ คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio)

\hat{S} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปิน

\vec{H}_{eff} คือสนามแม่เหล็กประสิทธิผล

α_{LL} คือค่าคงที่ความหน่วงของ Landau-Lifshitz

μ_s คือขนาดของสปินโมเมนต์

เมื่อพิจารณาสมการการเปลี่ยนแปลงของสปินเทียบกับเวลาในสมการที่ (2.40) พบว่าสปินจะมีการเคลื่อนที่ในสองลักษณะคือการเคลื่อนที่แบบหมุนวนรอบสนามประสิทธิผลและการเคลื่อนที่แบบห้วงเข้าหาสนามประสิทธิผลดังแสดงในเทอมที่หนึ่งและเทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของสปินที่เกิดจากผลรวมของการเคลื่อนที่ของสปินแบบหมุนวนและแบบห้วงแสดงให้เห็นว่าสปินมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนแบบก้นหอยเข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.37 (ค)

รูปแบบสมการ LL เป็นรูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับการอธิบายผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่มีต่อพลวัตของสปินภายในวัสดุ โดยทั่วไปสมการ LL จะถูกใช้ในการอธิบายพลวัตของสปินภายในวัสดุที่มีค่าความหน่วงที่น้อย โดยจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองในกรณีที่ทำการศึกษาพลวัตของสปินภายในวัสดุที่มีค่าความหน่วงอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการศึกษาพลวัตของสปินในวัสดุที่มีค่าความหน่วงที่มีค่าสูง สมการ LL จะมีข้อจำกัดและไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของสปินได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวในเวลาต่อมา T. L. Gilbert [140] จึงได้นำเสนอสมการการเคลื่อนที่แบบห้วงของสปินในรูปแบบใหม่ที่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของสปินที่มีค่าความหน่วงตั้งแต่ 0 – 1 ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาการเคลื่อนที่แบบห้วงของ Gilbert ในสมการ LL จะได้สมการการเคลื่อนที่ของสปินในรูปแบบของสมการที่เรียกว่า Laudau-Lifshitz-Gilbert equation หรือสมการ LLG โดยเมื่อทำการจัดรูปแบบสมการ LLG ให้อยู่ในรูปแบบของสมการ LL จะได้

$$\frac{\partial \hat{S}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha_G^2)} \hat{S} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma\alpha_G}{(1+\alpha_G^2)} \hat{S} \times (\hat{S} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.41)$$

เมื่อ α_G คือค่าคงที่ความหน่วงของ Gilbert

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของสปินในสมการ LLG ดังแสดงในสมการที่ (2.41) โดยพบว่า การเคลื่อนที่ของสปินจะเกิดจากสองส่วนคือการเคลื่อนที่แบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลดังแสดงในเทอมที่หนึ่งและการเคลื่อนที่แบบห้วงเข้าหาสนามประสิทธิผลดังแสดงในเทอมที่สองตามลำดับ

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.41) จะมีความเหมาะสมสำหรับการอธิบายการเคลื่อนที่ของสปินที่มีค่าขึ้นอยู่กับผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลเท่านั้น ซึ่งในกรณีที่ต้องการศึกษาพลวัตของสปินภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องพิจารณาผลของสนามสปินทอร์คที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่าน โดยการพิจารณาสปินทอร์คจากการเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่าง

สะสมสปินและแมกนีไทเซชัน ซึ่งจะทำการอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.4 ดังนั้นสมการ LLG ที่รวมผลของสปินทอร์คซึ่งถูกพิจารณาจากพฤติกรรมการส่งผ่านสปินสามารถเขียนในรูปแบบของสมการดังนี้

$$\frac{\partial \hat{S}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha_G^2)} \hat{S} \times (\vec{H}_{eff} + J\vec{m}) - \frac{\gamma\alpha_G}{(1+\alpha_G^2)} \hat{S} \times (\hat{S} \times (\vec{H}_{eff} + J\vec{m})) \quad (2.42)$$

เมื่อ J คือปริพันธ์การแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชัน

\vec{m} คือค่าการสะสมสปิน

จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของสปินภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยการใช้พื้นฐานของสมการ LLG ดังแสดงในสมการที่ (2.42) แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงทิศทางของสปินและเปลี่ยนแปลงของสปินเทียบกับเวลาจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและสนามสปินทอร์คที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยรายละเอียดของการพิจารณาปรากฏการณ์ของสปินทอร์คจากการศึกษาการสะสมสปินถูกอธิบายในหัวข้อ 2.4.4 ในขณะที่ผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในของวัสดุและสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจพื้นฐานของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่มีต่อพลวัตของสปินภายในวัสดุ ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายและคำนวณค่าสนามประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.3 สนามแม่เหล็กประสิทธิผล

สนามแม่เหล็กประสิทธิผลเป็นสนามที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยสนามประสิทธิผลที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุสามารถเกิดได้จากหลายส่วนได้แก่ สนามปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน สนามแอนไอโซโทรปี สนามแม่เหล็กภายนอก สนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กหรือสนามคู่อั้วและสนามความร้อน โดยทั่วไปการพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสามารถพิจารณาได้จากค่าพลังงานอิสระรวมที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน พลังงานแอนไอโซโทรปี พลังงานภายนอก พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กและพลังงานความร้อน เพื่อให้มีความเข้าใจพื้นฐานทางฟิสิกส์ของค่าพลังงานแต่ละประเภทและเข้าใจการคำนวณค่าสนามสำหรับการประยุกต์ใช้ในแบบจำลองในระดับอะตอม ในลำดับต่อไปจะทำการอธิบายค่าพลังงานแต่ละประเภท โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน

พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนคือพลังงานที่แสดงถึงอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินภายในโครงสร้างวัสดุ โดยการพิจารณาพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนในโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กของแบบจำลองในระดับอะตอมอาศัยการศึกษาเฉพาะอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระยะสั้น (short-range exchange interaction) ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์โดยตรง (direct exchange) ระหว่างสปินที่อยู่ใกล้กันที่สุด โดยมีระยะห่างเท่ากับค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) โดยทั่วไปค่าพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนของแต่ละสปินสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของไฮเซนเบิร์ก ฮามิลโทเนียน (Heisenberg Hamiltonian) ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาค่าพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนของสปิน i และสปิน j ที่อยู่ข้างเคียงจะได้

$$E_{exc} = -\sum_{i \neq j} J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j \quad (2.43)$$

เมื่อ J_{ij} คือค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน i และสปิน j มีหน่วยเป็นจูลต่อลิงก์ (Joule/link)

\hat{S}_i คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปิน i ที่ต้องการพิจารณา

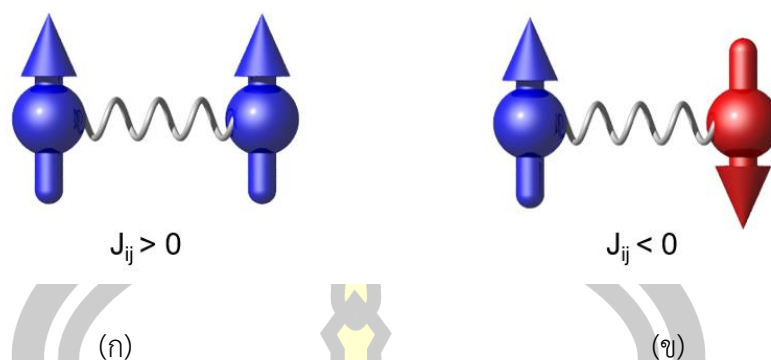
\hat{S}_j คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินของอะตอม j ที่อยู่ข้างเคียง

จากการพิจารณาสมการที่ (2.43) พบว่าค่าพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนและมุมระหว่างสปิน ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.43) สามารถอธิบายค่าพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนในรูปแบบของมุมระหว่างสปินได้ดังนี้

$$E_{exc} = -\sum_{i \neq j} J_{ij} |\hat{S}_i| |\hat{S}_j| \cos \theta \quad (2.44)$$

เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปิน i และสปิน j

โดยทั่วไปสปินภายในวัสดุจะพยายามจัดเรียงตัวให้อยู่ในสถานะที่มีค่าพลังงานที่ต่ำที่สุด ดังนั้นจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.44) แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนสามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงทิศทางระหว่างสปิน โดยค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนจะมีค่าเป็นบวกเมื่อสปินทั้งสองตัวมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและจะมีค่าเป็นลบเมื่อสปินทั้งสองสปินมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.38 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2.38 อันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินโดย (ก) ในกรณีที่สปินมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันจะทำให้ค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นบวกและ (ข) ในกรณีที่สปินมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้ค่าคงที่ปริพันธ์การแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นลบ [92]

2) พลังงานแอนไอโซโทรปี

พลังงานแอนไอโซโทรปีคือปัจจัยภายในวัสดุที่เป็นตัวกำหนดลักษณะการตอบสนองของแมกนีไทเซชันต่อสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุสามารถเกิดได้จากหลายส่วนเช่น แอนไอโซโทปีผลึก (crystal anisotropy) แอนไอโซโทรปีรูปร่าง (shape anisotropy) แอนไอโซโทรปีความเค้นและความเครียด (stress and strain anisotropy) เป็นต้น การพิจารณาพลังงานแอนไอโซโทรปีในแบบจำลองในระดับอะตอมอาศัยการพิจารณาเฉพาะค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุ โดยกำหนดให้ค่าแอนไอโซโทรปีรูปร่างมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากรูปร่างของสปินที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ในขณะที่ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กภายนอกการจัดเรียงตัวของสปินภายในวัสดุจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางหนึ่งๆ ที่ถูกเรียกว่าทิศทางแกนง่าย (easy axis) ซึ่งเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสปินภายในวัสดุให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวออกจากแกนง่ายจำเป็นต้องป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีค่ามากพอที่สามารถเอาชนะค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุ

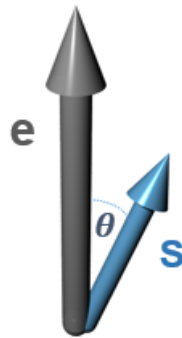
การพิจารณาพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกในแบบจำลองระดับอะตอมอาศัยการศึกษาพลังงานแอนไอโซโทรปีแกนเดียว (uniaxial anisotropy) โดยการพิจารณาอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินและแกนง่ายของวัสดุดังแสดงตามภาพประกอบ 2.39 ซึ่งค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กทั้งระบบในระดับอะตอมสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.45) โดยค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงของค่าคงที่แอนไอโซโทรปีซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุ

$$E_{ani} = -k_u \sum_{i=1}^n (\hat{S}_i \cdot \hat{e})^2 \quad (2.45)$$

เมื่อ k_u คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปี มีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3)

\hat{e} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกนง่าย

n คือจำนวนของสปินทั้งหมดภายในระบบ



ภาพประกอบ 2.39 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินและแกนง่ายของวัสดุ

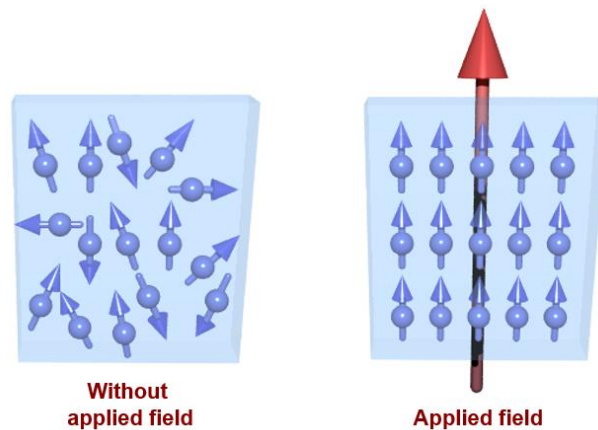
3) พลังงานภายนอก

โดยทั่วไปสปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีการจัดเรียงตัวตามกลุ่มของทิศทางแกนง่ายของวัสดุดังแสดงตามภาพประกอบ 2.40 (ก) ซึ่งทำให้ผลรวมของค่าแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินภายในวัสดุแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้สปินภายในวัสดุมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกดังแสดงตามภาพประกอบ 2.40 (ข) การอธิบายพลังงานนอกจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อสปินมีค่าดังแสดงในสมการ

$$E_{app} = -\mu_s \sum_{i=1}^n \hat{S}_i \cdot \hat{H}_{app} \quad (2.46)$$

เมื่อ μ_s คือขนาดของสปินโมเมนต์ มีหน่วยเป็นจูลต่อเทสลา (J/T)

\hat{H}_{app} คือเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็นเทสลา



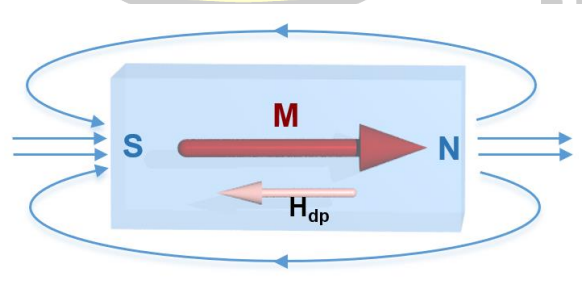
(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 2.40 การจัดเรียงตัวของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในขณะที่ (ก) ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก

4) พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก

พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กเป็นพลังงานภายในที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุภาพประกอบ 2.41 ซึ่งส่งผลของสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กจะทำให้ค่าแมกนีไทเซชันรวมของวัสดุมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 2.41 สนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในแท่งแม่เหล็ก โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน ลูกศรสีส้มแสดงทิศทางของสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในวัสดุและลูกศรสีฟ้าแสดงทิศทางของสนามสแตย์ที่เกิดขึ้นภายนอกแท่งแม่เหล็ก [92]

โดยทั่วไปการคำนวณค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กของโมเมนต์แม่เหล็กภายในโครงสร้างวัสดุจะพิจารณาจากผลของโมเมนต์แม่เหล็กทุกๆ ตัวภายในโครงสร้างวัสดุที่กระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็กที่ถูกพิจารณาและค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวมันเอง ในกรณีที่ทำการศึกษาพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กในแบบจำลองระดับอะตอมหรือภายใน

สปีนที่มีรูปร่างทรงกลม การพิจารณาพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวเองจะไม่ถูกนำมาคำนวณ เนื่องจากวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่เกิดจากรูปร่างของวัสดุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการศึกษาพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในแบบจำลองในระดับอะตอมจะทำการพิจารณาเฉพาะผลจากโมเมนต์แม่เหล็กตัวอื่นๆ ภายในวัสดุที่ส่งผลต่อโมเมนต์แม่เหล็กที่ต้องการพิจารณา

การศึกษาค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กในแบบจำลองระดับอะตอมอาศัยการพิจารณาอันตรกิริยาระยะไกล (long-range interaction) ที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์แม่เหล็กทุกๆ ตัวภายในโครงสร้างวัสดุที่กระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็กที่ต้องการพิจารณา ซึ่งการศึกษาด้วยวิธีการดังกล่าวส่งผลให้แบบจำลองในระดับอะตอมใช้เวลาในการคำนวณค่าสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ค่อนข้างนาน เพื่อลดระยะเวลาการคำนวณค่าสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก แบบจำลองในระดับอะตอมจะอาศัยวิธีการคำนวณในระดับจุลภาคเข้ามาช่วยในการศึกษา โดยใช้วิธีการแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกเป็นเซลล์เล็กๆ และหาค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยภายในเซลล์เพื่อทำการคำนวณค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในวัสดุ

พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กที่พิจารณาจากโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่ตำแหน่ง i จากโมเมนต์แม่เหล็กทั้งหมดในระบบมีค่าดังนี้

$$E_{dip,i} = -\sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\bar{\mu}_i \cdot \hat{r}_{ij})(\bar{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij}) - \bar{\mu}_i \cdot \bar{\mu}_j}{|\bar{r}_{ij}|^3} \right] \quad (2.47)$$

เมื่อ $\bar{\mu}_i$ คือโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่ตำแหน่ง i

$\bar{\mu}_j$ คือโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่ตำแหน่ง j

\hat{r}_{ij} และ $|\bar{r}_{ij}|$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยและระยะห่างระหว่างเซลล์ที่ตำแหน่ง i และ j ตามลำดับ

จากการพิจารณาค่าพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กสามารถพิจารณาสนามแม่เหล็กลดสภาพความเป็นแม่เหล็กได้จากการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กเทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กที่ตำแหน่ง i

$$\bar{H}_{dip,i} = -\frac{\partial E_{dip,i}}{\partial \bar{\mu}_i} = |\bar{\mu}_j| \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_j}{|\bar{r}_{ij}|^3} \right] \quad (2.48)$$

เมื่อ $|\bar{\mu}_j|$ คือขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ j

$\hat{\mu}_j$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ตำแหน่ง j

การอธิบายค่าสนามลตสภาพความเป็นแม่เหล็กในสมการที่ (2.48) แสดงในระบบ CGS อย่างไรก็ตาม การศึกษาค่าสนามต่างๆ ภายในแบบจำลองในระดับอะตอมใช้การพิจารณาในระบบ SI ดังนั้นเพื่อแปลงค่าสนามลตสภาพความเป็นแม่เหล็กจากระบบ CGS ให้อยู่ในระบบ SI ใช้การคูณด้วยตัวประกอบ $\mu_0/4\pi$ และเพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ อาศัยการแปลงระยะห่างระหว่างเซลล์เป็นระยะห่างที่แสดงในรูปของจำนวนเต็ม โดยการหารด้วยปริมาตรหนึ่งหน่วยเซลล์ a^3 ดังนั้นค่าสนามลตสภาพความเป็นแม่เหล็กในระบบ SI สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{H}_{dip,i} = \frac{\mu_0 |\vec{\mu}_j|}{4\pi a^3} \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \quad (2.49)$$

เมื่อ μ_0 คือค่าความซึมซาบได้ทางอากาศ

a คือค่าคงที่ของระยะห่างของอะตอม

5) พลังงานความร้อน

ปัจจุบันอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลอาศัยคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุในการเก็บบันทึกและอ่านข้อมูล โดยทั่วไปคุณสมบัติแม่เหล็กของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิวิกฤตของวัสดุ (critical temperature) จะทำให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและแอนติเฟอร์โรจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนเป็นวัสดุแม่เหล็กพารา เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดความผันผวนของสปินและการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบของสปินภายในโครงสร้างวัสดุ ส่งผลให้ค่าแมกนีไทเซชันภายในวัสดุมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล จะไม่สามารถเก็บบันทึกข้อมูลหรือใช้งานได้

ความร้อนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญและเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในกระบวนการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติแม่เหล็กและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลในปัจจุบัน โดยทั่วไปการศึกษาผลของความร้อนในแบบจำลองในระดับจุลภาคจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์เข้าในการคำนวณปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ ซึ่งทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่อุณหภูมิใดๆ เพื่อลดความยุ่งยากของการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาคและแก้ไขข้อจำกัดของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิใดๆ การใช้แบบจำลองในระดับ

อะตอมจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับการศึกษาผลของความร้อนภายในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล เนื่องจากแบบจำลองในระดับอะตอมสามารถทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุและปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในวัสดุแม่เหล็กที่อุณหภูมิใดๆ ได้โดยตรงจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินและทำการพิจารณาความผันผวนของสปินที่เกิดจากสนามความร้อน

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของสปินที่คิดผลของอุณหภูมิในแบบจำลองระดับอะตอมอาศัยการใช้ความสัมพันธ์ของพลวัตแลนเจวิน (Langevin dynamics) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Brown ภายใต้สมมติฐานที่ว่าผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบของสนามแบบสุ่ม (random field term) เนื่องจากผลของความร้อนมีการกระจายตัวในรูปแบบที่ไม่แน่นอน โดยความผันผวนของสปินที่เกิดขึ้นจากความร้อนสามารถพิจารณาในรูปแบบการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน $\Gamma(t)$ แบบสามมิติ โดยมีทิศทางตามแนวแกน x y และ z ดังแสดงตามความสัมพันธ์

$$\bar{H}_{th,x}^i(t) = \Gamma_x(t) \hat{e}_x \sigma$$

$$\bar{H}_{th,y}^i(t) = \Gamma_y(t) \hat{e}_y \sigma$$

$$\bar{H}_{th,z}^i(t) = \Gamma_z(t) \hat{e}_z \sigma$$

โดยสนามความร้อนที่เกิดขึ้นกับสปินที่ตำแหน่ง i ในช่วงเวลา (Δt) สามารถพิจารณาได้จาก

$$\bar{H}_{th}^i(t) = \bar{H}_{th,x}^i(t) + \bar{H}_{th,y}^i(t) + \bar{H}_{th,z}^i(t) \quad (2.50)$$

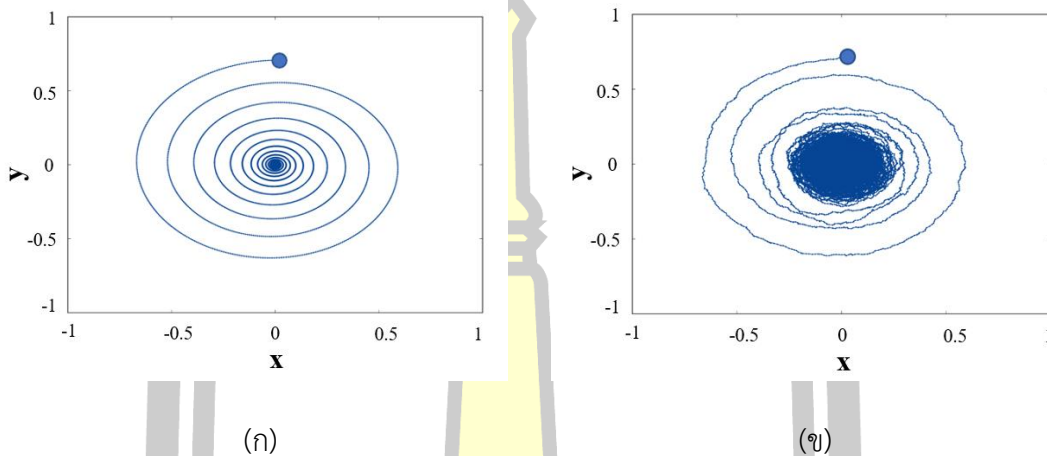
เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}}$ โดยที่ α คือค่าคงที่ความหน่วง

k_B คือค่าคงที่โบลต์สมาน (Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน (J/K)

T คืออุณหภูมิของระบบ มีหน่วยเป็นเคลวิน

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามความร้อนดังแสดงในสมการที่ (2.50) พบว่าค่าสนามความร้อนจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยความกว้างของการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวทั้งในกรณีที่มีและไม่มีผลของความร้อน พบว่าในกรณีที่ไม่มีผลของความร้อน สปินจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนและหน่วงเข้าหาสนามประสิทธิผลโดยไม่มีความผันผวนเนื่องจากความร้อน ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.42 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยว โดย

การพิจารณาพลวัตของสปินที่อุณหภูมิ 1 เคลวิน พบว่าผลของความร้อนจะทำให้เกิดความผันผวนของสปินระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนวนและห่วงวงเข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลดังแสดงตามภาพประกอบ 2.42 (ข) นอกจากนี้ยังพบว่าความผันผวนของสปินที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนยังทำให้สปินมีการเคลื่อนที่รอบๆ ค่าสมมูลและไม่สามารถจัดเรียงตัวในสภาวะสมดุลได้ เนื่องจากความร้อนจะทำให้สปินมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม



ภาพประกอบ 2.42 การเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวเมื่อมองจากด้านบน (top view) (ก) ในกรณีที่ไม่มีผลของความร้อนและ (ข) ในกรณีทีพิจารณาผลของความร้อนที่กระทำต่อระบบ เมื่ออุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 1 เคลวิน [92]

จากการพิจารณารายละเอียดของค่าพลังงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็ก ในลำดับถัดไป จะทำการศึกษาค่าสนามที่กระทำต่อสปินจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานภายในต่อสปิน เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสำหรับการศึกษาการเคลื่อนที่ของสปินและคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุแม่เหล็กจากการประยุกต์ใช้สมการ LIG ดังนั้นค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุจากการพิจารณาค่าพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน พลังงานแอนไอโซโทรปี พลังงานภายนอก สนามคู่ขั้วและสนามความร้อนที่กระทำต่อสปินที่ตำแหน่ง i สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\vec{H}_{eff}^i = -\frac{1}{\mu_s} \frac{\partial E}{\partial \hat{S}_i} + \vec{H}_{dip}^i + \vec{H}_{th}^i \quad (2.51)$$

เมื่อ E คือฮามิลโทเนียนสำหรับการอธิบายพลังงานภายในวัสดุ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$E = -\sum_{i \neq j} J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j - k_u \sum_i (\hat{S}_i \cdot \hat{e})^2 - \mu_s \sum_i \hat{S}_i \cdot \vec{H}_{app}$$

ดังนั้นสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อสปินที่ตำแหน่ง i มีค่าเท่ากับ

$$\vec{H}_{eff}^i = \sum_{i \neq j} \frac{J_{ij} \hat{S}_j}{\mu_s} + \frac{2k_u}{\mu_s} (\hat{S}_i \cdot \hat{e}) \hat{e} + \vec{H}_{app} + \frac{\mu_0 \mu_s}{4\pi a^3} \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij}) \hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_j}{|\vec{r}_{ij}|^3} \right] + \vec{H}_{th,\phi}^i \quad (2.52)$$

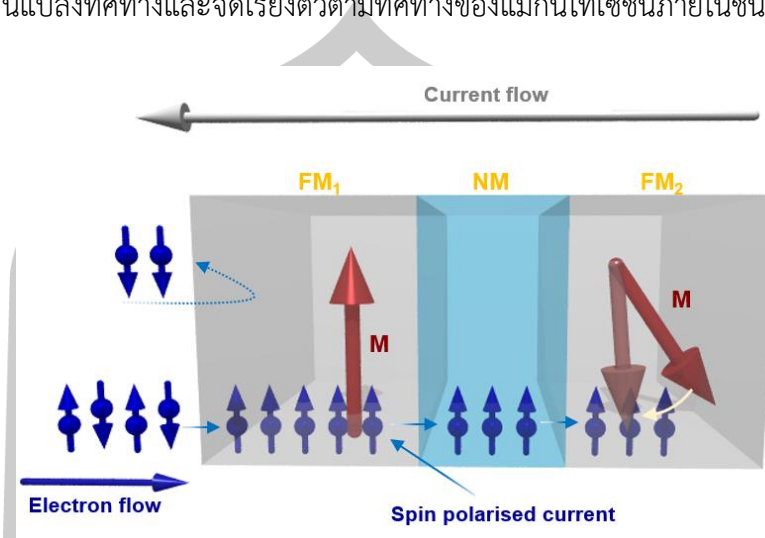
เมื่อ $\vec{H}_{th,\phi}^i = \Gamma_\phi(t) \hat{e}_\phi \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}}$ โดยที่ $\phi = x, y$ และ z

นอกจากการพิจารณาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติภายในวัสดุ ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกและผลของความร้อน ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสปินภายในโครงสร้างวัสดุ การศึกษาพลวัตของสปินภายในโครงสร้างสปีนวาล์วและการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องทำการพิจารณาผลของการส่งผ่านสปินทอร์กที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไบอัสเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ในกระบวนการอ่านข้อมูล โดยการอธิบายผลของสปินทอร์กที่มีต่อพลวัตของสปินมีรายละเอียดดังนี้

2.4.4 ปรากฏการณ์สปีนทอร์ก

กระบวนการอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปีนวาล์วสำหรับการแสดงค่าสัญญาณบิตการอ่านข้อมูล โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างสปีนวาล์วดังแสดงตามภาพประกอบ 2.43 โดยกระแสอิเล็กตรอนที่มีทิศทางของสปินใดๆ จะถูกเหนี่ยวนำให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ที่เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปินในชั้นเอสของกระแสอิเล็กตรอนและสปินภายในชั้นดีของวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนดังกล่าวส่งผลให้กระแสสปินที่มีทิศทางใดๆ มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชัน ซึ่งจะเรียกกระแสสปินนี้ว่ากระแสสปินโพลารไรซ์ (spin polarised current) จากนั้นเมื่อกระแสสปินโพลารไรซ์เคลื่อนที่ไปยังชั้นอิสระซึ่งแมกนีไทเซชันเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระ จะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุอีกครั้ง โดยอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนส่งผลให้เกิดแรงบิดสปินจากแมกนีไทเซชันกระทำต่อกระแสสปินโพลารไรซ์และในขณะเดียวกันตามกฎการอนุรักษ์พลังงานของโมเมนตัมเชิงมุม จะเกิดแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลารไรซ์กระทำกลับต่อแมกนีไทเซชันเช่นกัน โดยความแรงของแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันจะมีค่าแปรผันตรงกับความหนาแน่นของกระแสสปินที่ถูกป้อนผ่าน

โครงสร้างวัสดุ ในกรณีที่กระแสสปินมีความหนาแน่นที่มากพอจะทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางและจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินได้



ภาพประกอบ 2.43 ปรากฏการณ์การส่งผ่านแรงบิดสปินจากการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว

โดยทั่วไปในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะหลีกเลี่ยงการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อป้องกันการส่งผ่านแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์ที่กระทำกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล โดยความหนาแน่นของกระแสสปินที่ใช้ในกระบวนการอ่านข้อมูลจะอยู่ในช่วง $1 \times 10^9 - 7 \times 10^{11}$ แอมแปร์ต่อตารางเมตร [58], [141], [142] ในขณะที่การป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงจะถูกใช้ในกระบวนการบันทึกข้อมูลภายในหน่วยความจำแบบ STT-MRAM [4], [5] และหน่วยความจำแบบ-เรซเทอริก [6], [7] โดยอาศัยการส่งผ่านแรงบิดสปินที่เกิดขึ้นจากกระแสสปินโพลาไรซ์เหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการบันทึกข้อมูล

ปรากฏการณ์สปินทอร์กถูกเสนอขึ้นครั้งแรกในทางทฤษฎีโดย L. Berger [143] และ J.C. Slonczewski [144] จากการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเนต การเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d จากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปินของอิเล็กตรอนตัวนำในชั้นแอสและสปินในชั้นดีของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างวัสดุ ซึ่งจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวจะทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยทั่วไปปรากฏการณ์สปินทอร์กที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้สององค์ประกอบหลักๆ คืออะเดียบาติกทอร์ก (adiabatic torque, AST) และนอนอะเดียบาติกทอร์ก (non-adiabatic

torque, NAST) โดย AST ถูกใช้เพื่ออธิบายองค์ประกอบของทอร์กที่เหนี่ยวนำให้สปินของกระแสอิเล็กตรอนตัวนำมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบ ในขณะที่ NAST ถูกใช้เพื่ออธิบายเคลื่อนที่ของกระแสสปินออกนอกกระนาบของแมกนีไทเซชัน โดยรายละเอียดของการคำนวณ AST และ NAST ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมีรายละเอียดดังนี้

1) อะเดียบัติกทอร์ก (AST)

อะเดียบัติกทอร์กหรือ AST เป็นองค์ประกอบหลักของสปินทอร์กที่เกิดขึ้นจากการส่งผ่านแรงบิดสปินจากกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยปรากฏการณ์ AST ถูกอธิบายในครั้งแรกในเชิงทฤษฎีโดยการใช้แบบจำลองของ Slonczewski [144] จากการอาศัยสมมติฐานการส่งผ่านสปินแบบบอลลิสติก (ballistic transport) โดยการใช้เงื่อนไขที่กำหนดให้กระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อไม่มีการเคลื่อนที่ออกนอกกระนาบของแมกนีไทเซชันหรือไม่มีการเกิดองค์ประกอบของกระแสสปินในทิศทางตั้งฉากปรากฏการณ์ AST ถูกอธิบายผ่านทางกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนตัวนำ โดย AST ของ Slonczewski ถูกอธิบายได้ดังสมการ

$$\vec{ST}_{AST} = \gamma a \hat{M}_F \times (\hat{M}_F \times \hat{M}_P) \quad (2.53)$$

โดยที่ a คือค่าพารามิเตอร์สปินทอร์ก มีค่าเท่ากับ $a = \frac{\hbar P I}{M_s V e}$

เมื่อ P คือค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุ มีค่าเท่ากับ $P = \frac{N_\uparrow(E_F) - N_\downarrow(E_F)}{N_\uparrow(E_F) + N_\downarrow(E_F)}$

I คือค่ากระแสไฟฟ้า

M_s คือค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของวัสดุ

V คือปริมาตรของระบบ

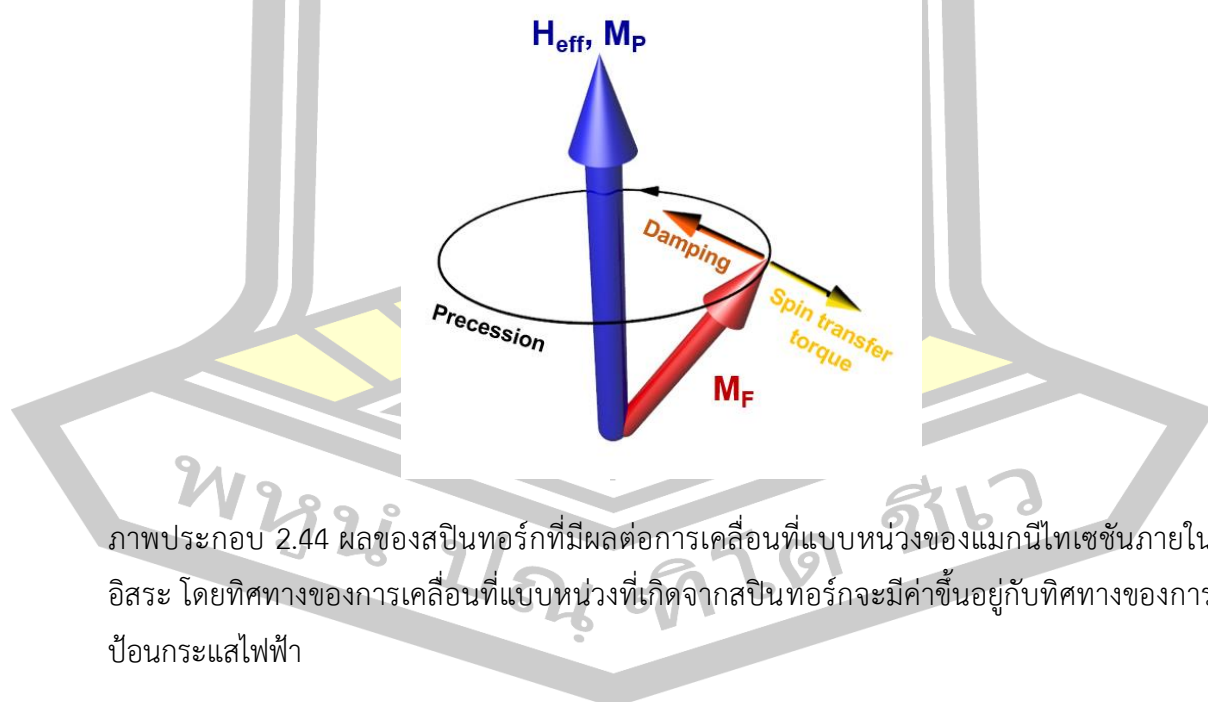
e คือประจุอิเล็กตรอน

γ คือค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติก

\hat{M}_F และ \hat{M}_P คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและชั้นพินตามลำดับ โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะแสดงถึงทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ไปยังชั้นอิสระ

จากการพิจารณาสมการที่ (2.53) พบว่า AST เป็นแหล่งกำเนิดของการเคลื่อนที่แบบหมุน ซึ่งออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระเกิดการเปลี่ยนแปลง

ทิศทางและจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน โดยผลของ AST สามารถช่วยเพิ่มหรือลดการเคลื่อนที่แบบหน่วงธรรมชาติ (natural damping) ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.44 โดยผลของสปินทอร์กจะมีค่าแปรผันตรงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและทิศทางของการป้อนกระแสไฟฟ้า ในกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต (critical current) ที่ทำให้แมกนีไทเซชันสามารถเปลี่ยนแปลงได้ จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (precession) รอบสนามประสิทธิผลด้วยวงรอบขนาดเล็กและเคลื่อนที่สู่สนามประสิทธิผล โดยผลการเคลื่อนที่แบบหน่วงของสปินทอร์กจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความหน่วงธรรมชาติ จากนั้นเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤต ผลของสปินทอร์กจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหน่วงที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับความหน่วงธรรมชาติที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีมุมการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่มากขึ้นก่อนการเคลื่อนที่เข้าสู่ทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล เนื่องจากค่าความหน่วงธรรมชาติมีค่ามากกว่าค่าความหน่วงของสปินทอร์ก อย่างไรก็ตามเมื่อการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นมากพอจนสามารถทำให้ความหน่วงของสปินทอร์กมีค่ามากกว่าความหน่วงธรรมชาติที่เกิดจากสนามประสิทธิผล จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนด้วยมุมที่กว้างขึ้นและสามารถกลับทิศทางเคลื่อนที่ตามทิศทางของสปินทอร์กที่กระทำต่อระบบได้



ภาพประกอบ 2.44 ผลของสปินทอร์กที่มีผลต่อการเคลื่อนที่แบบหน่วงของแมกนีไทเซชันภายในอิสระ โดยทิศทางของการเคลื่อนที่แบบหน่วงที่เกิดจากสปินทอร์กจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของการป้อนกระแสไฟฟ้า

นอกจากการพิจารณาองค์ประกอบของ AST ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในอิสระให้อยู่ในระนาบของชั้นพินหรือมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของกระแสสปินโพลารไรซ์ การ

เคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กยังทำให้เกิด NAST ที่ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่ออกจากระนาบของกระแสสปินโพลาไรซ์ โดยรายละเอียดของการพิจารณา NAST ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะถูกอธิบายในลำดับถัดไป

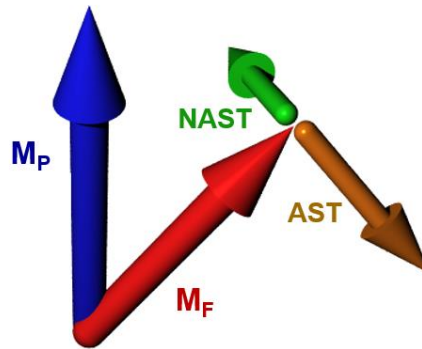
2) นอนอะเดียบาติกทอร์ก (NAST)

โดยทั่วไปผลของ AST จะเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนและมีการจัดเรียงตัวในระนาบของชั้นพินหรือกระแสสปินโพลาไรซ์ นอกจากนี้การเกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์กยังคงมีทอร์กที่สำคัญอีกหนึ่งองค์ประกอบนั้นคือ นอนอะเดียบาติกทอร์ก (NAST) หรือสนามคล้ายทอร์ก (field-like torque) ที่ส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีการเคลื่อนที่ออกนอกระนาบของกระแสสปินโพลาไรซ์ ถึงแม้ว่าขนาดของ NAST จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ AST อย่างไรก็ตามการอธิบายผลของ NAST ยังคงมีความสำคัญต่อการอธิบายสปินทอร์กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง ผลของ NAST เกิดขึ้นจากปฏิสัมพันธ์แบบอ่อน (weak coupling) ระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งทำให้กระแสสปินและแมกนีไทเซชันไม่สามารถจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันอย่างสมบูรณ์ โดยผลของ NAST จะทำให้กระแสสปินมีองค์ประกอบแบบตั้งฉากหรือมีการเคลื่อนที่ออกจากระนาบของแมกนีไทเซชัน โดยสมการอธิบาย NAST มีค่าดังแสดงในสมการที่ (2.54)

$$\overline{\mathbf{ST}}_{NAST} = \mathbf{b}(\hat{\mathbf{M}}_F \times \hat{\mathbf{M}}_P) \quad (2.54)$$

เมื่อ \mathbf{b} คือค่าพารามิเตอร์ของ NAST ซึ่งแสดงถึงความแรงของ NAST ที่มีต่อแมกนีไทเซชัน ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.54) แสดงให้เห็นว่าผลของ NAST จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสสปินแบบหมุนวนรอบแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.53) และ (2.54) สามารถอธิบายองค์ประกอบของ AST และ NAST ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระดังแสดงตามภาพประกอบ 2.45

พหุ ประถม โท ซิว



ภาพประกอบ 2.45 ทิศทางของ AST และ NAST ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ เมื่อทิศทางของ AST และ NAST แสดงทิศทางเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระแบบในระนาบและออกนอกระนาบของแมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์มตามลำดับ [77]

โดยทั่วไปปรากฏการณ์สปินทอร์คสามารถอธิบายได้จากการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินจากการเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยผลสปินทอร์ครวมซึ่งประกอบไปด้วย AST และ NAST สามารถพิจารณาได้จากการศึกษาเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของกระแสสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งตั้งสมการ

$$\bar{\tau}_{ST} = \frac{\partial \vec{j}_m}{\partial x} = -\left(\frac{J}{\hbar}\right)(\vec{m} \times \hat{M}) - \left(\frac{J}{\hbar}\right) \frac{\ell_L}{\ell_{\perp}} \left[\hat{M} \times (\vec{m} \times \hat{M}) \right] \quad (2.55)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.55) สามารถพิจารณาสปินทอร์ครวมจากองค์ประกอบของการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันดังนี้

$$\bar{\tau}_{ST} = -\frac{2D_0}{\lambda_J^2} (\vec{m} \times \hat{M}) - \frac{2D_0}{\lambda_{\phi}^2} \left[\hat{M} \times (\vec{m} \times \hat{M}) \right] \quad (2.56)$$

เมื่อพิจารณาสปินทอร์ครวมในสมการที่ (2.56) พบว่าสปินทอร์คมีค่าขึ้นอยู่กับระยะการหมุนวนของสปินและระยะสปินดีเฟสซิง โดยระยะการหมุนวนของสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชัน ในขณะที่ระยะสปินดีเฟสซิงจะมีค่าขึ้นอยู่กับความไม่บริสุทธิ์ของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อ จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาสนามสปินทอร์คที่เกิดขึ้นภายในวัสดุจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุ [129]-[131] ดังสมการ

$$E_{sd} = -J_{sd} \vec{m} \cdot \hat{M} \quad (2.57)$$

เมื่อ J_{sd} คือปริพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชัน

การพิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานการแลกเปลี่ยน s-d สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์สปิน-ทอรัคในสมการที่ (2.57) พบว่าองค์ประกอบของ AST และ NAST สามารถพิจารณาได้จากองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันเท่านั้น ในขณะที่องค์ประกอบในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชันจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์สปินทอรัค เมื่อพิจารณาสนามสปินทอรัคที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันด้วยวิธีการของ ZLF [129]–[131] จากองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันสามารถพิจารณาได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{ST} = -\frac{\partial E_{sd}}{\partial \hat{M}} = J_{sd} \vec{m} \quad (2.58)$$

ดังนั้นสนามสปินทอรัคมีค่าเท่ากับ

$$\vec{H}_{ST} = a(\hat{M}_P \times \hat{M}_F) + b(\hat{M}_F \times \hat{M}_P) \times \hat{M}_F \quad (2.59)$$

เมื่อทำการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่รวมผลของสปินทอรัคที่อธิบายด้วยองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน โดยการอาศัยสมการ LLG ดังสมการ

$$\frac{\partial \hat{M}_F}{\partial t} = -\gamma \hat{M}_F \times (\vec{H}_{eff} + J_{sd} \vec{m}) + \alpha \hat{M}_F \times \frac{\partial \hat{M}_F}{\partial t} \quad (2.60)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.59) ลงในสมการที่ (2.60) จะได้

$$\frac{\partial \hat{M}_F}{\partial t} = -\gamma \hat{M}_F \times \vec{H}_{eff} + \alpha \hat{M}_F \times \frac{\partial \hat{M}_F}{\partial t} - \gamma a \hat{M}_F \times (\hat{M}_P \times \hat{M}_F) - \gamma b (\hat{M}_F \times \hat{M}_P) \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.61) สามารถพิจารณาสปินทอรัครวมซึ่งประกอบไปด้วย AST และ NAST มีค่าเท่ากับ

$$\vec{\tau}_{ST} = -\gamma a \hat{M}_F \times (\hat{M}_P \times \hat{M}_F) - \gamma b (\hat{M}_F \times \hat{M}_P) \quad (2.62)$$

จากการพิจารณาสปินทอรัครวมในสมการที่ (2.62) พบว่า AST และ NAST มีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ตามลำดับ โดย AST ถูกใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบหมุนวงเข้าหาทิศทางของกระแสสปินโพลารไรซ์ ในขณะที่ NAST ถูกใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของสปินรอบทิศทางของทิศทางของกระแสสปินโพลารไรซ์

การอธิบายรายละเอียดการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎี โดยการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินสำหรับการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุและการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน เพื่อคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล นอกจากการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลเชิงทฤษฎี งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลในเชิงการทดลอง ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจพื้นฐานของการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านในเชิงอุตสาหกรรม ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายเครื่องวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่าน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5 เครื่องมือวัดไอเอสไอ (Integral Solutions Int'l)

กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในโครงสร้างสปินวาล์วจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ซึ่งถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูล การศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลในเชิงการทดลองอาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่หัวอ่านข้อมูลและทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล โดยทั่วไปการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลในเชิงอุตสาหกรรมสามารถทำได้ในสองลักษณะคือการวัดแบบพลวัต (dynamics test) และแบบเสถียร (static test) โดยการวัดแบบพลวัตจะใช้ในการศึกษาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในขณะทำการอ่านและเขียน ซึ่งหัวอ่าน-หัวเขียนและแผ่นบันทึกข้อมูลมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ในขณะที่การวัดแบบเสถียรจะทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในขณะหัวอ่าน-หัวเขียนข้อมูลหยุดนิ่ง

งานวิจัยนี้จะทำการตรวจวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลแบบเสถียร โดยการใช้เครื่องมือวัด Integral Solutions Int'l (ISI) หรือที่ถูกระบุว่าเครื่องมือวัดไอเอสไอ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่อาศัยคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุ โดยการวัดแบบเสถียรจะถูกใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในขั้นตอนการผลิตก่อนการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์จริง เครื่องไอเอสไอสามารถศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลตั้งแต่กระบวนการเตรียมชั้น-ฟิล์มบางจนกระทั่งขั้นตอนการเตรียมหัวอ่าน-หัวเขียนเพื่อประกอบเข้ากับแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งสามารถใช้เพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบของเวเฟอร์ (wafer) บาร์ (bar) สไลเดอร์ (slider) การประกอบหัวอ่าน-เขียนกับฐานรอง (Head Gimbal Assembly,

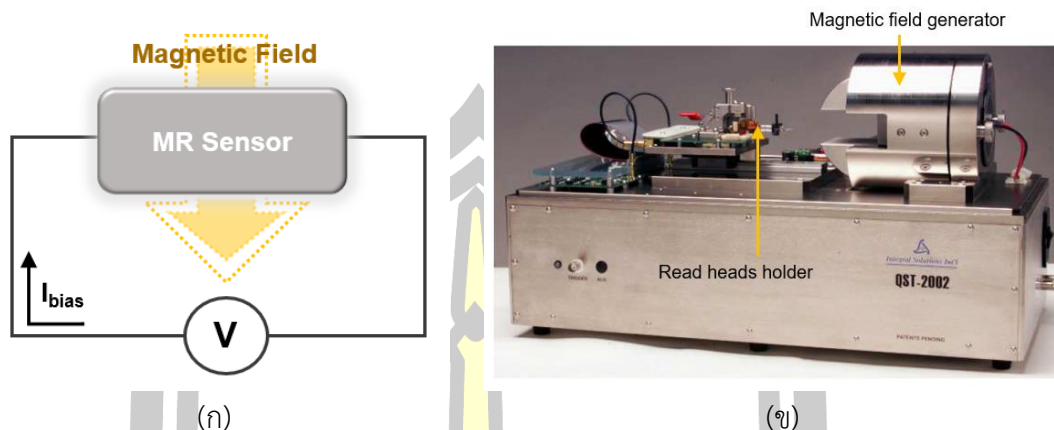
HGA) การประกอบ HGA เข้ากับอาร์มเพื่อใช้งานในไดร์ฟ (Head Stack Assembly, HSA) และการประกอบหัวอ่าน-เขียนกับไดร์ฟ (Head/Disc Assembly, HAD) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.46 โดยรายละเอียดของลักษณะของหัวอ่านในแต่ละรูปแบบจะถูกอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 5.1



ภาพประกอบ 2.46 เครื่องมือวัดไอเอสไอสำหรับการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบต่างๆ [145]

2.5.1 กระบวนการทำงานของเครื่องไอเอสไอ

กระบวนการทำงานของเครื่องมือวัดไอเอสไออาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล จากนั้นทำการป้อนแรงดันไบอัสกระแสสลับเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล เพื่อทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 2.47 (ก) โดยหัวอ่านที่ต้องการทำการศึกษาก็จะถูกวางลงบนที่จับหัวอ่านข้อมูล (read head holder) เพื่อทำการยื่นหัวอ่านข้อมูลเข้าและออกจากสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก (magnetic field generator) ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.47 (ข) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดไอเอสไอสำหรับการวัดหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบของ HGA



ภาพประกอบ 2.47 (ก) วงจรการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) ลักษณะเครื่องไอเอสไอสำหรับการวัดหัวอ่านในรูปแบบของ HGA [146]

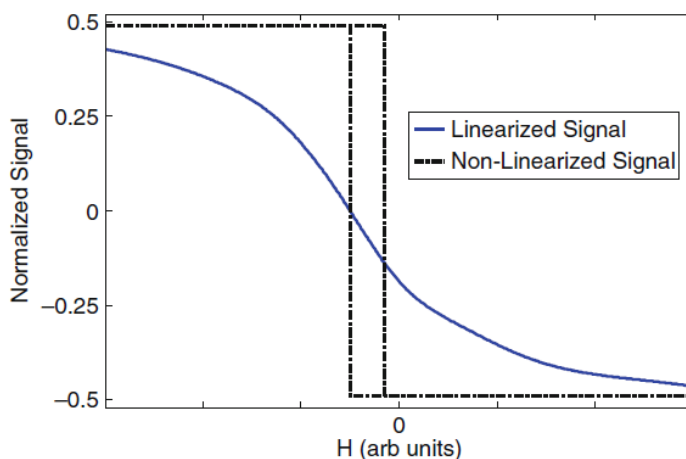
เครื่องมือวัดไอเอสไอเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวัดพื้นฐานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล โดยทั่วไปเครื่องมือวัดไอเอสไอสามารถแบ่งการวัดออกเป็นสามประเภทหลักๆ คือ การวัดแบบเสถียร (static tests) การตรวจวัดที่ความถี่ต่ำ (low frequency measurement) และการตรวจวัดที่ความถี่สูง (high frequency measurement) โดยการวัดแบบเสถียรจะใช้กับหัวอ่านข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ HSA และ HDA สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบภายนอกที่ส่งผลต่อการทำงานของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล เช่น การวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของกราวด์ การวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวอยซ์คอยล์ (voice coil) อัตราการใช้พลังงาน (power consumption) ชิปแปลงสัญญาณ (preamp chip) การตรวจวัดความผิดปกติ (fault detection) และสายไฟ (flex) เป็นต้น การตรวจวัดที่ความถี่ต่ำใช้สำหรับการศึกษาการตอบสนองของหัวอ่านข้อมูลเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล โดยช่องการตรวจวัดที่ความถี่ต่ำจะถูกใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล หัวเขียนข้อมูล ตัววัดความบกพร่องบนแผ่นบันทึกข้อมูล (thermal Asperity, TA) ตัวทำความร้อนของหัวอ่าน-หัวเขียน ตัวทำความร้อนของตัววัดความบกพร่องและการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กภายนอกหรือเส้นโค้ง-ทรานส์เฟอร์ (transfer curve) เป็นต้น ในขณะที่การตรวจวัดที่ความถี่สูงใช้สำหรับการวัดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเขียน สนามแม่เหล็กภายนอกและอุณหภูมิ เป็นต้น

2.5.2 การวิเคราะห์ผลเชิงการทดลอง

เครื่องมือวัดไอเอสไอถูกออกแบบเพื่อทำการตรวจวัดการตอบสนองของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลกับสนามแม่เหล็กภายนอก ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบภายในหัวอ่านข้อมูลและองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

โดยทั่วไปเครื่องไอเอสไอถูกใช้เพื่อตรวจวัดพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่านข้อมูลที่มีลักษณะเป็นแผ่นเวเฟอร์จนกระทั่งการประกอบหัวอ่าน-เขียนข้อมูลเข้าสู่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การตอบสนองของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า-สนามแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลสามารถอธิบายได้จากเส้นโค้งทรานส์เฟอร์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ เพื่อให้หัวอ่านข้อมูลแสดงตอบสนองของโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้น ในขณะที่ยังไม่มีมีการอ่านข้อมูลแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะต้องมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงและมีทิศทางขนานกับ ABS โดยการอาศัยผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากชั้นฮาร์ดไดโอสในบริเวณด้านข้างชั้นอิสระ ในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบมีเสถียรภาพและตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงอย่างสมบูรณ์จะทำให้เส้นโค้งทรานส์เฟอร์มีลักษณะแบบเชิงเส้นดังแสดงตามภาพประกอบ 2.48 โดยแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ตามลำดับแบบซ้ำรอยเดิม ในทางตรงกันข้ามเมื่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระขาดเสถียรภาพในการจัดเรียงตัวและมีทิศทางขนานกับชั้นอ้างอิงจะส่งผลให้เส้นโค้งทรานส์เฟอร์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นหรือมีการกลับทิศทางแบบวงลูปฮิสเทอรีซิส



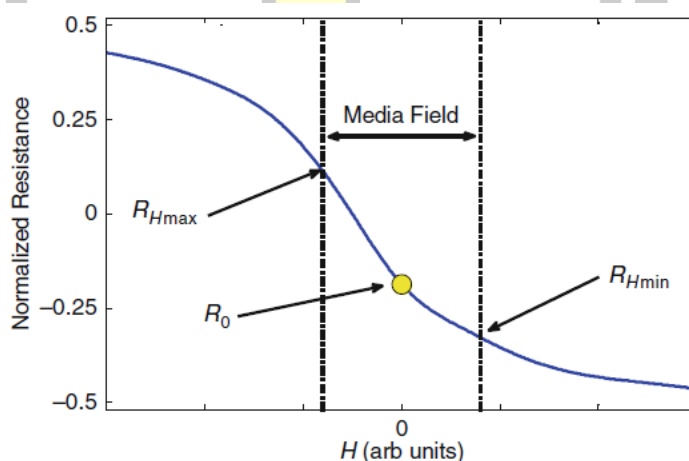
ภาพประกอบ 2.48 การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น [33]

ในกระบวนการอ่านข้อมูลสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลจะเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันชั้นในอ้างอิงกับชั้นอิสระและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล การพิจารณาการตอบสนองของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล (u) สามารถอธิบายจากอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของเซนเซอร์หัวอ่าน

ข้อมูลจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในกรณีทีแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ซึ่งจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูล ดังแสดงในสมการ

$$u = \frac{R_{H\max} - R_{H\min}}{R_{AP} - R_P} \quad (2.63)$$

เมื่อ $R_{H\max}$ และ $R_{H\min}$ คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งโดยทั่วไปค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีค่าน้อยกว่าค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้แมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามและขนาน ดังแสดงตามภาพประกอบ 2.49



ภาพประกอบ 2.49 การตอบสนองของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า-สนามแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งถูกใช้สำหรับการพิจารณาค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับ [33]

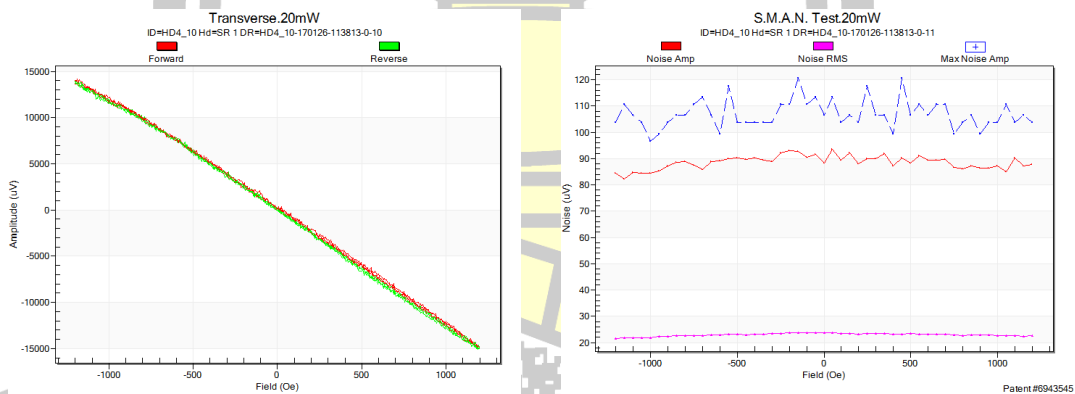
เมื่อทำการพิจารณาสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับของหัวอ่านข้อมูลพบว่าจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสที่ป้อนผ่านเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลและความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสนามฮาร์ดไบอัส ความสูงและความกว้างของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล เป็นต้น ซึ่งการตอบสนองของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงเมื่อค่าสนามฮาร์ดไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้นและความสูงกับความกว้างของโครงสร้างสปินวาล์วมีค่าลดลง เนื่องจากผลของสนามลดสภาพความเป็นแม่เหล็กและความแรงของสนามฮาร์ดไบอัส โดยค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$\text{Signal} = V_b \frac{R_{AP} - R_P}{R_0} u \quad (2.64)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกจากแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีต่อค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลย้อนกลับของหัวอ่านข้อมูลพบว่า

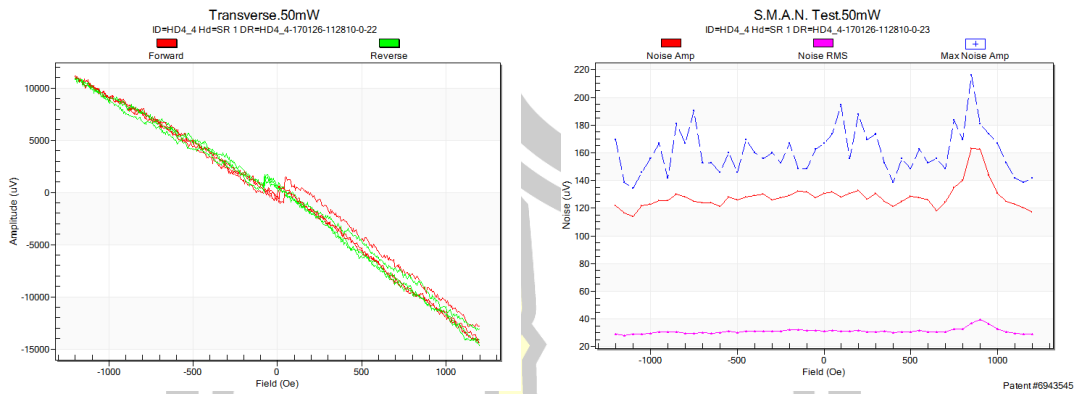
$$\text{Signal} = V_b \frac{R_{H \max} - R_{H \min}}{R_0} \quad (2.65)$$

เมื่อ V_b คือค่าแรงดันไบอัสที่เคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล เมื่อทำการพิจารณาเส้นโค้งทรานส์เฟอร์พบว่า การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วนอกจากจะส่งผลต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลยังส่งผลต่อการเกิดค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล โดยการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นและการแสดงค่าสัญญาณรบกวนของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นดังแสดงตามภาพประกอบ 2.50 (ก) และการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นและการแสดงค่าสัญญาณรบกวนของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงตามภาพประกอบ 2.50 (ข) ซึ่งขนาดของสัญญาณรบกวนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์



(ก)

พูน ปณ ทิโต ชีเว



(ข)

ภาพประกอบ 2.50 (ก) การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้นและค่าสัญญาณรบกวนจากการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบเชิงเส้น (ข) การตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบไม่เชิงเส้นและค่าสัญญาณรบกวนจากการตอบสนองของเส้นโค้งทรานส์เฟอร์แบบไม่เชิงเส้น

การอธิบายรายละเอียดการออกแบบหัวอ่านข้อมูล กระบวนการทำงานพื้นฐานและการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ในเชิงทฤษฎีและการทดลอง ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษามลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR จากการอาศัยแบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

พูนุ ปณ ทิโต ชีเว

บทที่ 3

การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า GMR

ปัจจุบันกลไกการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งเชิงทฤษฎี [8], [84]–[86] และการทดลอง [44], [87]–[89] เนื่องจากความรู้และความเข้าใจพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกประยุกต์ใช้ในกระบวนการบันทึกและอ่านข้อมูลของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2] หน่วยความจำ MRAM [3] และหน่วยความจำ STT-MRAM [4], [5] โดยปัจจุบันอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วหลังจากการค้นพบปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ [147], [148] เนื่องจากการประยุกต์ใช้พื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ GMR ในกระบวนการอ่านข้อมูล

ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กคือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อแสดงค่าบิต 0 และ 1 ในรูปแบบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โครงสร้างสปีนวาล์วเป็นองค์ประกอบหลักของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการตรวจวัดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลและแสดงค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก โครงสร้างอย่างง่ายของสปีนวาล์วประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnet, FM) สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุตัวนำที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กหรือนอนแมกเนต (nonmagnet, NM) [149] โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กชั้นที่หนึ่งหรือชั้นพิน (pinned layer) จะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนจากการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [150] ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นที่สองหรือชั้นอิสระ (free layer) สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูล โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ กล่าวคือค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากการกระเจิงของสปินที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตและภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าสูง ในขณะที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าต่ำสุดเมื่อทิศทางของแมกนีไท-

เซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการแสดงค่าไปนาเรียบิตของหัวอ่าน ข้อมูลอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสูงสุดและต่ำสุดเพื่อแสดงค่าบิต 1 และ 0 ตามลำดับ

ปัจจุบันกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเซลล์ของ MRAM อาศัยปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการทะลุผ่าน (TMR) สำหรับการบันทึกและอ่าน ข้อมูล เนื่องจากโครงสร้างรอยต่อการทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (MTJ) จะทำให้เกิดอัตราส่วน MR ที่สูง [53], [151] อย่างไรก็ตามโครงสร้าง MTJ จะทำให้เกิดความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (RA) ที่สูง เช่นกัน เนื่องจากธรรมชาติของรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิด ข้อจำกัดของความเร็วในการอ่านข้อมูลและการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนในการเพิ่มค่าความจุ ข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [14], [53] โดยปัจจุบันโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ MTJ สามารถลดค่า RA ได้ต่ำสุดประมาณ 1000 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ซึ่งสามารถใช้ได้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความ จุข้อมูลสูงสุดที่ 1.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว อย่างไรก็ตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลภายใน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลปริมาณสูง (ultra-high recording density HDD) หรือมีค่ามากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว หัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่า RA ที่น้อยกว่า 100 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [14], [53] จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ GMR สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล ที่มีความหนาแน่นของความจุข้อมูลที่ 2-5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว เนื่องจากโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล แบบ GMR มีค่า RA ที่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 50 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร [19], [51] ส่งผลให้ ปัจจุบันการศึกษาปรากฏการณ์ GMR ที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของ โครงสร้าง (CPP-GMR) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการพัฒนาและออกแบบหัวอ่านข้อมูลใน อนาคต

โดยทั่วไปปรากฏการณ์ GMR มีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปิน (spin-dependent scattering) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะคือการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ แม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต (interfacial scattering) และภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (bulk scattering) [152], [153] โดยการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับ ความสัมพันธ์ของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและ นอนแมกเนต ในขณะที่การกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชันและระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) การศึกษาเชิงทฤษฎี [154], [155] และการทดลอง [152],[113] แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า CPP-GMR สามารถทำได้จากการเพิ่มการกระเจิง ของสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว การเพิ่มค่าการกระเจิงของสปินภายในโครงสร้างสปิน

วาล์วจึงเป็นแนวทางที่นำไปสู่การเพิ่มค่าอัตราส่วน MR และประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่าน ข้อมูลแบบ CPP-GMR นอกจากคุณสมบัติของวัสดุที่ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR แล้ว ยิ่งไปกว่านั้นปัจจัยภายนอกเช่น การผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ความหนาของ ชั้นฟิล์มแม่เหล็ก นอนแมกเนตและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอก ยังคงเป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อการเกิดค่า RA และอัตราส่วน MR หรือค่า GMR เช่นกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารอบแบบหัวอ่านข้อมูลที่อาศัยปรากฏการณ์ GMR ที่ให้ ค่าอัตราส่วน MR ที่สูงและค่า RA ที่ต่ำ โดยจะทำการศึกษาคูสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร นอน-แมกเนตและปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้างฟิล์มบางแม่เหล็กที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก จากการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของ วัสดุจากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองทั่วไปของค่าการสะสมสปิน โดยใน ลำดับแรกของการวิจัยจะทำการศึกษาคูสมบัติของวัสดุที่ส่งผลต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR จาก การพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการสะสมสปินซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 ระยะเวลาสปีนดีเฟสซิงที่ส่งผลต่อค่าการสะสมสปินและค่า GMR

การศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากการ ประยุกต์ใช้การปรับแต่งสมการการสะสมสปินบนพื้นฐานของสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชัน (drift-diffusion equation) ตามรายละเอียดในบทที่ 2 จากสมการที่ (2.28) แสดงให้เห็นว่าพลวัตของค่า การสะสมสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินที่ถูกที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างต่อ ตำแหน่ง ระยะการหมุนวนของสปิน (spin precession length) ระยะเวลาสปีนดีเฟสซิง (spin dephasing length) และระยะการคลายตัวของสปิน (spin relaxation length) โดยระยะการคลาย ตัวของสปินจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของการสะสมสปินในทิศทางขนานกับ แมกนีไทเซชัน ในขณะที่ระยะการหมุนวนของสปินและระยะเวลาสปีนดีเฟสซิงจะส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน

โดยทั่วไประยะเวลาสปีนดีเฟสซิงเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปิน ออกจากระนาบของค่าแมกนีไทเซชัน ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะการหมุนวนของสปินแบบลามอร์ (Lamor spin precession length) และระยะสปีนโคฮีเรนซ์ (spin coherence length) [134] ระยะเวลาสปีนดีเฟสซิงของวัสดุเกิดขึ้นจากความไม่บริสุทธิ์ (impurity) ของการผสมกันของอะตอม ระหว่างชั้นฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อการหมุนวนของสปินและการกระเจิงของสปิน โดยระยะเวลาสปีนดีเฟสซิงเป็น

องค์ประกอบสำคัญที่นำไปสู่การอธิบายองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปรากฏการณ์สปินทอร์กในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

ปัจจุบันการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะละเลยการพิจารณาผลของระยะสปินดีเฟสซึ่งมีต่อการเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปิน โดยการใช้สมมติฐานที่ว่าองค์ประกอบของค่ากระแสสปินที่ตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันจะหายไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม [156] เนื่องจากระยะสปินดีเฟสซึ่งจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับระยะสปินดีเฟสซึ่ง สมมติฐานดังกล่าวจะไม่สามารถอธิบายองค์ประกอบของค่ากระแสสปินที่เคลื่อนที่ออกนอกระนาบของแมกนีไทเซชันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาผลของระยะสปินดีเฟสซึ่งที่ส่งผลต่อองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างสปินวาล์ว

3.1.1 แบบจำลองการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อและการสะสมสปิน

ระยะสปินดีเฟสซึ่งคือระยะที่กระแสสปินเคลื่อนที่ออกจากระนาบของแมกนีไทเซชันเนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อ ระยะสปินดีเฟสซึ่งถูกเสนอขึ้นครั้งแรกเพื่ออธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในเชิงทฤษฎี [74], [132], [157] โดยระยะสปินดีเฟสซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ เนื่องจากการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ออกจากระนาบของสปิน (misalignment) ดังนั้นในลำดับแรกของการศึกษาจะทำการอธิบายการจำลองโครงสร้างของอะตอมบริเวณรอยต่อเพื่อใช้ในการคำนวณผลของระยะสปินดีเฟสซึ่งที่มีต่อค่าการสะสมสปิน โดยระยะการแพร่ของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มจะส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินต่อตำแหน่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินระหว่างชั้นฟิล์มจะมีค่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ

ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาการจำลองการแพร่ของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มจากการประยุกต์ใช้กฎของฟิคซ์ (Fick's law) [76] ค่าความเข้มข้นของไอออนที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในโครงสร้างสามารถคำนวณได้จากกฎของฟิคซ์ซึ่งถูกอธิบายในงานวิจัย [76] การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของไอออนที่ตำแหน่งต่างๆ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินต่อตำแหน่ง การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออน A ที่บริเวณรอยต่อระหว่างไอออน A (FM) และ B (NM) ตามแนวแกน x ของโครงสร้างสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$C_A(x) = \frac{N_A(x)}{[N_A(x)+N_B(x)]} \quad (3.1)$$

เมื่อ $N_\alpha(x)$ ($\alpha = (A, B)$) คือจำนวนของไอออน α ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน x ที่ถูกนิยามตามกฎของฟิคซ์ การคำนวณความเข้มข้นของไอออนตามสมการที่ (3.1) ถูกใช้เพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงเชิงตำแหน่งของการแพร่ของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน $P(x)$ โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินสามารถพิจารณาได้โดยตรงจากการรวมผลพารามิเตอร์ภายในชั้นบัลค์ (bulk) และความเข้มข้นของไอออน ณ บริเวณนั้นดังสมการ

$$P(x) = P_A C_A(x) + P_B [1 - C_B(x)] \quad (3.2)$$

เมื่อ P_α คือการแพร่ของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของไอออนชนิด α ความกว้างของรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ($x_{1/2}$) ถูกพิจารณาจากค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของฟิค (full width at half maximum, FWHM) โดยที่ $x_{1/2} = 2x_0$ เมื่อ $C(x_0)/C(0) = 0.5$ คือตำแหน่งที่ $x = 0$ เมื่อ $C(x)$ คือความเข้มข้นของไอออนที่ระยะทางเท่ากับ x จากรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม

ในลำดับแรกจะทำการศึกษาผลของสปินดีเฟสซึ่งที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อภายในโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ที่ถูกประกบติดด้วยชั้นนอนแมกเนต ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวในแนวแกน y ในขณะที่แมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงทิศทางในระนาบของ yz และทำมุม 60 องศากับแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.1 การเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันเชิงตำแหน่งถูกใช้สำหรับการพิจารณาผลของค่าสปินดีเฟสซึ่งมีต่อค่าการสะสมสปิน ซึ่งพบว่าวิธีการพิจารณาค่าการสะสมสปินตามสมการที่ (2.30) ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเชิงตำแหน่งของแมกนีไทเซชันจะถูกประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม โดยการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการส่งผ่านสปินต่อตำแหน่ง โดยความไม่ต่อเนื่องของอะตอมบริเวณรอยต่อจะมีค่าแปรผันตรงกับ การเปลี่ยนแปลงของค่าสปินดีเฟสซึ่งต่อตำแหน่ง ซึ่งค่าสปินดีเฟสซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับของความไม่ต่อเนื่องของชั้นฟิล์มและการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสปินดีเฟสซึ่งบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มให้มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) โดยค่าสปินดีเฟสซึ่งที่รอยต่อสามารถอธิบายได้ตามสมการ

$$\lambda_\phi = \lambda_{\phi,A} C_A(x) + \lambda_{\phi,MAX} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x}{\sigma} \right]^2} + \lambda_{\phi,B} C_B(x) \quad (3.3)$$

เมื่อ x คือตำแหน่ง

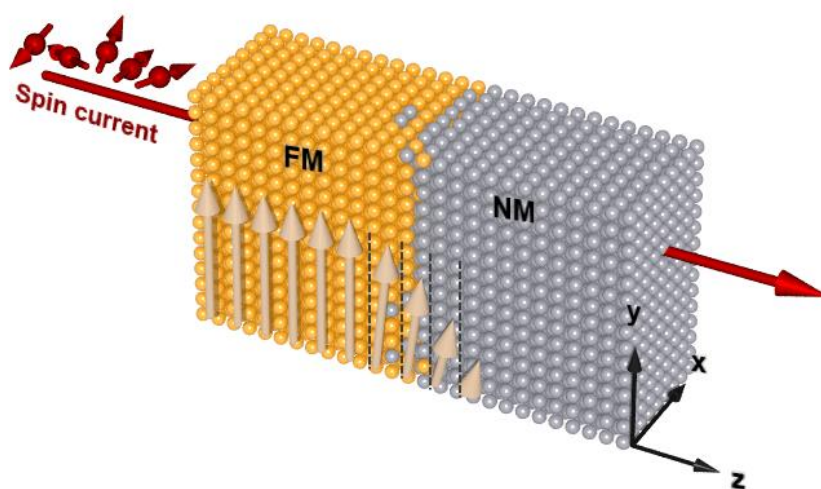
C_A และ C_B คือความเข้มข้นของอะตอมภายในวัสดุ A และ B ตามลำดับ

$\lambda_{\phi,MAX}$ คือค่าสูงสุดของสปินดีเฟสซิง โดยจะเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางของรอยต่อ

σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยความกว้างของบริเวณรอยต่อมีความสัมพันธ์โดยตรงกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดย

$\sigma = x_0 / \sqrt{2 \ln 2}$ โดยในหัวข้อนี้ได้กำหนดความกว้างของบริเวณรอยต่อเท่ากับ 1 นาโนเมตรและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.165



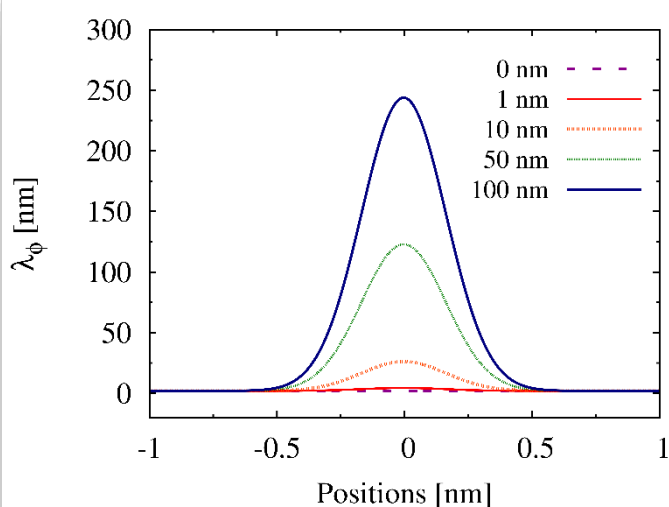
ภาพประกอบ 3.1 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ประกบติดกับนอนแมกเนต การผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มส่งผลให้แมกนีไทเซชันค่อยๆ เปลี่ยนแปลงทิศทางและมีขนาดที่เล็กลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ภายในชั้นนอนแมกเนต

ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาผลของค่าสปินดีเฟสซิงที่มีต่อพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินในโครงสร้างสองชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุ निकเกิลไอรอน (nickle-iron, NiFe) ที่ประกบติดกับชั้นทองแดง ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของนิกเกิลไอรอนมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของทองแดงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\beta = \beta' = 0$) และระยะการกลับทิศทางของสปินเท่ากับ 600 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าสปินดีเฟสซิงของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตเท่ากับ 2 นาโนเมตร โดยค่าปริพันธ์การแลกเปลี่ยนระหว่างระดับชั้นพลังงานเอสดี (s-d exchange integral) ของวัสดุนอนแมกเนตมีค่าเท่ากับ 0.01 เพื่อกำหนดให้ค่าระยะการหมุนวนของสปินภายในชั้นนอนแมกเนตมีค่าสูง

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุทึบเกลไอรอน

ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีน	ปริมาณ	อ้างอิง
ค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้า (β)	0.7	[76]
ค่าสปีนโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (β')	0.95	
ระยะการกลับทิศทางของสปีน (λ_{sf})	8 นาโนเมตร	
ระยะการหมุนวนของสปีน (λ_r)	3 นาโนเมตร	

การพิจารณาความไม่ต่อเนื่องของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มถูกอธิบายจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ $\lambda_{\phi,MAX}$ ที่มีค่าตั้งแต่ 0 – 100 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.2 ซึ่งการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าสปีนดีเฟสซึ่งต่อตำแหน่งตามภาพประกอบ 3.2 จะถูกนำไปพิจารณาผลของระยะสปีนดีเฟสซึ่งมีต่อค่าการสะสมสปีนในลำดับต่อไป

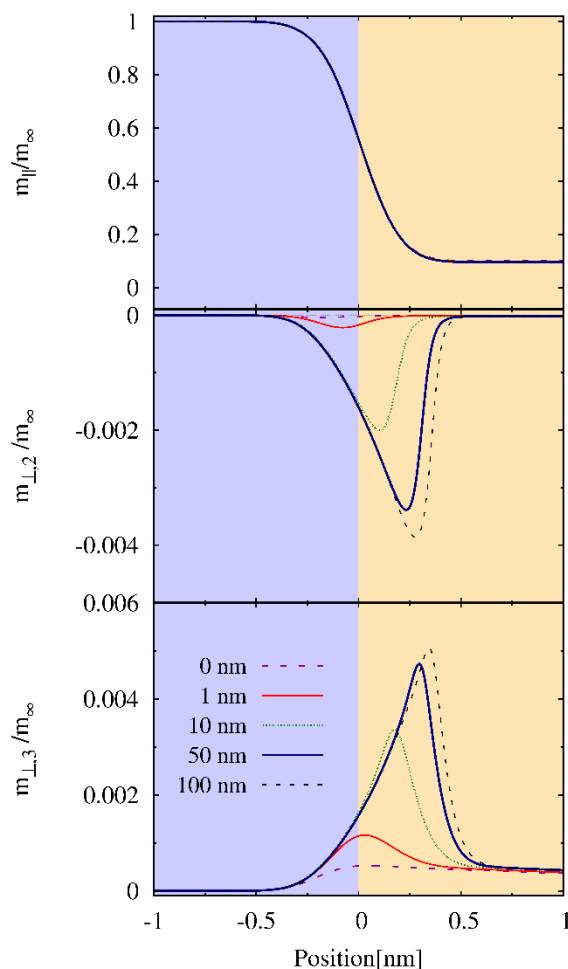


ภาพประกอบ 3.2 ผลของ $\lambda_{\phi,MAX}$ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะสปีนดีเฟสซึ่งต่อตำแหน่งภายในวัสดุแม่เหล็กสองชั้น โดยตำแหน่งที่ $x = 0$ คือจุดกึ่งกลางของรอยต่อ ตำแหน่ง $x < 0$ และ $x > 0$ คือชั้นวัสดุแม่เหล็กทึบไอรอนและทองแดงตามลำดับ

จากผลการศึกษาผลของระยะสปีนดีเฟสซึ่งมีต่อองค์ประกอบของค่าการสะสมสปีน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตจะทำให้เกิดองค์ประกอบของค่าการสะสมสปีนในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระยะสปีนดีเฟสซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อองค์ประกอบของค่าการสะสมสปีนในทิศทางตั้งฉากเท่านั้น เนื่องจากองค์ประกอบของค่าการสะสมสปีนในทิศทางขนานจะถูกควบคุม

และมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาแพร่ของสปิน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากจะส่งผลโดยตรงต่อสปินทอร์กในระบบ โดยทั่วไปการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในแบบจำลองทั่วไปจะละเลยการพิจารณาผลของค่าสปินดีเฟสซิง โดยการกำหนดให้ค่าสปินดีเฟสซิงมีค่าเป็นอนันต์ ($\lambda_\phi = \infty$) ซึ่งในกรณีนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในวัสดุที่มีค่า $\lambda_\phi > \lambda_J$ เท่านั้น อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกอ่อน (soft magnetic) อย่างเช่น นิกเกิลไอรอน การละเลยผลของสปินดีเฟสซิงจะทำให้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อนมีค่าพารามิเตอร์ $\lambda_\phi \leq \lambda_J$ ด้วยเหตุนี้การรวมผลการพิจารณาสปินดีเฟสซิงเข้าสู่แบบจำลองการสะสมสปินจึงมีความสำคัญต่อการอธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ นอกจากนี้จากผลการคำนวณจะสังเกตเห็นว่าจุดยอด (peak) ขององค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางตั้งฉากจะเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นนอนแมกเนต เมื่อระยะของค่าสปินดีเฟสซิงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจุดยอดของค่าการสะสมสปินมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ k_1 เมื่อ $(k_1 \pm k_2) = \sqrt{\lambda_{\text{trans}}^{-2} \pm i\lambda_J^{-2}}$ และ $\lambda_{\text{trans}}^{-2} = \lambda_\phi^{-2} + \lambda_{\text{sf}}^{-2}$ โดยภายในชั้นนอนแมกเนตค่า k_1 จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปิน เนื่องจากระยะเวลาหมุนวนของสปินภายในวัสดุนอนแมกเนตจะมีค่าสูงมากๆ โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในทิศทางที่ขนานและตั้งฉากกับแมกเนไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุสองชั้น ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.3





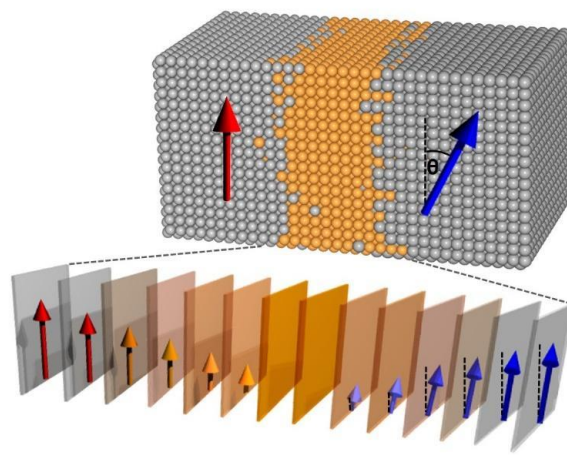
ภาพประกอบ 3.3 ผลของสปินดีเฟสซิงที่มีต่อองค์ประกอบของการสะสมสปิน (ก) ในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชัน (ข) และ (ค) ในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน

จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าระยะสปินดีเฟสซิงส่งผลโดยตรงต่อองค์ประกอบของการสะสมสปินในทิศทางที่ตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการศึกษามลของระยะสปินดีเฟสซิงที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

3.1.2 การส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของค่าการสะสมสปินตามรายละเอียดที่ถูกริบายในบทที่ 2 การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในหัวข้อนี้ถูกศึกษาในโครงสร้างสปินวาล์วอย่างง่ายที่ประกอบด้วย $\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})/\text{NiFe}(5\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})/\text{NiFe}(5\text{nm})$ โดยเพื่อความเหมือนจริงของแบบจำลองใช้

การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มแบบชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแบบสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnet, SAF) โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและชั้นอ้างอิงถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแกน $-y$ และ $+y$ ตามลำดับ ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสรสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางในระนาบ yz โดยการทำมุมใดๆ กับชั้นอ้างอิง การพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในแต่ละตำแหน่งใช้วิธีการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชั้นบางๆ หลายชั้น โดยมีความหนาเท่ากับ 0.01 เท่าของระยะห่างระหว่างอะตอม ซึ่งการแบ่งโครงสร้างวัสดุออกเป็นชั้นบางๆ จะทำให้สามารถพิจารณาความเข้มข้นของไอออน ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม การพิจารณาความเข้มข้นของอะตอมในแต่ละตำแหน่งพบว่าทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุที่ห่างจากบริเวณรอยต่อจะมีทิศทางเดียวกัน (homogeneous) ตลอดทั้งวัสดุ ในขณะที่แมกนีไทเซชันบริเวณรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางคล้ายกับกำแพงโดเมน (domain wall) เนื่องจากการแพร่กระจายของไอออนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มดังแสดงตามภาพประกอบ 3.4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสร



ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างสปินวาล์วที่พิจารณาการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อ โครงสร้างถูกแบ่งออกเป็นชั้นบาง ๆ โดยมีความหนาเท่ากับ 0.0035 นาโนเมตรและแมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางคล้ายกับกำแพงโดเมน

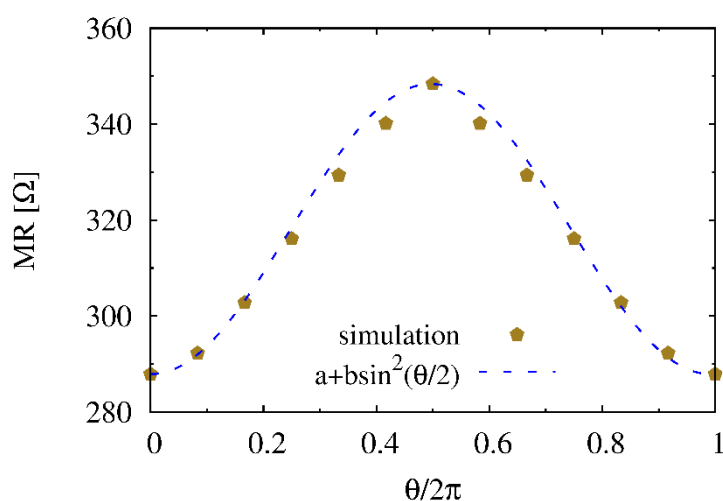
การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลสามารถคำนวณได้จากการศึกษาการสะสมสปินและกระแสสปินภายในวัสดุแม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 50 เมกกะ-

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (MA/cm^2) ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยขนาดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ถูกใช้สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ GMR ในเชิงการทดลอง [52], [158]

โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว ดังนั้นในลำดับแรกของการคำนวณจะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของมุมระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระในช่วง $0 > \theta > 2\pi$ การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในหัวข้อนี้ใช้การกำหนดค่าสปีนดีเฟสซิงของนิกเกิลไอรอนให้มีค่าเท่ากับ 2 นาโนเมตรและค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 111.8 เมกกะคูมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ค่าการส่งผ่านสปีนและค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุอนแมกเนตมีค่าเท่ากับศูนย์ [76] การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีนต่อตำแหน่งถูกอธิบายในสมการที่ (2.32) และ (2.29) ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีนนำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance area product, RA) ณ ตำแหน่งต่างๆ จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.36) โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่จากทุกๆ ชั้นย่อยภายในโครงสร้าง $MR = \sum_{i=1}^n RA_i$ เมื่อ n คือจำนวนชั้นย่อยภายในโครงสร้าง

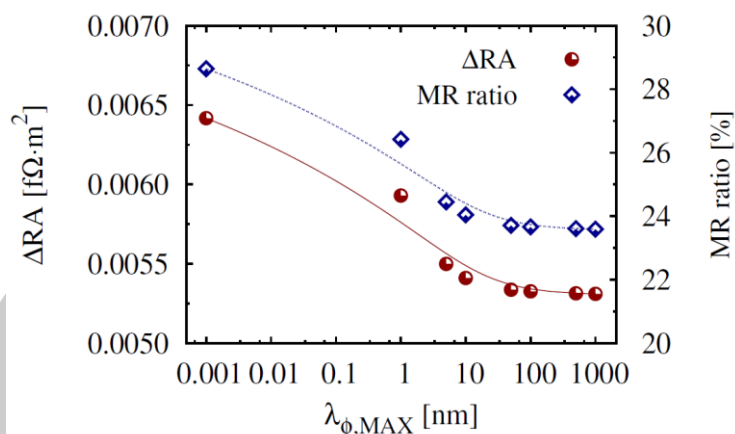
โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้าม (anti-parallel, AP) จะมีค่าสูงกว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ทิศทางขนาน (parallel, P) กัน เนื่องจากการสะสมสปีนจะปรับเปลี่ยนทิศทางและมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้าม การสะสมสปีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยต่อ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนต่อตำแหน่ง (gradient of spin accumulation, Δm) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและฟังก์ชัน $a + b \sin^2(\theta/2)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ถูกใช้สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ GMR [159]–[162] โดยค่าพารามิเตอร์ a คือค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและ b คือผลต่างระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวใน

ทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้าม (ΔR) ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของมุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระภายในโครงสร้างสปีนวาล์วแสดงดังภาพประกอบ 3.5 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการอธิบายผลในเชิงการทดลอง โดยพบว่ามีค่าอัตราส่วน MR เท่ากับร้อยละ 21 จากผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการสะสมสปีนสามารถอธิบายคำนวณค่า GMR และผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กซึ่งให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง



ภาพประกอบ 3.5 ผลของมุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรผ่านโครงสร้างสปีนวาล์ว

ในลำดับต่อไปคือการพิจารณาผลของสปีนดีเฟสซึ่งที่มีต่อค่าความต่างระหว่างค่าความต้านทานเชิงพื้นที่ (ΔRA) และค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้าง $\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})/\text{NiFe}(5\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})/\text{NiFe}(5\text{nm})$ โดยกำหนดความหนาของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเกิดจากการผสมกันของอะตอมมีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับระยะสปีนดีเฟส ซึ่งโดยค่าอัตราส่วน MR ลดลงประมาณร้อยละ 17.6 เมื่อระยะสปีนดีเฟสเพิ่มขึ้นจาก 0.001 ถึง 1000 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.6 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของค่าการสะสมสปีนในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ทำให้กระแสสปินโพลาริซมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ออกจากแมกนีไทเซชันที่มากขึ้น และส่งผลให้กระแสสปินโพลาริซมีค่าที่ลดลง ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระยะสปีนดีเฟสซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ GMR



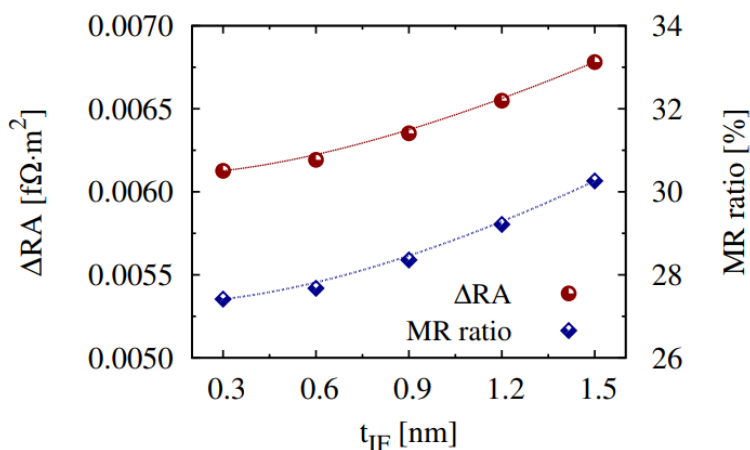
ภาพประกอบ 3.6 การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของระยะสปีนดีเฟสซิงในโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)

นอกจากระยะสปีนดีเฟสซิงซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในวัสดุที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ GMR ในลำดับถัดไปจะเป็นการศึกษาผลของปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ได้แก่ การผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก โดยผลของปัจจัยภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและปรากฏการณ์ GMR ซึ่งจะถูกอธิบายในลำดับถัดไป

3.2 การผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม

การกระเจิงของสปีนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนตเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ GMR การกระเจิงของสปีนบริเวณรอยต่อมีค่าขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการจัดเรียงตัวของสปีนส่วนมาก (majority spin) และสปีนส่วนน้อย (minority spin) ระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต โดยทั่วไปในกระบวนการปลูกฟิล์มจะเกิดการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นวัสดุซึ่งนำไปสู่ความไม่ต่อเนื่องของอะตอมในบริเวณรอยต่อ ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของการแพร่และผสมกันของอะตอมที่ส่งผลต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปีน โดยการพิจารณาผลของค่าความกว้างบริเวณรอยต่อซึ่งแสดงถึงความกว้างของการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.5 นาโนเมตร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า RA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นตามความกว้างของบริเวณรอยต่อ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปีนบริเวณรอยต่อ การเปลี่ยนแปลงค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่เกิดขึ้นจากผลของความไม่ต่อเนื่องของอะตอมบริเวณรอยต่อแสดงตามภาพประกอบ 3.7 ซึ่งจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าธรรมชาติของรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์การส่งผ่านสปีน ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็น

เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของการกระเจิงบริเวณรอยต่อจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานและค่าอัตราส่วน MR



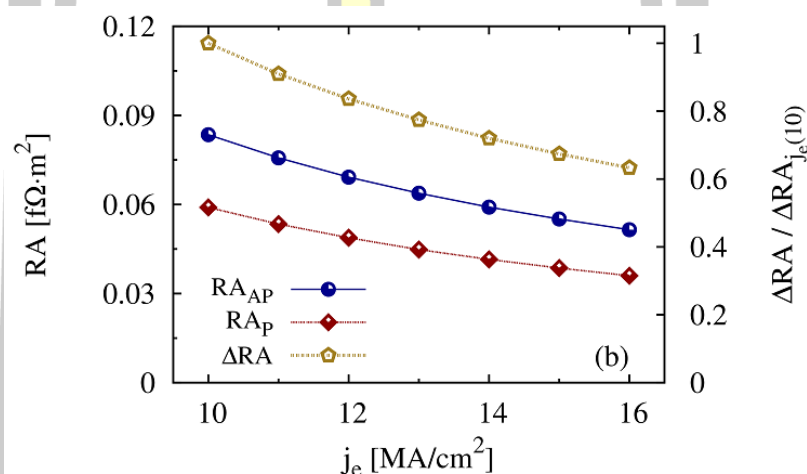
ภาพประกอบ 3.7 การเปลี่ยนแปลงค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความกว้างของการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม

จากการพิจารณาความกว้างของการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มที่มีต่อค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

3.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก

ปรากฏการณ์ GMR มีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนผ่านโครงสร้างสปินวาล์วจึงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญและส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อค่า RA ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามและค่า ΔRA ในโครงสร้าง $Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)$ โดยในหัวข้อนี้ได้กำหนดความกว้างของการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มเท่ากับ 1 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกตั้งแต่ 10 ถึง 16 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า RA และ ΔRA มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.8 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการส่งผ่านสปินที่

สูง ส่งผลทำให้เกิดการลดลงของ ΔRA เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับปรากฏการณ์สปินทอร์ก กล่าวคือการส่งผ่านกระแสสปินโพลาเซชันในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามจะทำให้เกิดการการส่งผ่านสปินทอร์กจากกระแสสปินกระทำกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ จากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนดังกล่าวทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระถูกเหนี่ยวนำตามทิศทางของกระแสสปินและไม่ได้จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่า ΔRA มีค่าลดลง ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA จึงมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง [13], [141]



ภาพประกอบ 3.8 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า RA_P RA_{AP} และค่า ΔRA ในโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)

นอกจากการพิจารณาค่าความกว้างของการผสมกับของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกที่ส่งผลต่อค่า MR และปรากฏการณ์ GMR ในลำดับถัดไปเป็นการศึกษาพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร นอนแมกเนต และความหนาของชั้นฟิล์มที่ส่งผลปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินและค่า GMR

3.4 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและความหนาของชั้นอิสระที่มีผลต่อค่า GMR

หัวข้อข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงคือหัวข้อที่สามารถแสดงค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณบิต 0 และ 1 ได้อย่างชัดเจนหรือมีค่าอัตราส่วน MR ที่สูง สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ง่ายและมีค่า RA ที่ต่ำ [51], [163] ปัจจุบันโครงสร้างสปินวาล์วของหัวข้อข้อมูลใช้การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน MR จากการใช้ปรากฏการณ์การทะลุผ่านของสปิน โดยการใช้ชั้นฉนวนบางเป็นชั้นคั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระซึ่งโครงสร้างรอยต่อแบบทะลุผ่านซึ่งทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่า

โครงสร้างหัวอ่านแบบ GMR [147] อย่างไรก็ตามค่า RA ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบ MTJ มีค่าที่สูงกว่าโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR เนื่องจากผลของค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นฉนวน ทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการอ่านข้อมูลการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุของการบันทึกข้อมูลและการตรวจจับสัญญาณของหัวอ่าน จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันมีการศึกษาปรากฏการณ์ GMR ที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงเทียบเท่ากับโครงสร้าง MTJ และมีค่า RA ที่ต่ำ [51] ซึ่งนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหลากหลายชนิดเช่น วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรบริสุทธิ์ [59] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบผสม [164], [165] และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ (Heusler alloy) [141], [166], [167] เพื่อหาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูล

ในปัจจุบันการศึกษาค่า CPP-GMR ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการทดลอง [14], [168] เพื่อหาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตที่ทำให้เกิดค่า GMR ที่สูงและมีค่า RA ที่ต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองมีความยุ่งยากและความซับซ้อนในขั้นตอนการปลูกผลึกและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ จากเหตุผลดังกล่าวนำไปสู่การพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณและมีความสะดวกต่อการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีต่อค่า GMR

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติการส่งผ่านสปิน ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้าง CPP-GMR โดยในลำดับแรกจะทำการศึกษาผลของค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ส่งผลต่อค่า ΔRA และอัตราส่วน MR เนื่องจากค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปินวาล์วจากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหกชนิดได้แก่ วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ (cobalt, Co) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรปกติ วัสดุแม่เหล็กนิกเกิล-ไอรอน (nikle-iron, NiFe) และวัสดุโคบอลต์-ไอรอน (cobalt-iron, CoFe) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบผสมและวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์-ไอรอน-ซิลิกอน (cobalt-iron-silicon, Co_2FeSi) วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์-ไอรอนอะลูมิเนียม (cobalt-iron- aluminium, Co_2FeAl) และโคบอลต์-ไอรอนอะลูมิเนียมซิลิกอน (cobalt-iron-aluminium-silicon, $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}$) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ การศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแต่

ละชนิดจะช่วยให้เข้าใจกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ GMR และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า RA ซึ่งความเข้าใจพื้นฐานของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้สามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปในอนาคตได้

3.4.1 ผลของค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าที่มีต่อปรากฏการณ์ GMR

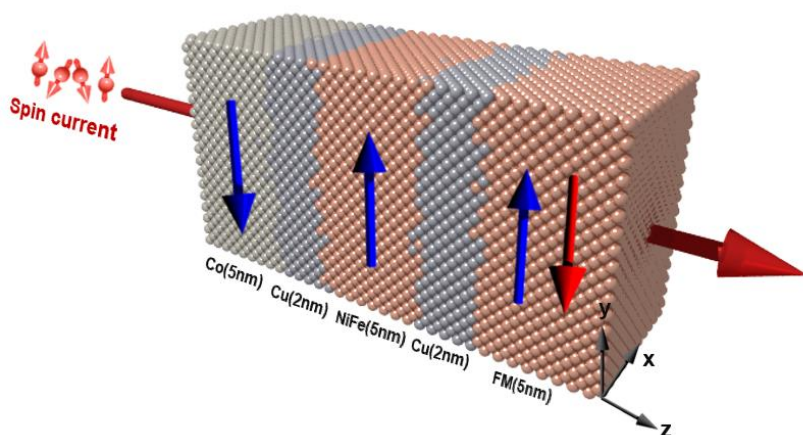
ปรากฏการณ์ GMR มีค่าขึ้นอยู่กับกระเจิงของสปินจากการเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว การกระเจิงของสปินสามารถแบ่งได้สองลักษณะคือการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต โดยการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระและความสัมพันธ์ของการจัดเรียงโครงสร้างของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุนอนแมกเนต ในขณะที่การกระเจิงของสปินภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุ การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำของกระแสไฟฟ้าและแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินนำไปสู่การเกิดกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่จากชั้นพินไปสู่ชั้นอิสระ โดยความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้า (spin polarisation of conductivity, β) ของวัสดุ กล่าวคือเมื่อค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุมีค่าเท่ากับหนึ่ง กระแสสปินโพลาไรซ์ทุกตัวจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางและมีแนวโน้มจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ

โดยทั่วไปค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของความนำไฟฟ้าถูกพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลงดังสมการ

$$\beta = \frac{\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}}{\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}} \quad (3.4)$$

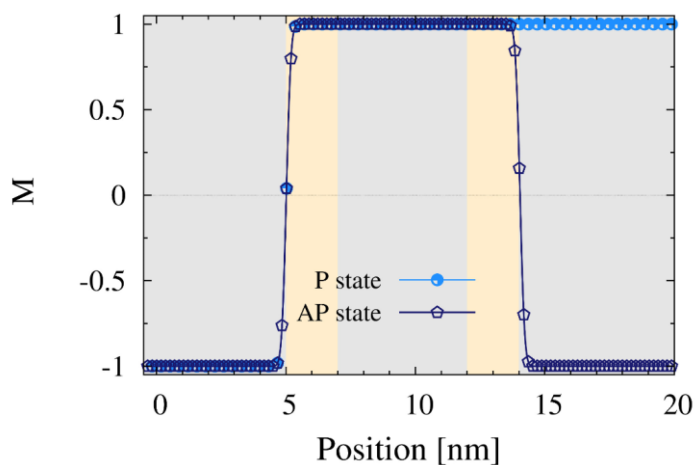
เมื่อ $\sigma_{\uparrow(\downarrow)}$ คือความนำไฟฟ้าของสปินขึ้น (สปินลง) โดยค่าความนำไฟฟ้าของสปินมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะของสปินที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.4) แสดงให้เห็นว่าค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง -1 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะของสปินที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ในขณะที่ค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุนอนแมกเนตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากความเท่ากันของความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี

ในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาผลของค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าที่มีต่อพฤติกรรม การส่งผ่านสปินจากการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่น 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างของสปีนวาล์วที่ประกอบไปด้วย Co(5nm)/Cu(2nm)/ NiFe(5nm)/Cu(2nm)/FM(5nm) ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.9 (ก) โดยกำหนดความกว้างบริเวณ รอยต่อเท่ากับ 1 นาโนเมตร การพิจารณาการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มใน หัวข้อนี้ใช้การพิจารณาตามกฎของฟิสิกส์ การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มใช้การ พิจารณาแบบโครงสร้างแอนติแม่เหล็กเฟอร์โรสิ่งเคราะห์เพื่อลดความผันผวนของสปินภายในชั้นฟิล์ม เนื่องจากผลของความร้อน [45], [46] โครงสร้างของ SAF ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มและชั้นอ้างอิง (reference layer, RL) ที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเนต โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายใน โครงสร้าง SAF จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามเสมือนวัสดุแอนติแม่เหล็กเฟอร์โร ทิศทางของแมกนี- ไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและชั้นอ้างอิงจัดเรียงตัวในทิศทาง $-y$ และ $+y$ ตามลำดับ ในขณะที่แมกนีไทเซ- ชันภายในชั้นอิสระสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ระนาบของ yz



(ก)

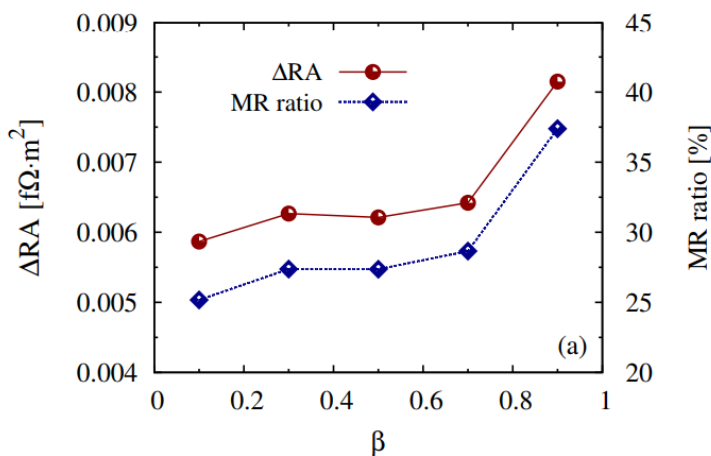
พหุ ประถมศึกษา



(ข)

ภาพประกอบ 3.9 (ก) โครงสร้างของสปีนวาล์วที่ประกอบด้วย Co(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm)/Cu(2nm)/FM(5nm) โดยลูกศรสีแดงและสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแม่เหล็กเฟอร์โร (ข) การเปลี่ยนแปลงขนาดของแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่ง

การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในทิศทางขนานและตรงกันข้ามใช้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเทียบกับชั้นอ้างอิง การเปลี่ยนแปลงขนาดของแมกนีไทเซชันของวัสดุแต่ละชั้นต่อตำแหน่งแสดงตามภาพประกอบ 3.9 (ข) ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 ในขณะที่ค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้า (β) ถูกปรับค่าตั้งแต่ 0.1 – 0.9 ในขณะที่ค่าระยะการแพร่ของสปีนภายในชั้นนอนแมกเนตมีค่าเท่ากับ 600 นาโนเมตรและค่าคงที่การแพร่ของอะตอมมีค่าเท่ากับ 0.005 ตารางเมตรต่อวินาที การเปลี่ยนแปลงของค่า ΔRA และอัตราส่วนค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแสดงตามภาพประกอบ 3.10 จากผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เนื่องจากการกระเจิงของสปีนภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ CPP-GMR มีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุ [24], [47]–[49] โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 48 เมื่อค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 0.9



ภาพประกอบ 3.10 ค่า ΔRA และอัตราส่วนค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสปินโพลาริเซชันของควมนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

จากการศึกษาค่าสปินโพลาริเซชันของควมนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อค่า ΔRA และอัตราส่วนค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์ว ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.2 ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อปรากฏการณ์ GMR

ปรากฏการณ์ GMR ถูกค้นพบในครั้งแรกจากการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่มีเหล็กประกบติดกับโครเมียม (Fe/Cr) โดยเหล็กเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรปกติและโครเมียมเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก [23], [24] การค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาค่า GMR ในโครงสร้างแม่เหล็กเฟอร์โรเชื่อมติดกับวัสดุนำไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กชนิดต่างๆ เพื่อหาชนิดของวัสดุที่ให้ค่าอัตราส่วน MR ที่สูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าโครงสร้างแม่เหล็กหลายชั้นของโคบอลต์และทองแดง $(Co/Cu)_{60}$ แสดงค่า GMR สูงสุด โดยมีค่าประมาณร้อยละ 65 ที่อุณหภูมิห้อง [32] นอกจากการศึกษารูปแบบปรากฏการณ์ GMR ยังมีการค้นพบค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างรอยต่อของการทะลุผ่าน (MTJ) ซึ่งประกอบด้วยชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นฉนวนไฟฟ้า (FM/IS/FM) ซึ่งค่า TMR จะมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่า GMR ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้าง $CoFeB/MgO/CoFeB$ มีค่าสูงถึงร้อยละ 604 ที่อุณหภูมิห้อง [3] จากผลการทดลองดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์

TMR ในกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และโครงสร้าง MTJ ของหัวอ่าน และหัวเขียนข้อมูลในหน่วยความจำ MRAM ในปัจจุบัน

อย่างไรก็ตามตามความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันนำไปสู่ข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ TMR ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลที่ใช้โครงสร้างแบบ MTJ มีค่า RA ที่สูง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านสเปซเซอร์ที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีค่า RA ที่สูงจะทำให้มีความเร็วในการอ่านข้อมูลที่ต่ำและมีค่าสัญญาณรบกวนจากความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือปรากฏการณ์ความร้อนของจูล (Joule heating) ที่สูง [169], [170] โดยทั่วไปหัวอ่านข้อมูลแบบ MTJ มีค่า RA ประมาณ 1000 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและค่าอัตราส่วนสัญญาณขาออกต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) ของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลปริมาณสูง (ultra-high recording density HDD) หรือมีความจุข้อมูลที่มากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว ค่า RA ของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าไม่เกิน 100 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในปรากฏการณ์ GMR ที่มีค่า RA ที่ต่ำกว่า 100 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร [19], [51] สำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลปริมาณสูง

ปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าเลือกใช้ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมในโครงสร้าง CPP-GMR กำลังได้รับความนิยมและถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างสปีนวาล์ว ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ [59] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบผสม [164], [165] และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ฮอยเลอร์อัลลอยด์ (Heusler alloy) [64], [66], [69], [108], [113], [114], [171] โครงสร้างวัสดุแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ที่ใช้พื้นฐานเป็นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ (Co-based full-Heusler) เป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสำคัญและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการตลาด เช่น $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ [163], [166], [172], [173] $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ [70], [174] และ $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})$ [108], [114], [175] เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงและมีค่า RA ที่ค่อนข้างต่ำ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ฮอยเลอร์อัลลอยด์เป็นวัสดุที่มีการส่งผ่านสปีนที่ดี โดยมีค่าสปีนโพลาไรเซชันที่ระดับพลังงานเฟอร์มีร้อยละ 100 ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของความหนาแน่นทางสถานะของสปีนขึ้นและสปีนลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (density of state, DOS) กล่าวคือเมื่อแถบพลังงานของสปีนขึ้นมีคุณสมบัติการจัดเรียงตัวแบบโลหะ แถบพลังงานของสปีนลงจะมีคุณสมบัติแบบกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ค่าสปีนโพลาไรเซชันของวัสดุมีค่าเท่ากับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม

การศึกษาปรากฏการณ์ GMR และคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแต่ละชนิดในเชิงการทดลองนั้น มีข้อจำกัด เนื่องจากมีขั้นตอนการปลูกฟิล์มและมีวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแม่เหล็กและการส่งผ่านสปินของวัสดุที่ซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของค่าการสะสมสปินสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและการเปรียบเทียบค่า RA และค่าอัตราส่วน MR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสามชนิดคือ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรผสมและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์เป็นชั้นอิสระ เพื่อหาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูล

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ

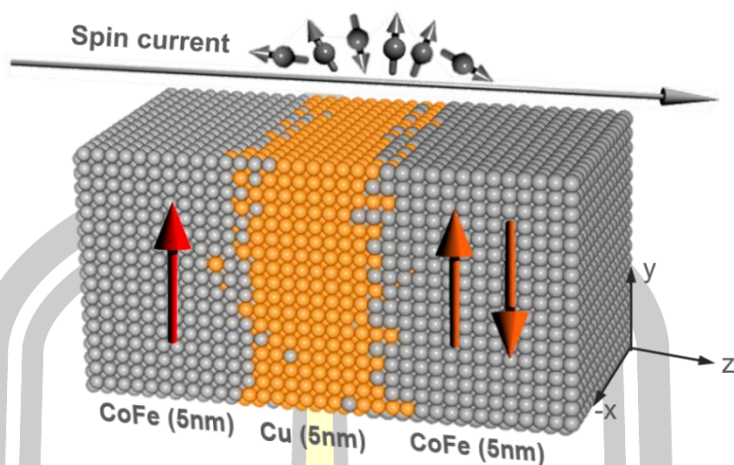
ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก	ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร					
	แม่เหล็กเฟอร์โร	แม่เหล็กเฟอร์โรผสม		แม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์		
		Co	NiFe	CoFe	Co ₂ FeSi (CFS)	Co ₂ FeAl (CFA)
$N_{\uparrow}(E_F)$ state/eV/f.u.	1.25	1.6	9	0.714	0.862	0.755
$N_{\downarrow}(E_F)$ state/eV/f.u.	0.2	0.2	16	2.476	0.059	0.399
m_{∞} (C/m ³)	39.45	111.8	261.5	15.714	6.804	3.092
β	0.5	0.7	0.56	0.86	0.99	0.92
β'	0.9	0.95	0.73	0.957	0.863	0.853
D_0 [cm ² /s]	30	7.25	10	10	10	10
λ_{sdl} [nm]	60	5	12	1.7	3	3
k_u ($\times 10^{-24}$ J/atom)	6.69	2.5	2.456	0.283	6.136	9.0261
J_{ij} ($\times 10^{-21}$ J/link)	6.064	5.89	7.735	4.89	4.8	5.109
สปินโมเมนต์ (μ_B)	1.72	1.7	2.5	5.541	4.993	5.376
อุณหภูมิคูรี (K)	1388	873	1145	1120	1100	1170
อ้างอิง	[76]	[76]	[176], [177], [168]	[73], [178]	[73], [178]	[70], [73], [178]

พฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (density of state, DOS) โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยอ้างอิงจากการทดลองและวิธีการคำนวณแบบ *ab initio* ซึ่งแสดงตามตารางที่ 3.2 โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์ β β' และ m_{∞} ของวัสดุ Cu มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีค่าที่เท่ากัน

โดยทั่วไปปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์ว ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินและคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในหัวอ่านข้อมูล ในลำดับแรกจะทำการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

1) การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น

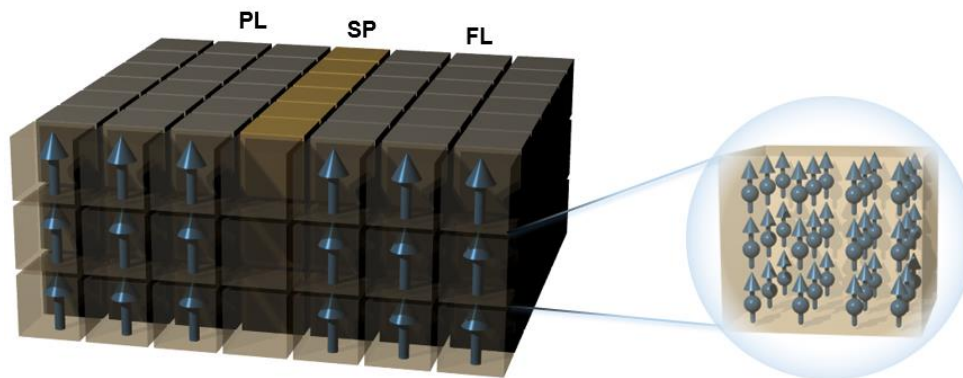
การศึกษาพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินของวัสดุสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของการสะสมสปินและกระแสสปินตามสมการที่ (2.31) และ (2.29) ซึ่งการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและกระแสสปินนำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ในลำดับแรกจะทำการศึกษาค่าการสะสมสปินและกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ซึ่งมีการจัดเรียงโครงสร้างของอะตอมภายในหน่วยเซลล์แบบลูกบาศก์แบบกลางหน้า (face centered cubic, FCC) เพื่อคำนวณค่า RA Δ RA และอัตราส่วน MR จากนั้นนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการศึกษาที่ผ่านมา โดยจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กซึ่งแสดงตามภาพประกอบ 3.11 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแกน y ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในสถานะขนานและตรงกันข้ามจะจัดเรียงตัวในทิศทาง $+y$ และ $-y$ ตามลำดับ นอกจากนี้แบบจำลองจะทำการพิจารณาการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มที่บริเวณรอยต่อเพื่อความเสมือนจริง โดยการพิจารณาความน่าจะเป็นของการจัดเรียงของอะตอมบริเวณรอยต่อตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.3 ซึ่งการศึกษานี้ได้กำหนดความกว้างของการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อให้มีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 3.11 โครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ที่พิจารณาการผสมกันของอะตอมที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ลูกศรสีแดงและส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก CoFe

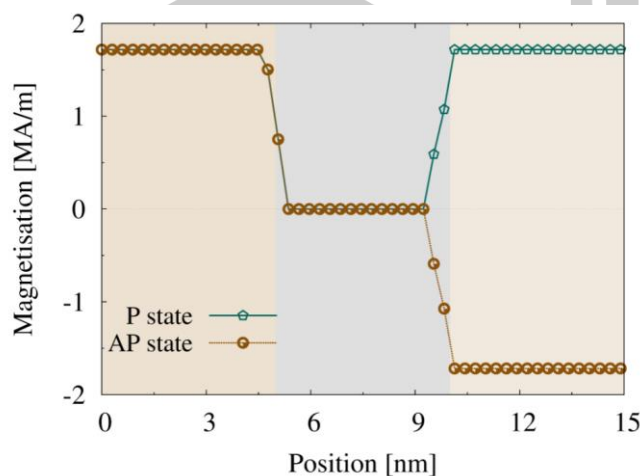
การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างสปินวาล์วสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน ซึ่งพิจารณาได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินซึ่งเป็นการพิจารณาระดับจุลภาค โดยแบบจำลองในระดับอะตอมจะใช้ในการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชัน จากนั้นจะนำแบบจำลองการสะสมสปินมาพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุ การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินสามารถทำได้โดยแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นออกเป็นเซลล์เล็กๆ ซึ่งเรียกว่าไมโครเซลล์ (microcells) โดยกำหนดให้แต่ละไมโครเซลล์มีปริมาตรเท่ากับ $1 \times 1 \times 0.3$ ลูกบาศก์นาโนเมตร ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กภายในตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างสปินวาล์วซึ่งสามารถคำนวณจากผลรวมของสปิน (spin moments) ภายในไมโครเซลล์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.12

พหุ ประถม ชาติ ชีวะ



ภาพประกอบ 3.12 การจำลองการแบ่งโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นออกเป็นไมโครเซลล์เพื่อทำการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ

การพิจารณาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุถูกอธิบายจากทิศทางของสปินโมเมนต์ภายในไมโครเซลล์ โดยค่าแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับผลรวมของค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าค่าแมกนีไทเซชันจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มเนื่องจากการผสมกันของอะตอมของวัสดุแม่เหล็กและนอนแมกเนต โดยค่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นนอนแมกเนตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ การเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้ามสามารถพิจารณาได้ดังภาพประกอบ 3.13

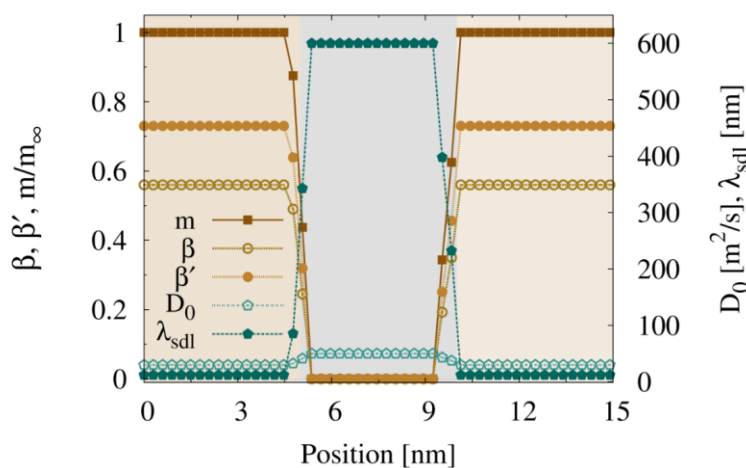


ภาพประกอบ 3.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)

จากการพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตภายในตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันของวัสดุ ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุเชิงตำแหน่ง โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของอะตอมในแต่ละไมโครเซลล์ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) แสดงตามภาพประกอบ 3.14 โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ CoFe จะมีค่าคงที่ภายในบิลค์ (bulk) และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเนื่องจากการลดลงของโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจากการผสมกันของอะตอมของวัสดุต่างชนิด การพิจารณาพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุต่อตำแหน่งคำนวณได้จากสมการ

$$P(x) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (3.5)$$

เมื่อ $P(x)$ คือค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ตำแหน่ง x
 p_i คือค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินภายในไมโครเซลล์
 n คือจำนวนของสปินภายในไมโครเซลล์



ภาพประกอบ 3.14 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)

จากการพิจารณาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของ

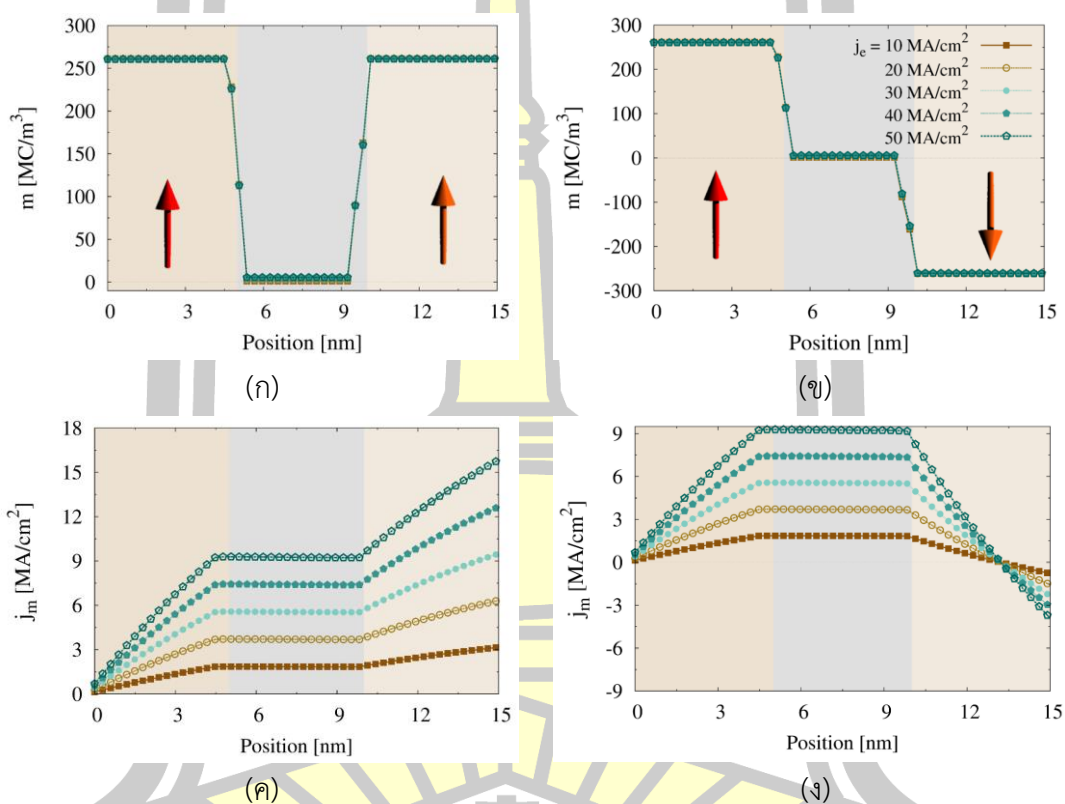
กระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการสะสมสปีนและกระแสสปีนภายในโครงสร้างวัสดุ โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

2) การคำนวณพฤติกรรมกระแสสปีนในโครงสร้าง CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์กระแสสปีนของวัสดุ ในลำดับถัดไป จะทำการศึกษาพฤติกรรมกระแสสปีนภายในโครงสร้างวัสดุ โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้า (current density, j_c) ที่มีต่อการสะสมสปีนและค่ากระแสสปีน โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 10 ถึง 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการศึกษาพบว่ากระแสสปีนจะมีทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุและจะมีค่าเข้าสู่ค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุ ในกรณีที่ชั้นวัสดุมีความหนาแน่นสูงและมีค่าใกล้เคียงกับระยะการแพร่กระจายของสปีน โดยค่าการสะสมสปีนจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและมีค่าลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นวัสดุบนแมกเน็ต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนภายในชั้นบนแมกเน็ตพบว่าความหนาแน่นของค่ากระแสไฟฟ้าจะส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของค่าการสะสมสปีน กล่าวคือการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูง (50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) ค่าการสะสมสปีนจะต้องใช้ระยะทางในการปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อเข้าสู่ค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลมากกว่าการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปีนออกจากสภาวะสมดุลและการส่งผ่านสปีนที่สูง โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนที่เป็นฟังก์ชันของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อตำแหน่งในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามดังแสดงตามภาพประกอบ 3.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อกระแสสปีนภายในโครงสร้างวัสดุ พบว่าสปีนภายในกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นจะมีทิศทางแบบสุ่มหรือค่ากระแสสปีนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากกระแสสปีนเริ่มต้นถูกส่งผ่านจากชั้นวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสู่ชั้นพิน เมื่อกระแสสปีนที่มีทิศทางแบบสุ่มเคลื่อนที่ผ่านชั้นพินจะเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ระหว่างสปีนของอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้สปีนภายในกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ซึ่งส่งผลให้กระแสสปีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ชั้นพิน โดยทิศทางของค่ากระแสสปีนจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซ-

ชั้นภายในวัสดุ ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.15 (ค) และ (ง) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแส-สปีนในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปีนต่อตำแหน่งจะมีค่าแปรผันตามความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าสปีนโพลาริเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุและอัตราค่าการสะสมสปีนเชิงตำแหน่ง ซึ่งค่ากระแส-สปีนจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่ากระแสสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุที่ระยะการแพร่ของสปีน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปีนภายในชั้นนอนแมกเนตมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงเนื่องจากวัสดุนอนแมกเนตไม่มีคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนและมีระยะการแพร่ของสปีนที่มีค่าสูง

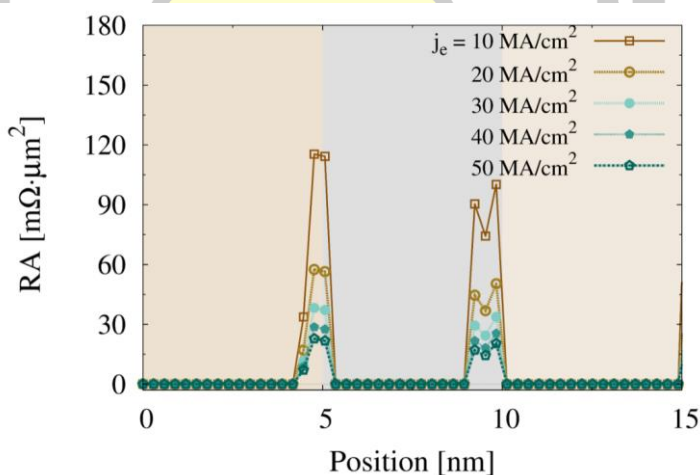


ภาพประกอบ 3.15 ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการสะสมสปีน (ก) ในโครงสร้างแบบขนานและ (ข) ในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามและกระแสสปีน (ค) ในโครงสร้างแบบขนานและ (ง) ในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามในโครงสร้างวัสดุ CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm)

จากการพิจารณาผลของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนและกระแสสปีนในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับต่อไปจะทำการคำนวณค่า RA ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น จากพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนต่อตำแหน่งหรือค่า Δm และขนาดของกระแสสปีน โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

3) ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า RA และ ΔR_A

การศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance area product, RA) ของโครงสร้างสปีนวาล์วซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ หัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสำคัญต่อการเลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการอ่านข้อมูล ลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า RA ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก CoFe(5nm)/Cu(5nm)/CoFe(5nm) ในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีการเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม โดยทำการป้อนค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 10 ถึง 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากการศึกษาพบว่าค่า RA ประกอบไปด้วยสองส่วนคือค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุบัลค์ (bulk) และค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อ โดยค่าความต้านทานภายในชั้นวัสดุหรือบริเวณที่ห่างจากบริเวณรอยต่อจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนจะมีค่าค่อนข้างคงที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานมีค่าน้อยมากและเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากความต่อเนื่องของแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนของวัสดุ ในขณะที่ค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงเนื่องจากความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ดังนั้นค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อจะเป็นค่าความต้านทานที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของโครงสร้างทั้งหมด ดังแสดงในภาพประกอบ 3.16

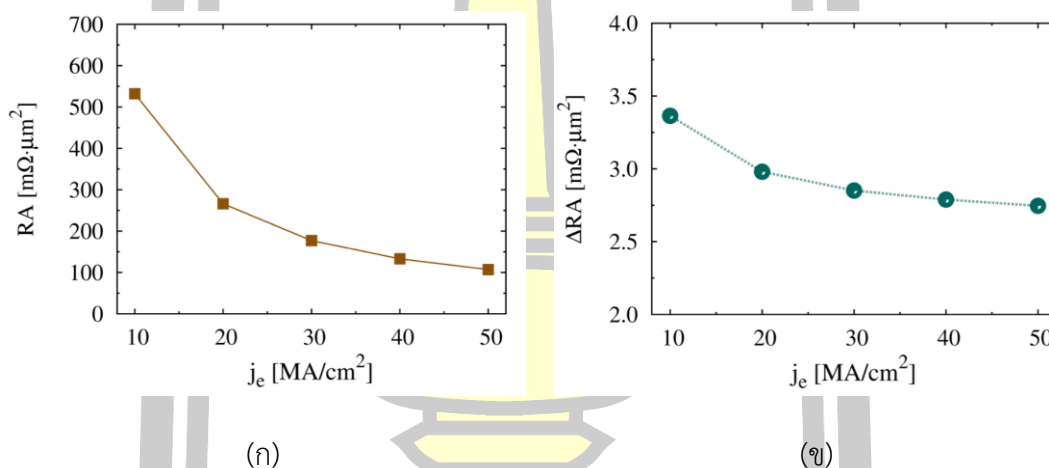


ภาพประกอบ 3.16 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชิงตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาผลของค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อพบว่า ค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อจะมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอก เนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้เกิด

กระแสสปินโพลาร์ไรซ์ที่มีค่าสูงและทำให้ค่าความต้านทานเชิงพื้นที่มีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่ากระแสสปินของโครงสร้างยังมีค่าแปรผันตามค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นขนาดของค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อจึงมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น

จากนั้นจะทำการคำนวณค่า RA รวมของโครงสร้างสปีนวาล์วจากผลรวมของค่า RA ในทุกๆ ตำแหน่งของโครงสร้าง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า RA มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูงทำให้เกิดค่ากระแสสปินและการส่งผ่านสปินที่สูง โดยค่า RA มีค่าลดลงร้อยละ 80 เมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของค่ากระแสไฟฟ้าภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.17 (ก)



ภาพประกอบ 3.17 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) ค่า RA ในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและ (ข) ค่า Δ RA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก

จากการพิจารณาค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อค่า RA ในลำดับถัดไปคือการพิจารณาค่า Δ RA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จากการคำนวณความต่างของค่า RA ในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม ผลการศึกษาพบค่า Δ RA มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมีค่าลดลงร้อยละ 30 เมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงผ่านโครงสร้างสปีนวาล์วจะทำให้เกิดการส่งผ่านสปินที่สูง ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.17 (ข)

การป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงผ่านโครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในแกน x และ z หรือการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันออกจากแกน y เนื่องจากปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ก โดยองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในแนวแกน x และ z จะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอก ซึ่งการเคลื่อนที่ออกนอกแกน y จะทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามแบบสมบูรณ์ ดังนั้นค่า ΔRA จึงมีค่าที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าภายนอก โดยผลการคำนวณแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า ΔRA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของกระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง [38],[68]

จากการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อค่า RA และค่า ΔRA ของโครงสร้างสปินวาล์ว $CoFe/Cu/CoFe$ ข้างต้น พบว่ากรณีที่มีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นขนาด 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะทำให้เกิดค่า RA และ ΔRA เท่ากับ 127 และ 2.5 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาในเชิงการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่าประมาณ 100 – 200 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตรและ 0.5-2 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ตามลำดับ [44], [69] ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่เหมาะสมซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นชั้นอิสระในโครงสร้าง $Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm)$ โดยพิจารณาผ่านค่า RA ΔRA และอัตราส่วน MR โดยในส่วนนี้จะทำการพิจารณาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ส่งผลต่อการส่งผ่านสปิน กรณีที่กระแสไฟฟ้าภายนอกมีความหนาแน่นเท่ากับ 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลองจากผลการศึกษาในกรณีที่ผ่านมา

4) ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR

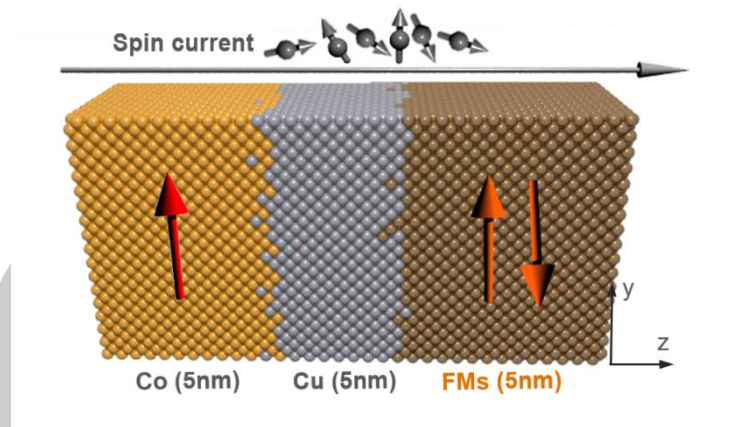
โดยทั่วไปปรากฏการณ์ GMR ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปินภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนต โดยการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าขึ้นอยู่กับการส่งผ่านสปินของวัสดุ ซึ่งการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีความเหมาะสมที่ทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการพัฒนาหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคต ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ใช้เป็นชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA ΔRA และอัตราส่วน MR จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ เพื่อหาชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีความเหมาะสมต่อการออกแบบหัวอ่านข้อมูลในอนาคต

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินผ่านการคำนวณค่า RA และอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปีนวาล์วที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรต่างชนิดกัน โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นขนาด 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุสามชั้น Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) และทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ใช้เป็นชั้นอิสระจำนวนหกชนิด ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ (Co) วัสดุแม่เหล็กนิกเกิลไอรอน (NiFe) และวัสดุโคบอลต์ไอรอน (CoFe) วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนซิลิกอน (cobalt-iron-silicon, Co₂FeSi) วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนอะลูมิเนียม (Co₂FeAl) และโคบอลต์ไอรอนอะลูมิเนียมซิลิกอน (Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}) คุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแต่ละชนิดแสดงตามตารางที่ 3.2 ในหัวข้อ 3.4.2 ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน	ชนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร					
	แม่เหล็กเฟอร์โร	แม่เหล็กเฟอร์โรผสม		แม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์		
		Co	NiFe	CoFe	Co ₂ FeSi (CFS)	Co ₂ FeAl (CFA)
m_{∞} [MC/m ³]	39.45	111.8	261.5	15.714	6.804	3.092
β	0.5	0.7	0.56	0.86	0.99	0.92
β'	0.9	0.95	0.73	0.957	0.863	0.853
D_0 [cm ² /s]	30	7.25	10	10	10	10
λ_{sdl} [nm]	60	5	12	1.7	3	3
อ้างอิง	[76]	[76]	[168]	[73], [178]	[73], [178]	[70], [73], [178]

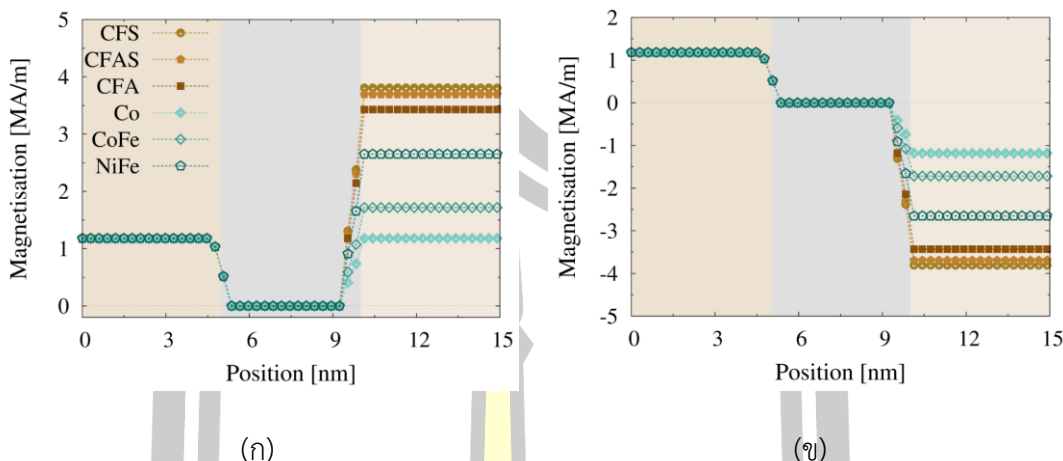
แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ทำการพิจารณาจะมีการจัดเรียงตัวดังแสดงตามภาพประกอบ 3.18 โดยแมกนีไทเซชันภายในชั้นพื้นจะถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวในแนวแกน +y และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในกรณีจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้าม จะมีทิศทางตามแนวแกน +y และ -y ตามลำดับ นอกจากนี้เพื่อความเสมือนจริงของการจำลองโครงสร้างสปีนวาล์ว จะทำการกำหนดความกว้างของบริเวณรอยต่อที่เกิดจากการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มเท่ากับ 1 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 3.18 โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น Co(5nm)/ Cu(5nm)/FMs(5nm) ลูกศรสีแดงและสีส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระตามลำดับ

ในการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะทำการพิจารณาแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุทั้งสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้ามเป็นลำดับแรก โดยทำการจำลองโครงสร้างวัสดุในระดับอะตอมซึ่งมีการคิดผลของการผสมกันระหว่างอะตอมที่บริเวณรอยต่อ โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัวที่แตกต่างกัน ในการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากค่าสปินโมเมนต์ต่อปริมาตรของไมโครเซลล์ การเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุสามชั้นในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้ามแสดงตามภาพประกอบ 3.19 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กอิมิตัวของวัสดุ โดยวัสดุแม่เหล็กผสมแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์จะมีค่าแมกนีไทเซชันที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มทำให้เกิดความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนต

พูน ปณ ทิโต ชิว

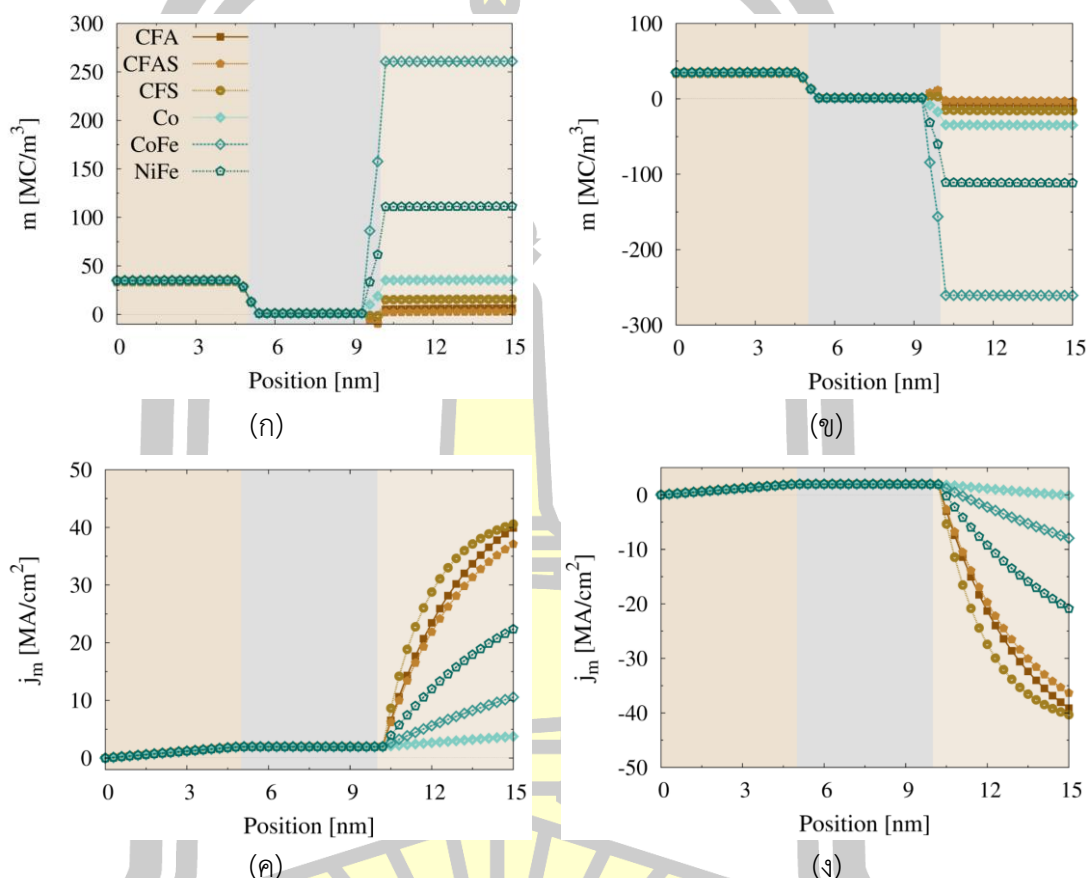


ภาพประกอบ 3.19 การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) ในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม

เมื่อทำการพิจารณาการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินของวัสดุต่อตำแหน่ง การเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งในกรณีทีแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ จัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้ามของโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) แสดงตามภาพประกอบ 3.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินภายในชั้นอิสระจะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแต่ละชนิด จากผลการคำนวณพบว่าการสะสมสปินจะมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุและมีค่าลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุนั้นๆ ในขณะที่การสะสมสปินภายในชั้นนอนแมกเนตจะมีค่าลู่เข้าศูนย์เนื่องจากค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุนอนแมกเนตมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะประมาณ 3 เท่าของระยะการแพร่ของสปิน

เมื่อพิจารณาคู่สมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อค่ากระแสสปิน พบว่าค่ากระแสสปินมีค่าเริ่มต้นจากศูนย์และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กเนื่องอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชัน โดยกระแสสปินจะมีแนวโน้มการจัดเรียงทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุและมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุทั้งในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.20 (ค) และ (ง) ตามลำดับ ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะการแพร่ของสปิน โดยกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS จะเข้าสู่ค่าสปินโพลาริเซชันอิ่มตัวได้เร็วกว่าวัสดุแม่เหล็ก

โคบอลต์ เนื่องจากวัสดุ CFS มีระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 1.7 นาโนเมตร ซึ่งน้อยกว่าวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ที่มีระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 60 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของค่ากระแสสปินจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบผสมฮอยเลอร์อัลลอยด์จะมีค่าที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น

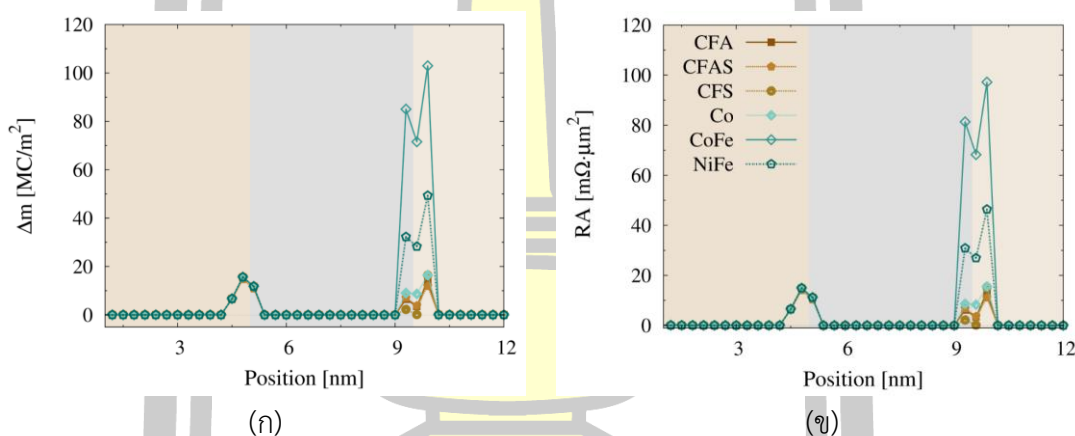


ภาพประกอบ 3.20 การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม และการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้าง (ค) แบบขนานและ (ง) แบบตรงกันข้าม ของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm)

เมื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่า RA ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปิน (Δm) และขนาดของกระแสสปิน เมื่อพิจารณาผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่า Δm ต่อตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) พบว่าค่า Δm จะมีขนาดสูงสุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเน็ต เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่

บริเวณดังกล่าวจะมีค่าที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่า Δm มีความไม่ต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม โดยโครงสร้างวัสดุ CoFe/Cu จะมีค่า Δm ที่สูงกว่าโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น เนื่องจากวัสดุ CoFe มีการสะสมสปินที่สถานะสมดุลที่สูงเมื่อเทียบกับค่าการสะสมสปินที่สถานะสมดุลของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.21 (ก)

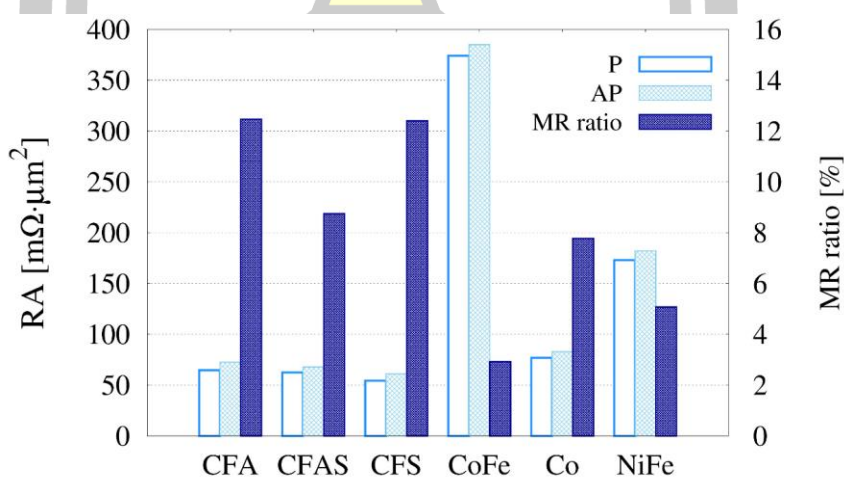
การพิจารณาค่า Δm และกระแสสปินถูกใช้เพื่อคำนวณค่า RA ตามความสัมพันธ์ที่ถูกแสดงในสมการที่ (2.36) จากผลการคำนวณพบว่าค่า RA แปรผันตรงกับค่า Δm และพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยค่า RA จะมีค่าสูงสุดในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ซึ่งโครงสร้างวัสดุ CoFe/Cu จะมีค่า RA ที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่นๆ ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.21 (ข)



ภาพประกอบ 3.21 (ก) การเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าการสะสมสปินและ (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า RA ต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/FMs(5nm) โดยชั้นวัสดุแม่เหล็ก FMs คือ Co NiFe CoFe CFS CFA และ CFAS

การพิจารณาค่า RA ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุนำไปสู่การคำนวณค่า RA รวมของโครงสร้างสปินวาล์ว ค่า RA รวมในโครงสร้างสปินวาล์วที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ เป็นชั้นอิสระ ในกรณีนี้แม่เหล็กชั้นจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้ามแสดงตามภาพประกอบ 3.22 จากผลการศึกษาพบว่าการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อส่งผลอย่างมากต่อการเกิดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่า RA [10] โดยค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานจะมีค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างแบบตรงกันข้าม เนื่องจากการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มในโครงสร้างแบบขนานจะมีค่าที่ต่ำ โดยการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์เป็นชั้นอิสระจะทำให้เกิดค่า RA ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์

มีค่าสปีนโพลาริเซชันที่สูง [70] ซึ่งทำให้กระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุมีการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เกิดกระแสสปินโพลาริเซชันที่สูงขึ้น จากนั้นกระแสสปินโพลาริเซชันดังกล่าวจะเคลื่อนที่ต่อไปยังชั้นอิสระและเกิดอันตรกิริยากับแมกนีไทเซชันในชั้นแม่เหล็กอิสระ โดยในกรณีที่กระแสสปินโพลาริเซชันมีค่าสูงจะทำให้เกิดค่าความต้านทานในโครงสร้างต่ำ โดยกลุ่มวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดฮอยเลอร์อัลลอยด์ CFA CFAS และ CFS มีค่า RA เท่ากับ 64 62 และ 54 มิลลิโอม์ตารางไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มวัสดุแม่เหล็ก Co NiFe และ CoFe ที่มีค่า RA เท่ากับ 77 173 และ 374 มิลลิโอม์ตารางไมโครเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างสปีนวาล์วที่ใช้วัสดุแม่เหล็ก CoFe เป็นชั้นอิสระจะมีค่า RA ที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กชนิดอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นวัสดุแม่เหล็ก CoFe มีค่าสปีนโพลาริเซชันที่ต่ำและมีค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลที่สูง ซึ่งทำให้เกิดค่า Δm ที่สูงและส่งผลทำให้มีค่า RA ที่สูง ผลการคำนวณมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าสภาพความต้านทานของโครงสร้างวัสดุจะแปรผกผันกับค่าสปีนโพลาริเซชันของวัสดุ โดยวัสดุ FeCoO ที่มีค่าสปีนโพลาริเซชัน 0.8 และ 0.35 จะมีค่าสภาพต้านทานของวัสดุประมาณ 15 ไมโครโอม์เซนติเมตรและ 76 ไมโครโอม์เซนติเมตร ตามลำดับ [179]



ภาพประกอบ 3.22 การเปรียบเทียบค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่าง ๆ

ในลำดับต่อไปจะทำการคำนวณค่าอัตราส่วน MR หรือค่า GMR ของโครงสร้างสปีนวาล์วจากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ เป็นชั้นอิสระ ผลการศึกษาพบว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ CFA CFS และ CFAS เป็นชั้นอิสระจะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.46 12.4 และ 8.74 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้วัสดุ

แม่เหล็กเฟอร์โร Co NiFe และ CoFe เป็นชั้นอิสระจะมีค่าอัตราส่วน MR เท่ากับร้อยละ 7.77 5.07 และ 2.92 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.22 จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าค่า RA มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินโดยมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์จะทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรบริสุทธิ์และแม่เหล็กเฟอร์โรผสม เนื่องจากมีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูง ซึ่งผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างวัสดุ CFS/Cu จะมีค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าโครงสร้าง NiFe/Cu [142]

จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์เป็นโครงสร้างสปินวาล์วทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูง เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น โดยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลที่มากกว่า 2 เทระบิตต่อตารางนิ้ว หัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่า RA ที่ต่ำกว่า 200 - 300 มิลลิโอมห์ตารางไมโครเมตร [14], [19], [51], [52] ซึ่งผลการคำนวณเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต อย่างไรก็ตามนอกจากคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่ส่งผลโดยตรงต่อสัญญาณการอ่านข้อมูลขนาดของเซนเซอร์ของหัวอ่านข้อมูลยังคงเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน MR เช่นกัน ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความหนาแน่นของชั้นอิสระที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณการอ่านข้อมูลที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.3 ความหนาแน่นของชั้นอิสระที่ส่งผลต่อค่า GMR

ปัจจุบันแนวโน้มการออกแบบให้อุปกรณ์การบันทึกข้อมูลมีขนาดเล็กลงแต่สามารถเพิ่มความจุข้อมูลได้มากขึ้นกำลังได้รับความสนใจและศึกษาอย่างกว้างขวาง การออกแบบให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลมากขึ้นทำได้โดยลดขนาดของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลให้เล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลให้มีค่าที่สูงขึ้น การลดขนาดของบิตข้อมูลนำไปสู่การลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งการลดขนาดดังกล่าวนอกจากจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลยังเป็นการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อีกด้วย

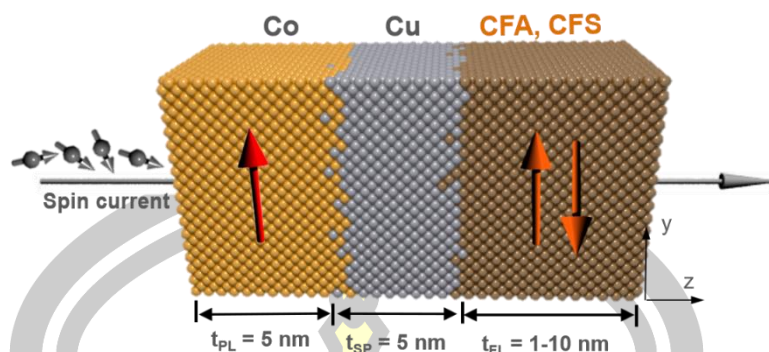
ในปัจจุบันขนาดของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าไม่เกินสองเท่าของขนาดบิตข้อมูลหรือมีค่าน้อยกว่า 100 นาโนเมตร [32] ซึ่งความหนาแน่นของชั้นอิสระที่ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณจากแผ่นบันทึกข้อมูลจะต้องมีขนาดที่ใกล้เคียงกับบิตข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากบิตข้อมูล

ข้างเคียง นอกจากนี้เพื่อความชัดเจนของการแสดงสัญญาณระหว่างบิต 0 และ 1 ค่า RA และ อัตราส่วน MR ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความต่างระหว่างค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 จำเป็นต้องมีค่าที่สูง ด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินและค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุแม่เหล็ก เฟอร์ไรต์ชนิดต่างๆ ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.4.2 พบว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ CFA และ CFS แสดง ค่าอัตราส่วน MR ประมาณร้อยละ 12 และมีค่า RA ที่ต่ำซึ่งมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิโอห์มตาราง ไมโครเมตร เนื่องจากวัสดุมีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุ แม่เหล็ก CFA และ CFS มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในอนาคต ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าความหนาของชั้นอิสระในโครงสร้างสปินวาล์วที่ทำจากวัสดุ แม่เหล็ก CFA และ CFS ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปิน ค่า RA และ ΔRA จากการประยุกต์ใช้ แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน

1) ความหนาของวัสดุ CFA และ CFS ที่มีต่อค่า ΔRA

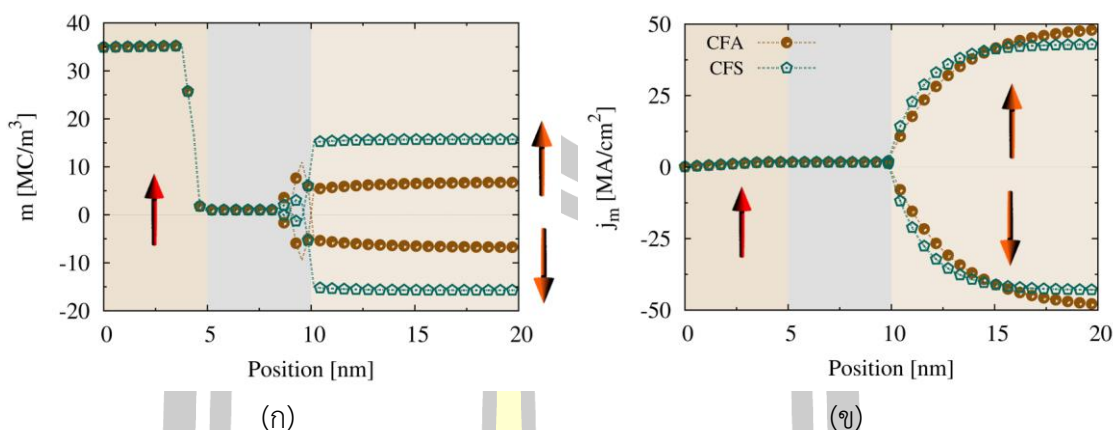
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุ เพื่ออธิบาย ผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาโครงสร้างสปินวาล์วสอง แบบได้แก่ โครงสร้าง Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(tF) และ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(tF) โดยทำการ ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นขนาด 50 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรในทิศทางตั้งฉาก กับระนาบโครงสร้างวัสดุตามแสดงในภาพประกอบ 3.23 และความหนาของชั้นอิสระจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 10 นาโนเมตร ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มกำหนดให้มีการจัดเรียงตามแนวแกน +y ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในสถานะขนานและตรงกันข้ามถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัว ตามแนวแกน +y และ -y ตามลำดับ นอกจากนี้เพื่อความเหมือนจริงของการจำลองโครงสร้างได้ กำหนดความหนาของการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มให้มีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 3.23 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_F), CFS(t_F) ลูกศรสีเทาแสดงทิศทางการป้อนกระแสไฟฟ้าและลูกศรสีแดงและสีส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

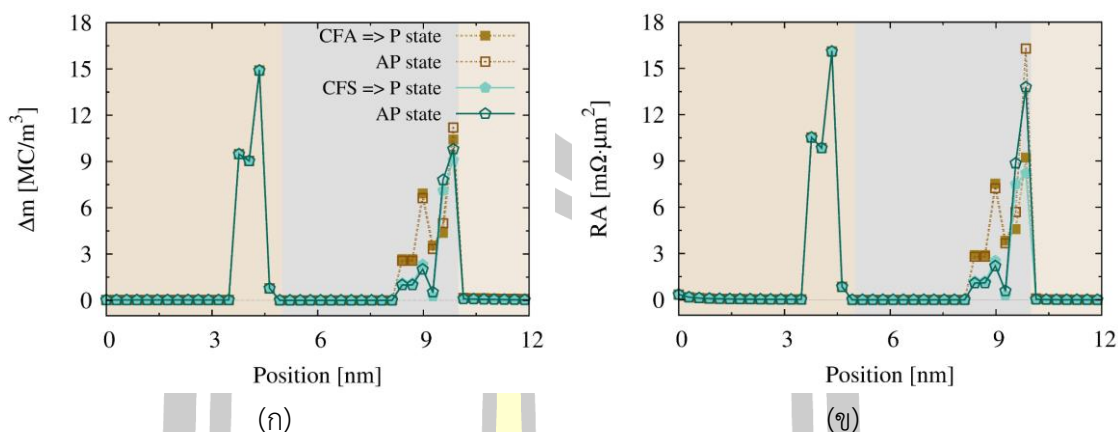
การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะสามารถพิจารณาได้จากการศึกษาพฤติกรรม การส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุ โดยคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและ กระแสสปินต่อตำแหน่ง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการสะสมสปินมีแนวโน้มจัดเรียงตัวไปใน ทิศทางของแมกนีไทเซชันและจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุในกรณีที่ชั้นวัสดุ แม่เหล็กเฟอร์โรมีความหนาที่มากพอและพบว่าที่บริเวณรอยต่อของการสะสมของสปินจะมีค่าไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.24 (ก) ในทำนองเดียวกันกระแสสปินจะมีแนวโน้มเรียงตัวไปตามทิศทาง ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นแรกและมีค่าค่อนข้างคงที่ในชั้นนอนแมกเนต จากนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังชั้นอิสระ โดยค่ากระแสสปินมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าลู่เข้าสู่ค่ากระแสสปิน- โพลารไรเซชันอิมิตัว (fully polarised spin current, βj_e) ของวัสดุและจะสังเกตเห็นว่าเมื่อชั้นอิสระ มีความหนาที่มากขึ้นกระแสสปินจะสามารถลู่เข้าสู่ค่าที่สภาวะอิมิตัว ซึ่งโดยทั่วไปความหนาของชั้น วัสดุจะต้องมีค่าประมาณ 3 เท่าของระยะการแพร่ของสปิน โดยจากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่ากระแสสปินโพลารไรเซชันอิมิตัวของวัสดุได้เร็วกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS มีค่า ระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 1.7 นาโนเมตรซึ่งที่ต่ำกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA ที่มีค่าเท่ากับ 3 นาโนเมตร โดยค่ากระแสสปินจะมีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับค่าสปินโพลารไรเซชันอิมิตัวของวัสดุเมื่อ ความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน ในขณะที่ค่าสปินโพลารไรเซชันอิมิตัวของ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA จะมีค่าที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS เนื่องจากค่าสปินโพลารไรเซชัน ของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA มีค่าสูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS ดังแสดงใน ภาพประกอบ 3.24 (ข)



ภาพประกอบ 3.24 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าการสะสมสปินและ (ข) ค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(10nm) และโครงสร้างวัสดุ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(10nm) ลูกศรสีแดงและส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและชั้นอิสระตามลำดับ

ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาค่า Δm เพื่อคำนวณค่า RA ของวัสดุ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า Δm มีค่าสูงสุดในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต โดยในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามจะทำให้เกิดค่า Δm ที่สูงกว่ากรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานดังแสดงตามภาพประกอบ 3.25 (ก) นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่า RA มีค่าแปรผันตรงกับ Δm โดยในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดค่า RA บริเวณรอยต่อที่สูงกว่ากรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนาน ซึ่งการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA เป็นชั้นอิสระจะทำให้เกิดค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อที่สูงกว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS เนื่องจากค่า Δm ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA มีค่าสูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS ดังแสดงในภาพประกอบ 3.25 (ข)

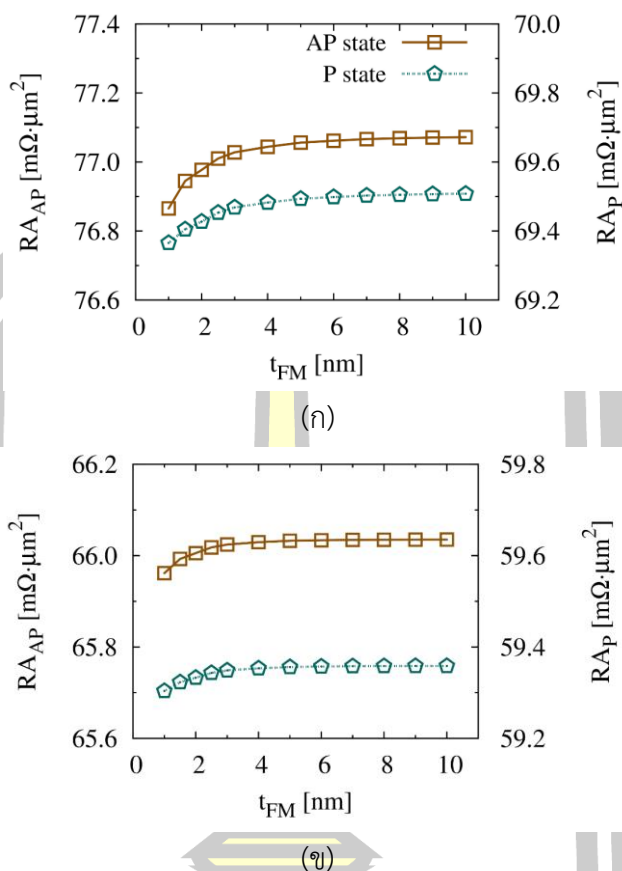
พหุ ประถม ชาติ ชีวะ



ภาพประกอบ 3.25 การเปลี่ยนแปลง (ก) ขนาดของ Δm และ (ข) ค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อเชิงตำแหน่งในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{CFA}(10\text{nm})$, $\text{CFS}(10\text{nm})$

จากการคำนวณค่า RA ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างวัสดุในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA รวมของโครงสร้างสปีนวาล์ว ผลการคำนวณค่า RA รวมในโครงสร้างสปีนวาล์ว $\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{CFA}(t_F)$ และ $\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{CFS}(t_F)$ แสดงให้เห็นว่าค่า RA รวมทั้งในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าแปรผันตามกับความหนาของชั้นอิสระ โดยในกรณีที่ความหนาของชั้นอิสระมีค่าต่ำ ค่า RA รวมของโครงสร้างจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า RA ที่เกิดขึ้นจากการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อเท่านั้น ในขณะที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นค่า RA รวมของโครงสร้างจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า RA ที่เกิดขึ้นทั้งจากการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อและบัลค์ของโครงสร้าง ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.26 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

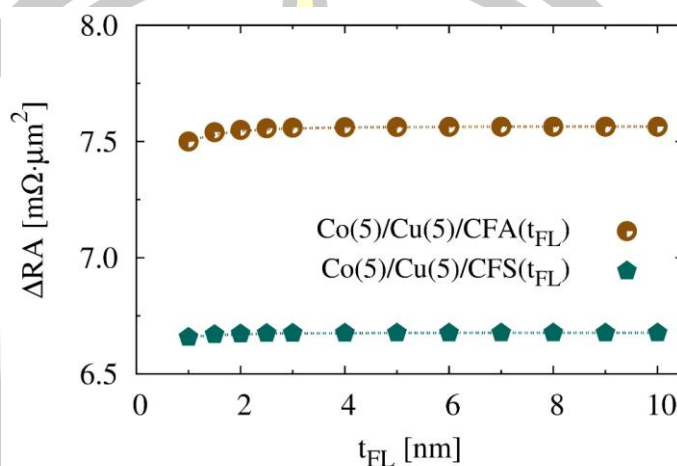
นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่า RA รวมมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่จากชั้นสเปสเซอร์เข้าสู่ชั้นอิสระจะปรับเปลี่ยนทิศทางและลู่เข้าสู่ค่าสปินโพลาไรเซชันอ้อมตัวของวัสดุเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d โดยเมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินประมาณ 3 เท่า ค่ากระแสสปินจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสสปินโพลาไรเซชันอ้อมตัวของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้ค่า RA ที่เกิดขึ้นจากบัลค์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และทำให้ค่า RA รวมของโครงสร้างมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน โดยเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นอิสระที่มีค่าเท่ากัน ค่า RA รวมของโครงสร้างสปีนวาล์วที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS เป็นชั้นอิสระจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าคงที่ได้เร็วกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA เนื่องจากวัสดุแม่เหล็ก CFS มีระยะการแพร่ของสปินที่น้อยกว่าวัสดุแม่เหล็ก CFA



ภาพประกอบ 3.26 ผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA ในสถานะขนานและตรงกันข้ามในโครงสร้าง (ก) Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FL}) และ (ข) Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(t_{FL})

เมื่อทำการคำนวณค่า RA รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้าม ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าความต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (ΔRA) จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเออร์อัลลอยด์ CFA และ CFS เป็นชั้นอิสระ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA มีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นอิสระและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.27 โดยการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA เป็นชั้นอิสระจะทำให้เกิดค่า ΔRA เฉลี่ยเท่ากับ 7.5 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร ซึ่งสูงกว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS ที่มีค่า ΔRA เฉลี่ยเท่ากับ 6.65 มิลลิโอห์มตารางไมโครเมตร จากผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA มีค่า ΔRA ที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS ร้อยละ 12.78 เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA มีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง ซึ่งผลการศึกษาค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุและความหนาของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเออร์อัลลอยด์ที่มีต่อค่า ΔRA ของโครงสร้าง $Co_2MnSi/Ag/Co_2MnSi$ [72] CFAS/Ag/CFAS [113] $Co_2Fe(Al_{1-x})$

$\times\text{Si}_x$)/Ag/Co₂Fe(Al_{1-x}Si_x) [73] และ Co₂Fe(Ga_{1-x}Ge_x)/Ag/Co₂Fe(Ga_{1-x}Ge_x) [115] ในเชิงการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าสปินโพลาริเซชันที่สูงจะทำให้เกิดค่า ΔRA ที่สูง โดยค่า ΔRA มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน



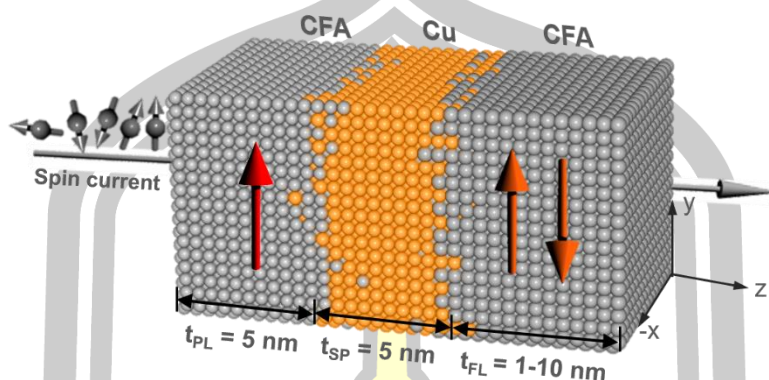
ภาพประกอบ 3.27 การเปลี่ยนแปลงค่า ΔRA ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นอิสระภายในโครงสร้าง Co(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FL}) และ Co(5nm)/Cu(5nm)/CFS(t_{FL})

จากการศึกษาความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA และ CFS ที่มีต่อค่า RA และ ΔRA พบว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA เป็นชั้นอิสระจะทำให้เกิดค่า ΔRA ที่สูงกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFS ดังนั้นในลำดับถัดไปจะเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA สำหรับเป็นชั้นพินและชั้นอิสระเพื่อพิจารณาค่าความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA ค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2) ความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA และอัตราส่วน MR

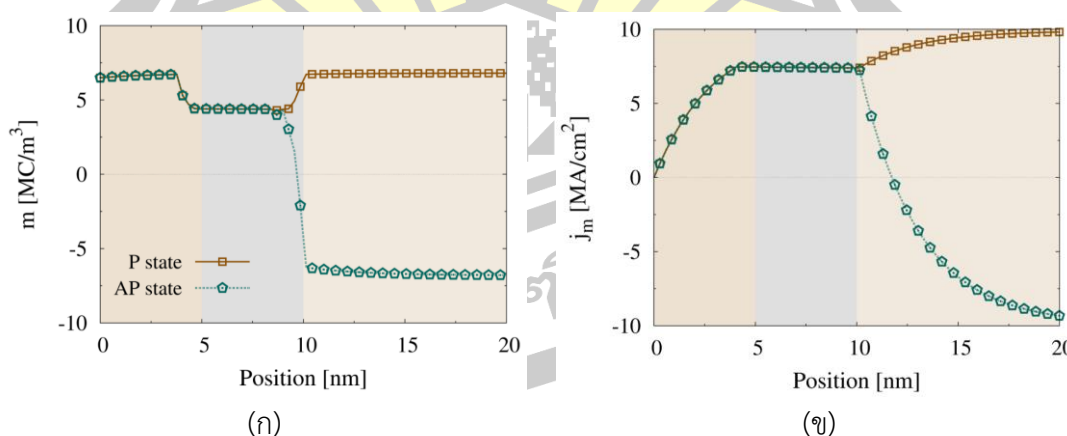
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR จากการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ CFA เป็นชั้นพินและชั้นอิสระ โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นประกอบด้วยชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร CFA สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นทองแดง ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.28 ความหนาของชั้นพินและชั้นสเปซเซอร์ถูกกำหนดให้มีความหนาชั้นละ 5 นาโนเมตร ในขณะที่ความหนาของชั้นอิสระจะมีค่าตั้งแต่ 1 -10 นาโนเมตร การศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของโครงสร้างสปินวาล์วถูกพิจารณาจากการป้อนกระแสไฟฟ้าความหนาแน่นขนาด 10 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างสปินวาล์ว เพื่อให้ค่า

RA และค่าอัตราส่วน MR ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลอง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ นอกจากจะมีโพลาริเซชันที่สูงแล้วยังทำให้ใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำลง



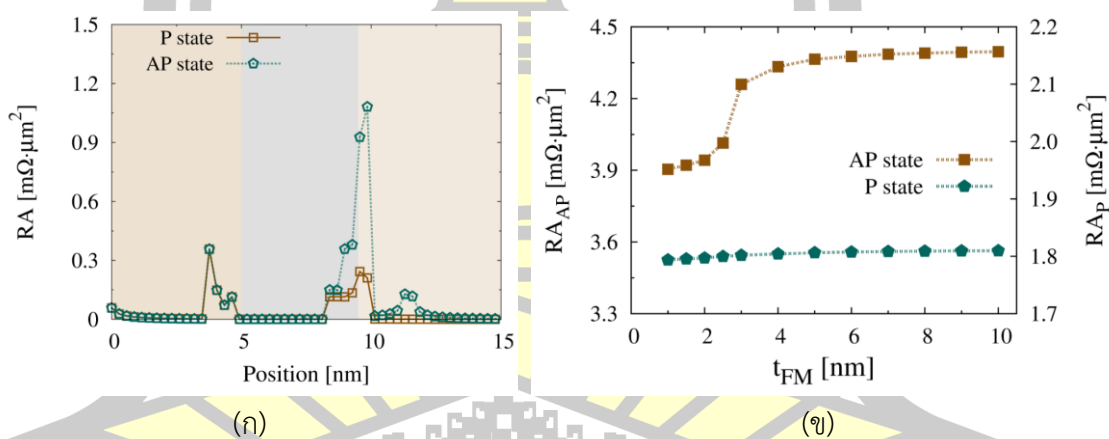
ภาพประกอบ 3.28 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_F) ลูกศรสีแดงและส้มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพื้นและชั้นอิสระตามลำดับ

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง ในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการสะสมสปินและกระแสสปินจะปรับเปลี่ยนทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ โดยค่าการสะสมสปินจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สถานะสมดุลของวัสดุ ในขณะที่ค่ากระแสสปินจะมีค่าเข้าสู่ค่ากระแสสปินโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุ ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.29 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่าการสะสมสปินภายในชั้นสเปเซอร์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากความหนาของชั้นสเปเซอร์มีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของสปินของนอนแมกเนตค่อนข้างมาก



ภาพประกอบ 3.29 การเปลี่ยนแปลง (ก) การสะสมสปินและ (ข) กระแสสปินในสถานะขนานและตรงกันข้ามต่อตำแหน่งภายในโครงสร้าง CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(10nm)

เมื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่า RA จากการศึกษ้อัตราค่าการสะสมสปินและขนาดของค่ากระแสสปิน ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า RA มีค่าสูงสุดในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ CFA และ Cu โดยในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามทำให้เกิดค่า RA ที่สูงกว่ากรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางขนาน ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.30 (ก) ส่งผลให้ค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานมีค่าที่ต่ำกว่าในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระที่มีต่อค่า RA รวมพบว่าค่า RA รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระ เนื่องจากการปรับเปลี่ยนทิศทางของกระแสสปินตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนเอสดี โดยค่า RA รวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของสปินและจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ ในขณะที่ค่า RA รวมจะมีค่าคงที่และมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของอิสระในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางขนาน ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.30 (ข)

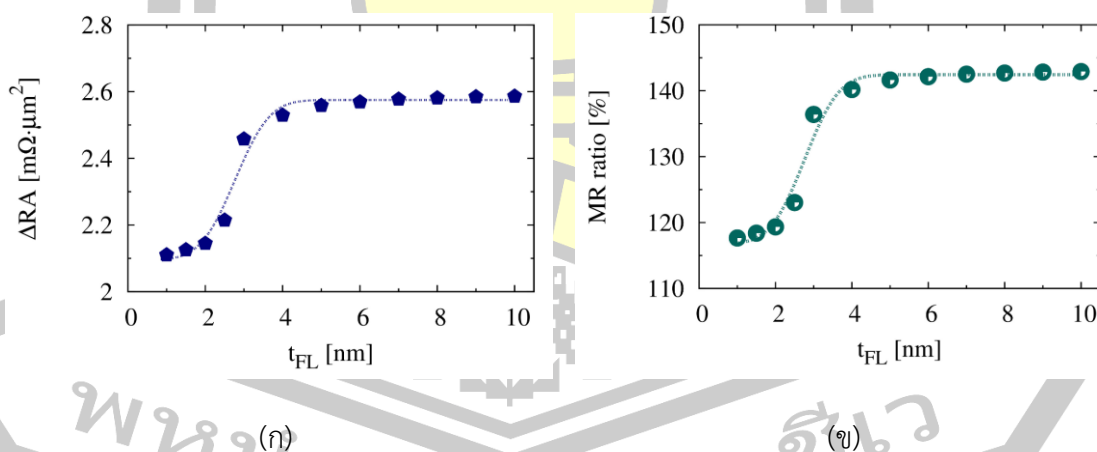


ภาพประกอบ 3.30 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่า RA เชิงตำแหน่งในโครงสร้างขนานและตรงกันข้าม (ข) ผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA รวมโครงสร้างขนานและตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/Cu(5nm)/CFA(t_{FM})

ในลำดับถัดไปคือการศึกษาผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปินวาล์ว ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นอิสระ โดยค่า ΔRA เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระมีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของสปินภายในวัสดุ ซึ่งค่า ΔRA มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 20.22 เมื่อ

ความหนาของชั้นอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 นาโนเมตรเป็น 5 นาโนเมตร โดยมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินหรือมีค่ามากกว่า 5 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.31 (ก) ในทำนองเดียวกันผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นอิสระมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับค่า ΔRA โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 20.42 เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 นาโนเมตรเป็น 5 นาโนเมตร และมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความหนาของอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.31 (ข) โดยผลการคำนวณค่า ΔRA และอัตราส่วน MR จากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินให้แนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง ในการพิจารณาผลของความหนาของแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีต่อค่า ΔRA ในโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})(t_F)/\text{Ag}(5\text{nm})/\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})(t_F)$ [69], [115] และโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})(t_F)/\text{Ag}(5\text{nm})/\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})(t_F)$ [70],[113] ซึ่งพบว่าค่า ΔRA จะมีค่าแปรผันตามความหนาของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ

นอกจากนี้ในงานวิจัยในเอกสารอ้างอิงที่ [13] โดย K. Nikolaev และคณะ ได้ทำการผลการทดลองวัดค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_2\text{MnGe}(\text{CMG})/\text{Rh}_2\text{CuSn}(\text{RCS})/\text{Co}_2\text{MnGe}$ โดยพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระ



ภาพประกอบ 3.31 ความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อ (ก) ค่า ΔRA และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุ $\text{CFA}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{CFA}(t_{FL})$

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรส่งผลโดยตรงต่อค่า RA ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปินวาล์ว การใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFA CFS และ CFAS ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ที่มีค่าสปินโพลาไรเซชัน

ที่สูงจะทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นอิสระและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นวัสดุมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน [69], [70], [113], [105]

ดังนั้นการออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูงจะทำให้เกิดค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่สูง หรือหัวอ่านข้อมูลสามารถแสดงความชัดเจนในการอ่านค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 นอกจากนี้ค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ยังมีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นแม่เหล็ก ซึ่งการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีระยะการแพร่ของสปินที่ต่ำเป็นชั้นอิสระจะช่วยลดความหนาของชั้นอิสระที่ใช้ตรวจจับสัญญาณให้มีค่าน้อยลง เนื่องจากค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ จากผลการคำนวณจะพบว่าเราสามารถพิจารณาความหนาที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR ที่สูงที่สุดในโครงสร้าง CFA/Cu/CFA อยู่ที่ประมาณ 4 นาโนเมตร ซึ่งการเพิ่มความหนามากกว่าค่านี้ไม่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านและยังทำให้ขนาดของหัวอ่านเพิ่มขึ้น งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการส่งผ่านสปินมีส่วนช่วยในการออกแบบหัวอ่านให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี

จากการศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR ในหัวข้อที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าชนิดของวัสดุส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่าน ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการศึกษานิดและคุณสมบัติของวัสดุอนแมกเนตที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5 ระยะการแพร่ของสปินและความหนาของชั้นสเปเซอร์ที่มีผลต่อค่า GMR

โดยทั่วไปวัสดุอนแมกเนตหรือวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กจะถูกใช้เป็นส่วนคั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระในโครงสร้างสปินวาล์วเพื่อป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ผลการศึกษาในเชิงทฤษฎี [180] และการทดลอง [3], [181] แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulator) คั่นกลางระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรหรือหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR จะทำให้เกิดค่าอัตราส่วน MR อย่างไรก็ตามการใช้ชั้นฉนวนไฟฟ้ายคั่นกลางระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจะทำให้เกิดค่า RA ที่สูง ซึ่งนำไปสู่ข้อจำกัดของการพัฒนาหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ต้องการเพิ่มความจุของ

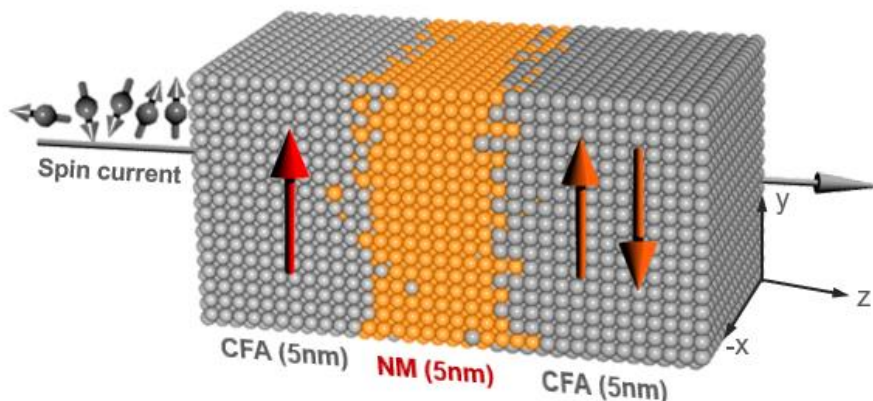
การเก็บข้อมูลมากกว่า 2 เทระไบต์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่สูงและอัตราการส่งผ่านข้อมูลที่ต่ำ [52] จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR ที่ใช้วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (conductor) มาใช้เป็นวัสดุคั่นกลางระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร เนื่องจากวัสดุตัวนำไฟฟ้ามีคุณสมบัติการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าที่ดีและมีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ

ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาคูสมบัติของวัสดุอนแมกเนตที่ใช้เป็นชั้นคั่นกลางระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหรือชั้นสเปสเซอร์และความหนาของชั้นสเปสเซอร์ภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่ส่งผลต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 ระยะเวลาแพร่ของสปินของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

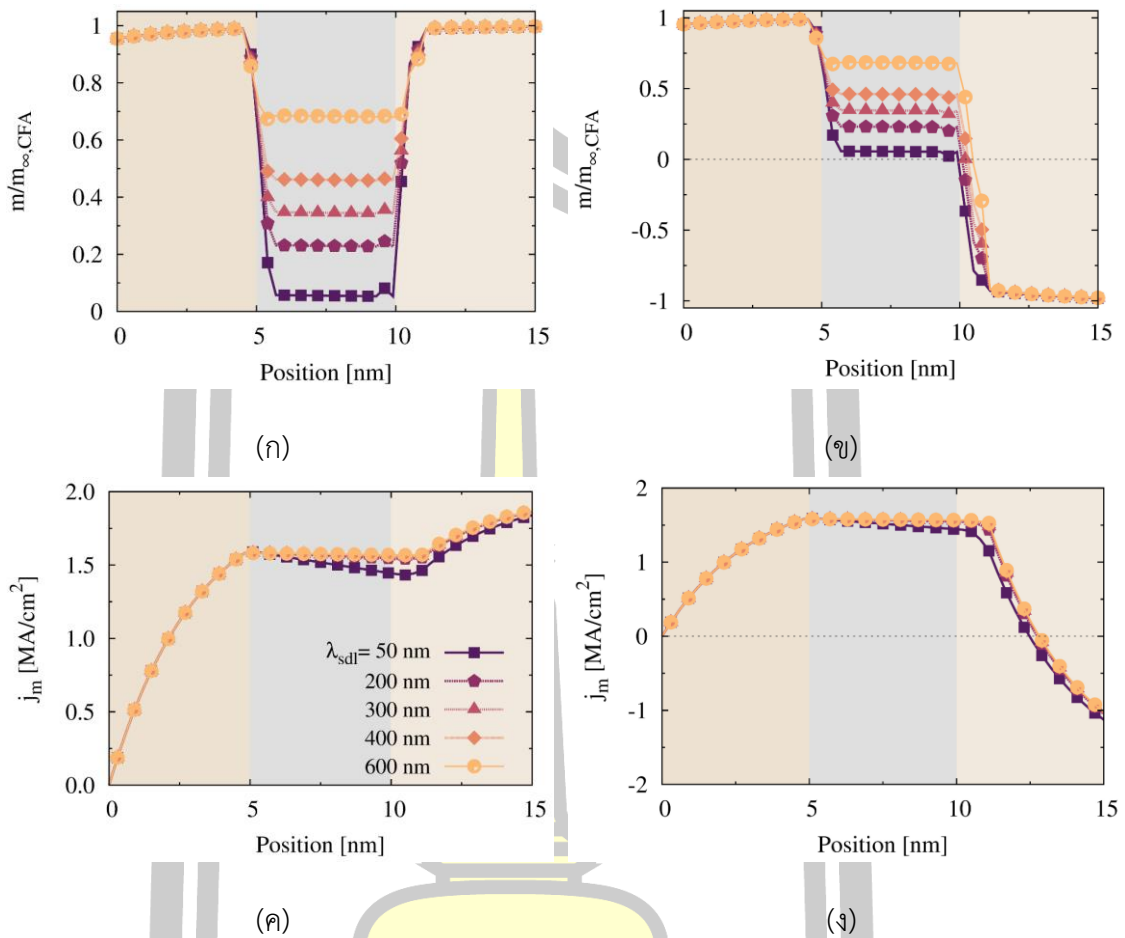
การรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลารไรซ์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR โดยทั่วไปอัตราเร็วในการปรับเปลี่ยนทิศทางของกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาแพร่ของสปินของวัสดุ กล่าวคือกระแสสปินร้อยละ 67 จะมีการปรับเปลี่ยนทิศทางและมีการจัดเรียงตัวตามสถานะสมดุลของวัสดุ เมื่อกระแสสปินมีระยะเวลาเคลื่อนที่เท่ากับระยะเวลาแพร่ของสปิน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาระยะการแพร่ของสปินภายในวัสดุอนแมกเนตที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระส่งผลต่อค่า RA และอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปินวาล์ว

ในลำดับแรกจะทำการศึกษาระยะการแพร่ของสปินของวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ส่งผลต่อการสะสมสปินและกระแสสปินจากการป้อนกระแสไฟฟ้าความหนาแน่นขนาด 10 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างสปินวาล์ว โดยโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นประกอบไปด้วยชั้นวัสดุ CFA(5nm)/NM(5nm)/CFA(5nm) ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.32 การผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาระยะการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนตที่มีค่าตั้งแต่ 50 – 600 นาโนเมตร และกำหนดค่าคงที่การแพร่ของวัสดุอนแมกเนตเท่ากับ 0.005 ตารางเมตรต่อวินาที [76], [182] ในขณะที่ค่าสปินโพลารไรเซชันของวัสดุอนแมกเนตจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากความเท่ากันของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ



ภาพประกอบ 3.32 โครงสร้างสปินวาล์วที่ประกอบด้วยชั้น CFA(5nm)/NM(5nm)/CFA(5nm) โดย ลูกศรภายในชั้นฟิล์มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน

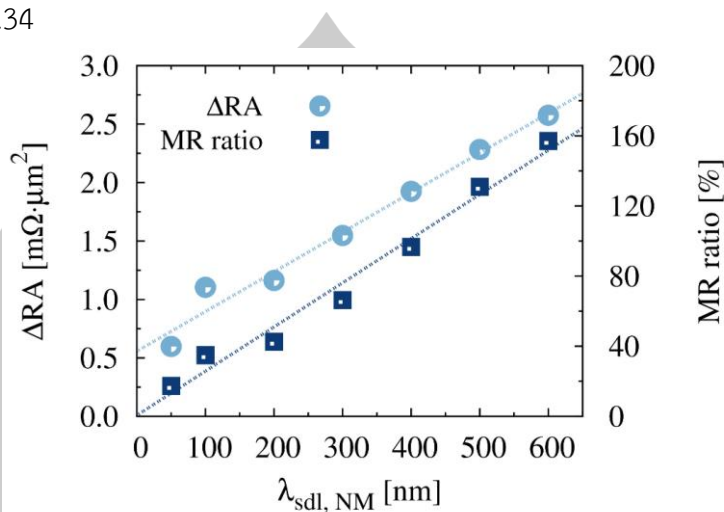
ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนตที่ส่งผลต่อการสะสมสปินในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ผลการคำนวณพบว่า การสะสมสปินจะปรับเปลี่ยนทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ผลของระยะการแพร่ของสปินภายในชั้นอนแมกเนตส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินภายในชั้นสเปเซอร์ โดยในกรณีที่ระยะการแพร่ของสปินมีค่าต่ำกว่าค่าการสะสมสปินจะมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์หรือค่าการสะสมสปินที่สถานะสมดุลของวัสดุได้เร็วกว่ากรณีที่ระยะการแพร่ของสปินมีค่าสูง [126] โดยผลของระยะการแพร่ของสปินที่มีต่อค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามแสดงตามภาพประกอบ 3.33 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนตที่ส่งผลต่อค่ากระแสสปินพบว่า กระแสสปินมีแนวโน้มจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยค่ากระแสสปินมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและมีค่าลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นสเปเซอร์ โดยวัสดุอนแมกเนตที่มีระยะการแพร่ของสปินที่ต่ำกว่าค่ากระแสสปินจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากกระแสสปินโพลาไรซ์เกิดการปรับเปลี่ยนทิศทางและเริ่มมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามแสดงตามภาพประกอบ 3.33 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3.33 การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่ง (ก) โครงสร้างแบบขนาน (ข) โครงสร้างแบบตรงกันข้ามและค่ากระแสสปินต่อตำแหน่ง (ค) โครงสร้างแบบขนาน (ง) โครงสร้างแบบตรงกันข้ามภายในโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/NM(5nm)/CFA(5nm)

ในลำดับถัดไปคือการคำนวณค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อและค่า RA ของโครงสร้างวัสดุสามชั้นจากการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับระยะการแพร่ของสปินของชั้นสเปสเซอร์ เนื่องจากระยะการแพร่ของสปินภายในชั้นนอนแมกเนตที่สูงจะสามารถรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีตรงกันข้ามและขนานที่สูง โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA เพิ่มขึ้นร้อยละ 400 เมื่อระยะการแพร่ของสปินมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 นาโนเมตรเป็น 600 นาโนเมตร [126] นอกจากนี้ผลการศึกษาายังแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะการแพร่ของสปินภายในชั้นสเปสเซอร์ โดยค่าอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ

156 เมื่อระยะการแพร่ของสปินมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 นาโนเมตรเป็น 600 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.34



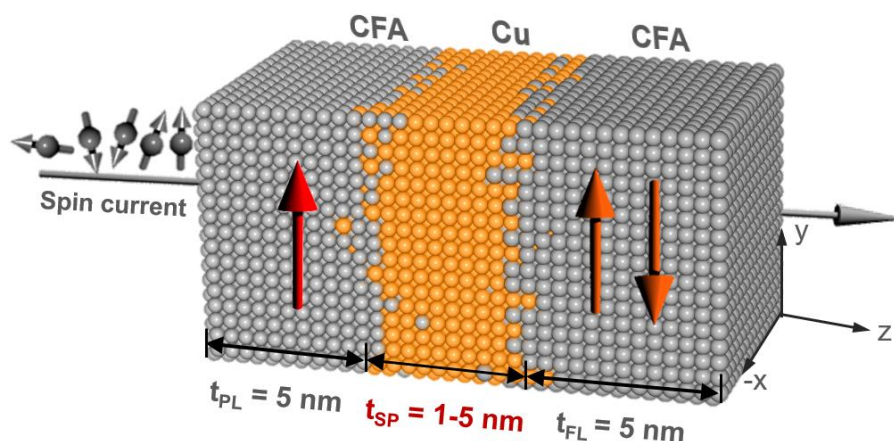
ภาพประกอบ 3.34 ค่าการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนตที่มีต่อค่า ΔRA และอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้าง CFA(5nm)/NM(5nm)/CFS(5nm)

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับระยะการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนต เนื่องจากวัสดุอนแมกเนตที่มีระยะการแพร่ของสปินที่สูงจะสามารถรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์ได้ดี ซึ่งจากผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุอนแมกเนตที่มีระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 600 นาโนเมตรจะทำให้เกิดค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ที่สูง ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 600 นาโนเมตรที่ส่งผลต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.2 ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่ส่งผลต่ออัตราส่วน MR

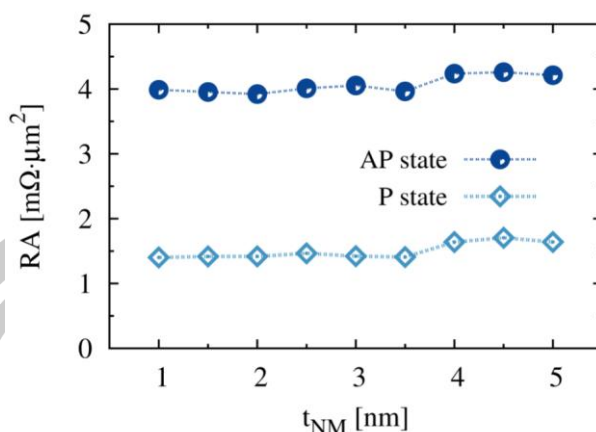
ชั้นสเปสเซอร์ภายในโครงสร้างสปินวาล์วเพื่อป้องกันอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ โดยทั่วไปชั้นสเปสเซอร์จะต้องมีความหนามากพอที่สามารถป้องกันอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและในขณะเดียวกันก็ต้องมีความหนาน้อยพอที่จะสามารถรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่จากชั้นพินไปสู่ชั้นอิสระได้ การรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะการแพร่ของสปินของวัสดุอนแมกเนต จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับระยะการแพร่ของสปินภายในชั้นสเปสเซอร์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเลือกใช้วัสดุ Cu ซึ่งมีค่าระยะการแพร่ของสปินเท่ากับ 600 นาโนเมตรเป็นชั้นคั่นกลาง

ระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ โดยจะทำการศึกษาค่าความหนาของชั้น Cu ภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่ประกอบไปด้วยวัสดุ CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm) โดยการปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นสเปเซอร์ตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาโนเมตรแสดงตามภาพประกอบ 3.35 ความกว้างของการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตรและกำหนดความหนาแน่นของค่ากระแสสปินเท่ากับ 10 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



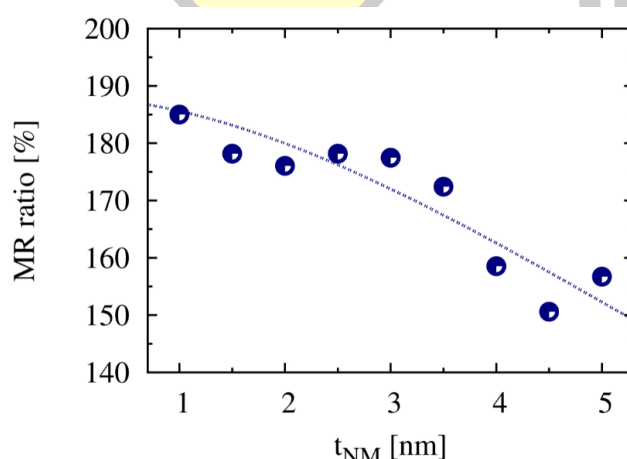
ภาพประกอบ 3.35 โครงสร้างสปินวาล์วที่ประกอบด้วยชั้น CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm) โดยลูกศรภายในชั้นฟิล์มแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชัน

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาความหนาของชั้นสเปเซอร์ที่มีต่อค่า RA ในกรณีทีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม โดยจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่ทำการปรับเปลี่ยค่าความหนาของชั้นสเปเซอร์ตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามจะทำให้เกิดค่า RA ที่สูงกว่ากรณีทีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางขนาน ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.36 นอกจากนี้ผลการคำนวณยังพบว่าค่า RA จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นสเปเซอร์ เนื่องจากความหนาของชั้นนอนแมกเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดค่า Δm ภายในชั้นนอนแมกเนตที่สูงขึ้น เนื่องจากการสะสมสปินมีการปรับเปลี่ยนแนวโน้มและมีค่าลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุนอนแมกเนตได้มากขึ้น ซึ่งการลดลงของค่าการสะสมสปินภายในชั้นสเปเซอร์จะทำให้เกิดค่า Δm ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตมีค่าที่มากขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ในขณะที่กระแสสปินโพลาไรซ์จะเกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่มเมื่อความหนาของชั้นสเปเซอร์มีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากวัสดุนอนแมกเนตมีค่าสปินโพลาไรเซชันที่เท่ากับศูนย์ ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสสปินมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นสเปเซอร์มีค่าที่สูงขึ้น



ภาพประกอบ 3.36 ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างสปีนวาล์ว CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm)

จากการพิจารณาความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่า RA ในสถานะขนานและตรงกันข้ามในลำดับถัดไปคือการศึกษาค่าความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน MR ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วน MR เกิดการกวัดแกว่ง (oscillate) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นสเปสเซอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงร้อยละ 15.67 เมื่อความหนาของชั้นสเปสเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 5 นาโนเมตร ดังแสดงตามภาพประกอบ 3.39 โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า RA และอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นสเปสเซอร์จากผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง [13], [126], [183], [184]



ภาพประกอบ 3.37 ผลของความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุ CFA(5nm)/Cu(t_{sp})/CFA(5nm)

จากการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนและการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปีน พบว่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนหรือคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุนอนแมกเนตเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงส่งต่อค่า RA Δ RA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปีนวาล์วหรือประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ซึ่งผลการศึกษานี้ให้เห็นว่าค่า Δ RA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับค่าสปีนโพลาริเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและค่าความหนาของชั้นอิสระ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปีนภายในชั้นวัสดุเฟอร์โร โดยค่า Δ RA และค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระจะมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุ นอกจากนี้พบว่าการกลับทิศทางของกระแสสปีนภายในชั้นนอนแมกเนตทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นสเปสเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุนอนแมกเนตที่มีระยะการแพร่ของสปีนที่สูงจะช่วยรักษาทิศทางของกระแสสปีนโพลาริเซชันที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์และเพิ่มค่าอัตราส่วน MR ของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลได้

ดังนั้นการออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าสปีนโพลาริเซชันที่สูงและระยะการแพร่ของสปีนที่ต่ำจะทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำ ค่าอัตราส่วน MR ที่สูง ซึ่งสามารถลดขนาดของชั้นฟิล์มที่ใช้ตรวจจับสัญญาณให้มีขนาดที่เล็กลงได้ ในขณะที่วัสดุนอนแมกเนตที่ถูกใช้เป็นชั้นสเปสเซอร์จำเป็นต้องมีระยะการแพร่ของสปีนที่สูงและค่าความหนาที่ต่ำเพื่อรักษาทิศทางของกระแสสปีนโพลาริเซชันที่เคลื่อนที่ผ่านจากชั้นพินไปยังชั้นอิสระ



บทที่ 4

การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทาง

แม่เหล็ก

ปัจจุบันการออกแบบหัวอ่านข้อมูลให้มีประสิทธิภาพที่สูงและมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลที่มากกว่า 2 เทระไบต์ต่อตารางนิ้ว กำลังได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทฤษฎี [14], [19], [52] และการทดลอง [67], [141], [181] ความต้องการเพิ่มความจุการบันทึกข้อมูลโดยการลดขนาดของบิตข้อมูลนำไปสู่การลดขนาดที่เล็กลงของหัวอ่านและหัวเขียนข้อมูลเพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของบิตข้อมูล การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เกิดการลดลงของควมมีเสถียรภาพทางความร้อนภายในโครงสร้างสปินวาล์ว เนื่องจากการลดขนาดของชั้นฟิล์มภายในโครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดการลดลงของค่าพลังงานกีดกัน (energy barrier) และเป็นการเพิ่มความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลลดลง เนื่องจากอัตราส่วนสัญญาณขาออกต่อสัญญาณรบกวนและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าที่ลดลง

โดยทั่วไปค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลและมีผลต่อค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยได้แก่ ผลความหนาแน่นของค่ากระแสไฟฟ้า [158], [185], [186] ขนาดโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล [169], [170] และผลทางความร้อน [187]–[190] เป็นต้น โดยทั่วไปผลของความร้อนที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น ผลอุณหภูมิของการอบร้อน (annealing temperature) ในขั้นตอนของการปลูกผลึก [72], [191] ผลของอุณหภูมิภายนอก [66], [73], [114], [142] ผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล (reader heater) สำหรับการยื่นหัวอ่านข้อมูลเข้าสู่แผ่นบันทึกข้อมูลในกระบวนการอ่านข้อมูล [98] และผลจากความร้อนจากการไหลของกระแสไฟฟ้า [192] ซึ่งผลของอุณหภูมิภายนอกในขณะใช้งานและความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลเป็นตัวแปรภายนอกที่สำคัญที่มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะทำการศึกษาผลของความร้อนประสิทธิภาพที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล จากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินที่พิจารณาผลของความร้อน

จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีพบว่าการศึกษาค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้างสปินวาล์วสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน โดยทั่วไปการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินจากการใช้แบบจำลองทั่วไปการสะสมสปินซึ่งอยู่บนพื้นฐานสมการดริฟท์-ดิฟฟิวชัน (drift-

diffusion equation) จะทำการศึกษาที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์เท่านั้น โดยไม่ทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน [10], [76], [132], [150], [193] ดังนั้นในกรณีที่ต้องการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปินวาล์วเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลในเชิงการทดลอง ในลำดับแรกจะทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนจะส่งผลต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ การศึกษาผลของความร้อนจะนำไปสู่การอธิบายการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นในระบบจริงได้ โดยรายละเอียดของการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร และวัสดุนอนแมกเนตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน

แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน [10] ถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในวัสดุและนำไปสู่การอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในโครงสร้างสปินวาล์ว โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง จากผลการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ GMR ดังรายละเอียดในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุ โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน (electronic structure) ภายในวัสดุ โดยทั่วไปการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอมจะอยู่ภายใต้หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) ซึ่งพบว่าการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในชั้น 3d ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแบบไม่เต็มออร์บิทัลส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กตรอนในชั้น 3d และ 4s เนื่องจากการซ้อนทับกันของแถบพลังงาน โดยการจัดเรียงตัวแบบไม่เต็มออร์บิทัลภายในชั้น 3d ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหักล้างกันไม่หมดของสปินภายในออร์บิทัล ในขณะที่วัสดุนอนแมกเนตมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแบบเต็มออร์บิทัลในชั้น 3d ทำให้วัสดุนอนแมกเนตไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในชั้น 3d และ 4s นำไปสู่การอธิบายคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุตัวนำที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก คุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะ (density of state, DOS) ของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี [194], [195] โดยทั่วไปคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุจะมีค่าแปรผกผันตามผลของอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดความผันผวนของสปิน ซึ่งทำให้

เกิดการหักล้างกันของสปินของภายในวัสดุและส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีและค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ดังนั้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจึงนำไปสู่การอธิบายผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล

โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ซึ่งค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ใช้ในการพิจารณาค่าการสะสมสปินและกระแสสปินประกอบไปด้วย ค่าสปินโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้า (spin polarisation of conductivity, β) ค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (spin polarisation of diffusion constant, β'') ระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length, λ_{sd}) และค่าคงที่การแพร่ (diffusion constant, D_0) ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ในลำดับแรกจะต้องทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปินโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้า

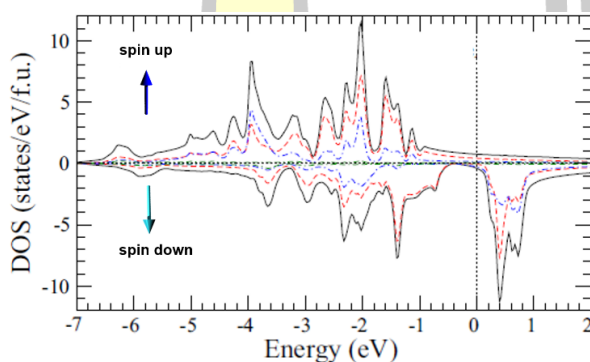
กระบวนการทำงานของอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้การป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างสปินวาล์วเพื่อตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านชั้นพินของโครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนพลังงาน s-d ระหว่างอิเล็กตรอนในชั้น s ของกระแสสปินและอิเล็กตรอนภายในชั้น d ของวัสดุแม่เหล็ก โดยอันตรกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดกระแสสปินโพลาไรซ์หรือกระแสสปินที่มีแนวโน้มจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน จากนั้นกระแสสปินโพลาไรซ์จะเคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสระเพื่อตรวจวัดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลและแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า โดยค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ใช้ในการแสดงการอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์และทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุด เมื่อกระแสสปินโพลาไรซ์จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามและจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ตามลำดับ

จากกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลแสดงให้เห็นว่าทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนผ่านไปยังชั้นอิสระส่งผลโดยตรงต่อการกระเจิงของสปินและค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินให้มีแนวโน้มจัดเรียงตัวตามทิศทาง

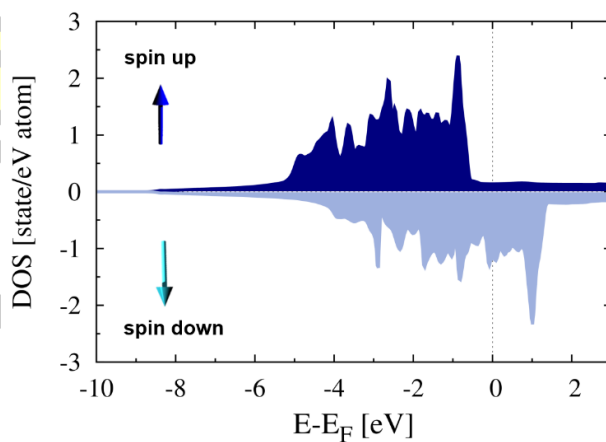
ของแมกนีไทเซชันของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปินโพลาไรเซชัน (β) ของวัสดุ โดยค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้น ($N_{\uparrow}(E_F)$) และสปินลง ($N_{\downarrow}(E_F)$) ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ตามความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.1)

$$\beta = \frac{N_{\uparrow}(E_F) - N_{\downarrow}(E_F)}{N_{\uparrow}(E_F) + N_{\downarrow}(E_F)} \quad (4.1)$$

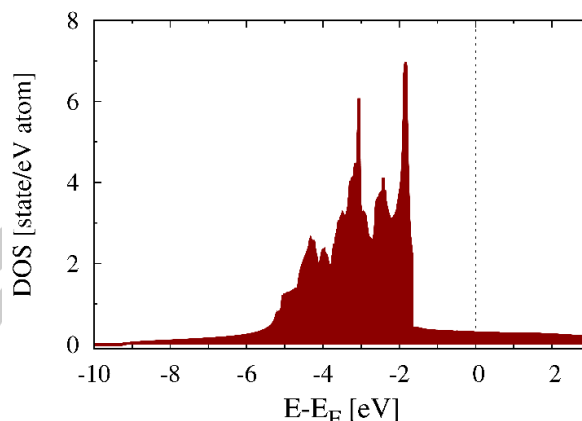
โดยทั่วไปค่า β จะมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี โดยที่สภาวะสมดุลวัสดุแม่เหล็กผสมฮอยเลอร์อัลลอยด์จะมีค่าเท่ากับ -1 หรือ 1 ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าน้อยกว่า 1 และ -1 และวัสดุอนแมกเนตจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากความเท่ากันของความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลง โดยความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุแม่เหล็ก CFAS Co และ Cu แสดงตามภาพประกอบ 4.1 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 4.1 DOS ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุ (ก) CFAS [178] (ข) โคบอลต์ [196] และ (ค) ทองแดง [197]

การศึกษาความหนาแน่นทางสถานะของสปินขึ้นและสปินลงนำไปสู่การพิจารณาสภาพการนำไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลง โดยค่าสปินโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้าของวัสดุถูกพิจารณาจากผลต่างของสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างสปินขึ้นและสปินลงดังแสดงในสมการที่ (4.2)

$$\beta = \frac{\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}}{\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}}, \quad (4.2)$$

เมื่อ $\sigma_{\uparrow(\downarrow)}$ คือสภาพการนำไฟฟ้าของสปินขึ้น (สปินลง) จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.2) แสดงให้เห็นว่าค่าสปินโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้าของวัสดุอนแมกเนตจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลงมีค่าเท่ากัน ($\sigma_{\uparrow} = \sigma_{\downarrow}$) การพิจารณาสภาพการนำไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลงของวัสดุสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของสปินขึ้นและสปินลงดังแสดงในสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ [198], [199]

$$\sigma_{\uparrow} = \frac{\rho_{\downarrow} + 2\rho_{\uparrow\downarrow}}{\rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow\downarrow}(\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow})}, \quad (4.3)$$

และ

$$\sigma_{\downarrow} = \frac{\rho_{\uparrow} + 2\rho_{\uparrow\downarrow}}{\rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow} + \rho_{\uparrow\downarrow}(\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow})}, \quad (4.4)$$

เมื่อ $\rho_{\uparrow(\downarrow)}$ คือสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของสปินขึ้น (สปินลง) และ $\rho_{\uparrow\downarrow}$ คือสภาพต้านทานของสปินรวม (spin mixing resistivity) ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านโมเมนตัมระหว่างสปินขึ้นและสปินลงเนื่องจาก

ผลทางความร้อน [199], [200] การพิจารณาสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของสปีนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากการอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.5) ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัย [31]

$$\rho_i(T) = \rho_{i(0)} + A_i T^2 \quad (4.5)$$

เมื่อ $\rho_{i(0)}$ คือสภาพต้านทานเริ่มต้นของวัสดุที่เกิดขึ้นจากการกลับทิศทางของสปีน (spin-flip scattering) เนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ (impurities) ของวัสดุและการกระเจิงของโฟนอนและแมกนอน (phonon and magnon scattering) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความร้อน

A คือค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง โดยคำนวณได้จากค่าสัดส่วนการลดลงของสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น

T คืออุณหภูมิ โดยที่สัญลักษณ์ i แทนทิศทางของสปีนขึ้น (\uparrow) สปีนลง (\downarrow) และสปีนรวม ($\uparrow\downarrow$)

สภาพการนำไฟฟ้าของสปีนขึ้นและสปีนลงที่อุณหภูมิใดๆ สามารถพิจารณาได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในสมการที่ (4.5) จากนั้นแทนค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของสปีนขึ้น สปีนลง และสปีนรวมที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิลงในสมการที่ (4.3) และ (4.4) โดยกำหนดให้ค่าสภาพต้านทานของสปีนผสม ($\rho_{\uparrow\downarrow(0)}$) มีค่าเท่ากับศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการกลับทิศทางของสปีนที่เกิดขึ้นจากความไม่บริสุทธิ์และความผิดปกติของโครงสร้างจะมีค่าน้อยมากๆ [198], [199] ดังนั้นจะได้สภาพการนำไฟฟ้าของสปีนขึ้นและสปีนลงที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังแสดงในสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ

$$\sigma_{\uparrow}(T) = \frac{\rho_{\downarrow(0)} + 2\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 3AT^2}{\rho_{\uparrow(0)}\rho_{\downarrow(0)} + 2AT^2(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}) + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)}) + 3A^2T^4}, \quad (4.6)$$

และ

$$\sigma_{\downarrow}(T) = \frac{\rho_{\uparrow(0)} + 2\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 3AT^2}{\rho_{\uparrow(0)}\rho_{\downarrow(0)} + 2AT^2(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}) + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)}) + 3A^2T^4}, \quad (4.7)$$

เมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ $A_{\uparrow} = A_{\downarrow} = A_{\uparrow\downarrow} = A$ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ M. Zhu และคณะ [198] และ E. Villamor และคณะ [31] ดังนั้นสามารถทำการคำนวณค่าสปีนโพลาริเซชันของสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิได้โดยทำการแทนสมการที่ (4.6) และ (4.7) ลงในสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$\beta(T) = \frac{\rho_{\downarrow(0)} - \rho_{\uparrow(0)}}{\rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow(0)} + 4\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 6AT^2} \quad (4.8)$$

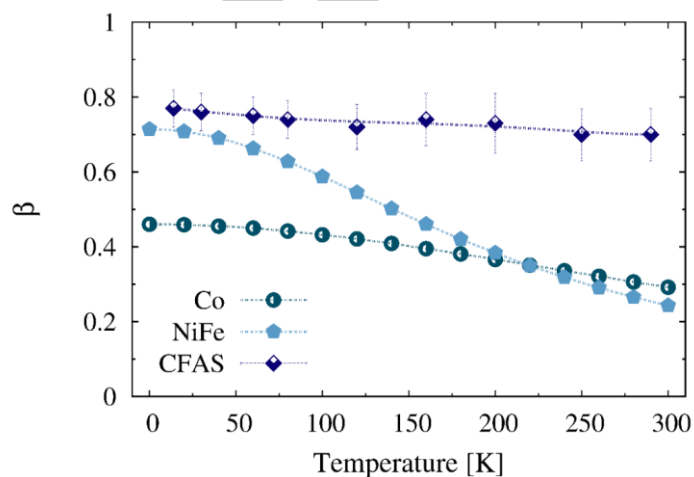
จากความสัมพันธ์ของค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ (4.8) แสดงให้เห็นว่าค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยจะมีลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.8) สามารถพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็ก Co และ NiFe ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 จากการใช้ค่าพารามิเตอร์ $\rho_{\uparrow(0)}$, $\rho_{\downarrow(0)}$ และ A ที่ถูกอ้างอิงจากผลการทดลอง [199], [9], [201] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และค่า $\rho_{\uparrow\downarrow(0)} = AT^2$

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต

วัสดุ	ปริมาณ	ค่า	หน่วย	อ้างอิง
โคบอลต์	$\rho_{\uparrow(0)}$	0.4049×10^{-7}	$\Omega \cdot m$	[9]
	$\rho_{\downarrow(0)}$	1.095×10^{-7}	$\Omega \cdot m$	
	A	0.16×10^{-12}	$\Omega \cdot m / K^2$	
นิกเกิลไอรอน	$\rho_{\uparrow(0)}$	2.603×10^{-7}	$\Omega \cdot m$	[199]
	$\rho_{\downarrow(0)}$	0.434×10^{-7}	$\Omega \cdot m$	
	A	1.09×10^{-12}	$\Omega \cdot m / K^2$	
ทองแดง	$\rho_{\uparrow(0)}, \rho_{\downarrow(0)}$	0.1198×10^{-7}	$\Omega \cdot m$	[9]

จากการคำนวณค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุ Co และ NiFe ที่อุณหภูมิใดๆ พบว่าค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสปีนโพลาไรเซชันของการนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของวัสดุ Co และ NiFe แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับวัสดุแม่เหล็ก CFAS ที่วัดได้จากการศึกษาเชิงการทดลอง ในงานวิจัยของ T.M. Nakatani และคณะ [70] ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.2 นอกจากนี้ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอัตราการลดลงของค่าสปีนโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ A ซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุ โดยวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสัมประสิทธิ์ A ที่สูงจะมีความไวของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการส่งผ่านของสปีนต่ออุณหภูมิที่มากกว่าวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสัมประสิทธิ์ A ที่ต่ำ ซึ่งจากผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็ก NiFe

ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ A ที่สูงจะมีอัตราการลดลงของค่าสปีนโพลาริเซชันของความเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เร็วกว่าวัสดุแม่เหล็ก Co ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสปีนโพลาริเซชันของความเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิใดๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ Co และ NiFe ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.8)

จากการคำนวณค่าสปีนโพลาริเซชันของความเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิใดๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุ โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

4.1.2 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่

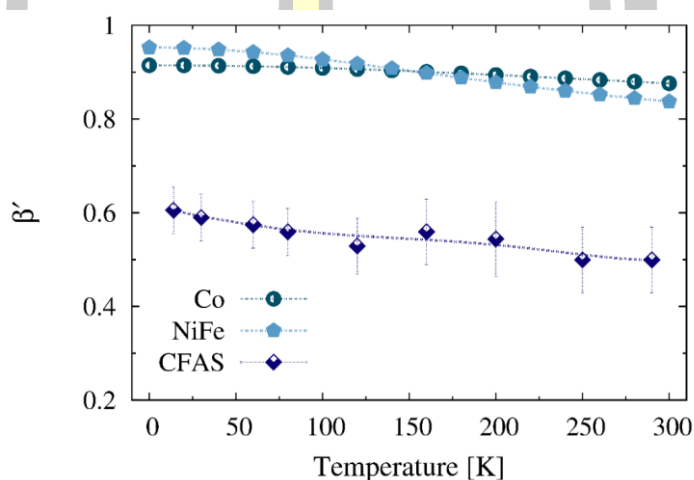
การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปีนโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปีนโพลาริเซชันและค่าสปีนโพลาริเซชันของความเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ (4.9)

$$\beta(T) = \frac{\beta(T) - \beta''}{1 - \beta(T)\beta''} \quad (4.9)$$

โดยสามารถทำการคำนวณค่าสปีนโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ ได้จากการแทนสมการที่ (4.7) และ (4.8) ลงในสมการที่ (4.9) ดังนั้นค่าสปีนโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจึงมีค่าเท่ากับ

$$\beta'(T) = \frac{\rho_{\downarrow(0)} - \rho_{\uparrow(0)} - (\rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow(0)} + 4\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 6AT^2)\beta''}{\rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow(0)} + 4\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 6AT^2 - (\rho_{\downarrow(0)} - \rho_{\uparrow(0)})\beta''} \quad (4.10)$$

จากการคำนวณค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุ Co NiFe และ CFAS ที่อุณหภูมิใดๆ จากการใช้สมการที่ (4.10) พบว่าค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่จะมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิ สามารถคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุแม่เหล็ก Co NiFe และ CFAS ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ที่อุณหภูมิใดๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co NiFe และ CFAS ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.10)

นอกจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสปินโพลาไรเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่อุณหภูมิใดๆ ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ใช้ในการอธิบายระยะทางของการรักษาทิศทางของกระแสสปินเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ โดยพิจารณาการแพร่ของสปินที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

4.1.3 ผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปิน

ระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length, λ_{sdl}) คือระยะทางที่กระแสสปินใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางก่อนเข้าสู่ทิศทางที่สภาวะสมดุลของวัสดุ การศึกษาในเชิงทฤษฎี [75] แสดงให้เห็นว่าระยะการแพร่ของสปินเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและปรากฏการณ์ GMR เนื่องจากความเร็วในการปรับเปลี่ยนทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์วจะมีค่าสัมพันธ์กับระยะการแพร่ของสปินภายในวัสดุ โดยทั่วไปวัสดุ

นอนแมกเนตที่ถูกใช้เป็นชั้นสเปเซอร์จะต้องมีค่าระยะการแพร่ของสปีนที่สูงและมีค่ามากกว่าความหนาของชั้นวัสดุ เพื่อรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลารไรซีไม่ให้เกิดการปรับเปลี่ยนทิศทางเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปเซอร์ ในขณะที่การเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าระยะการแพร่ของสปีนที่น้อยเป็นชั้นอิสระจะทำให้สามารถลดขนาดความหนาของชั้นอิสระภายในโครงสร้างสปีนวาล์วได้ เนื่องจากกระแสสปินสามารถเปลี่ยนแปลงแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางของแมกนีไทเซชันและมีค่าลู่เข้าสู่ค่ากระแสสปินโพลารไรเซชันอิมิตัวของวัสดุได้เร็วกว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีระยะการแพร่ของสปีนที่สูง [70], [113]

โดยทั่วไประยะการแพร่สปีนของวัสดุจะมีค่าแปรผันตรงกับ ระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ซึ่งเป็นระยะทางเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ก่อนชนกับอิเล็กตรอนอื่น นอกจากนี้ ระยะการแพร่สปีนของวัสดุยังมีค่าสัมพันธ์กับสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุและมีค่าแปรผกผันกับผลของความร้อน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการลดลงของสภาพความนำไฟฟ้า [199], [202]–[205] ดังนั้นในกรณีที่ต้องการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปีน สามารถพิจารณาได้จากการศึกษาสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ การคำนวณสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของไอสไตน์ (Einstein's relation) ดังแสดงในสมการที่ (4.11) ซึ่งจากสมการพบว่าสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าคงที่การแพร่ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

$$\sigma(T) = e^2 N(E_F) D_0(T) \quad (4.11)$$

เมื่อ σ คือสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ

e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน

$N(E_F)$ คือความหนาแน่นทางสถานะของสปีนที่ระดับพลังงานเฟอร์มี

D_0 คือค่าคงที่การแพร่ของวัสดุ

การพิจารณาความสัมพันธ์ของสภาพการนำไฟฟ้าและค่าคงที่การแพร่ที่อุณหภูมิใดๆ นำไปสู่การคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุดังสมการในสมการที่ (4.12)

$$\lambda_{sdl}(T) = \sqrt{\tau_{sf} D_0(T)} = \sqrt{\frac{\tau_{sf} \sigma(T)}{e^2 N(E_F)}} \quad (4.12)$$

เมื่อ τ_{sf} คือระยะเวลาที่สปินเริ่มกลับทิศทาง จากการพิจารณาระยะการแพร่ของสปินดังแสดงในสมการที่ (4.12) พบว่าระยะเวลาการแพร่ของสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการคลายตัวของสปินและสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ

โดยทั่วไปการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการแพร่ของสปินที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกลับทิศทางของสปิน โดยระยะเวลาที่สปินเริ่มกลับทิศทางตามทฤษฎีของเอลเลียท (Elliot) [206] และยาเฟท (Yafet) [207] จะมีค่าขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนสปินออร์บิต (spin-orbit interaction) โดยระยะเวลาในการกลับทิศทางของสปินมีค่าขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของการผันกลับทิศทางของสปิน (spin-flip probability) และเวลาในการคลายตัวเชิงโมเมนตัม (momentum relaxation time) [203]–[205] ซึ่งเป็นเวลาที่สปินใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อเข้าสู่การจัดเรียงทิศทางในสภาวะสมดุลดังแสดงในสมการที่ (4.13)

$$\tau_{sf} = \frac{\tau_e}{\mathcal{K}} \quad (4.13)$$

โดยที่

$$\tau_e = \frac{3\sigma(T)}{v_F^2 N(E_F) e^2} \quad (4.14)$$

เมื่อ τ_e คือเวลาในการคลายตัวเชิงโมเมนตัมของสปิน โดย $\tau_e = \tau_e^{ph} + \tau_e^{def}$ ซึ่งเป็นผลรวมของการกระเจิงของโฟนอน (phonons scattering, τ_e^{ph}) และการกระเจิงที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องของโครงสร้าง (defects scattering, τ_e^{def})

\mathcal{K} คือความน่าจะเป็นของการผันกลับทิศทางของสปิน โดยมีค่าขึ้นอยู่กับความบกพร่องของโครงสร้างและโฟนอน ($\mathcal{K} = \mathcal{K}_{def} + \mathcal{K}_{ph}$)

v_F คือความเร็วเฟอร์มี (Fermi velocity)

การกระเจิงที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องของโครงสร้างวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุ ผลของรอยต่อระหว่างเกรนและบริเวณพื้นผิวจากกระบวนการปลูกฟิล์ม โดยการกระเจิงที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างจะมีอิทธิพลและส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการแพร่ของสปินที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผลการกระเจิงของโฟนอนจะเป็นตัวแปรที่สำคัญและควบคุมการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการแพร่ของสปินภายในวัสดุ โดยผลของความร้อนจะทำให้เกิดการสั่นของโครงสร้างผลึกก่อให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างโฟนอนและอิเล็กตรอนที่มากขึ้นและส่งผลให้สปินเกิดความผันผวนและเปลี่ยนแปลงทิศทางได้เร็วขึ้น [203]–[205]

ในลำดับถัดไปทำการพิจารณาระยะการแพร่ของสปินของวัสดุที่อุณหภูมิต่ำ ได้จากการแทนสมการที่ (4.13) ลงในสมการที่ (4.12) ดังนั้นระยะการแพร่ของสปินที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจึงมีค่าเท่ากับ

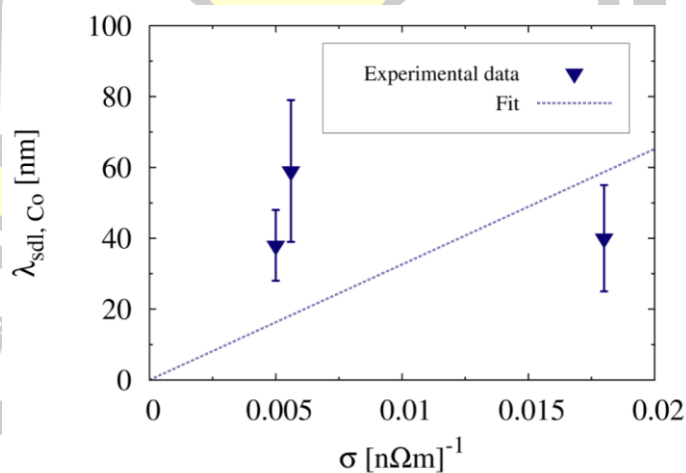
$$\lambda_{\text{sdl}}(T) = \frac{\sqrt{3\kappa}}{e^2 v_F N(E_F)} \sigma_{\text{tot}}(T), \quad (4.15)$$

โดย

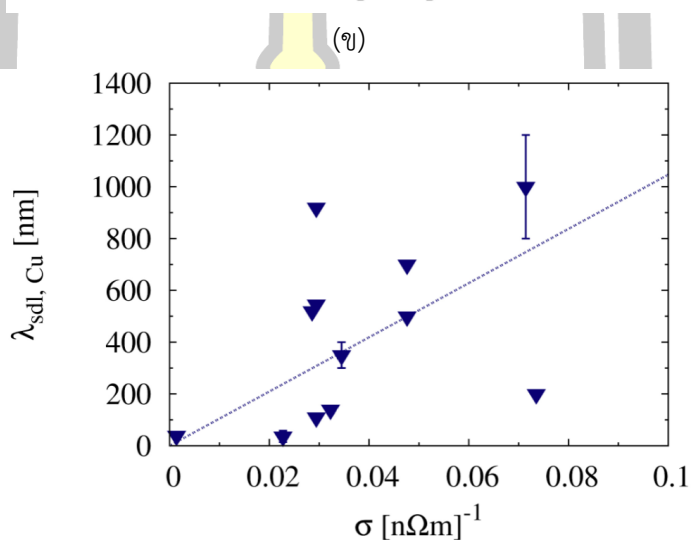
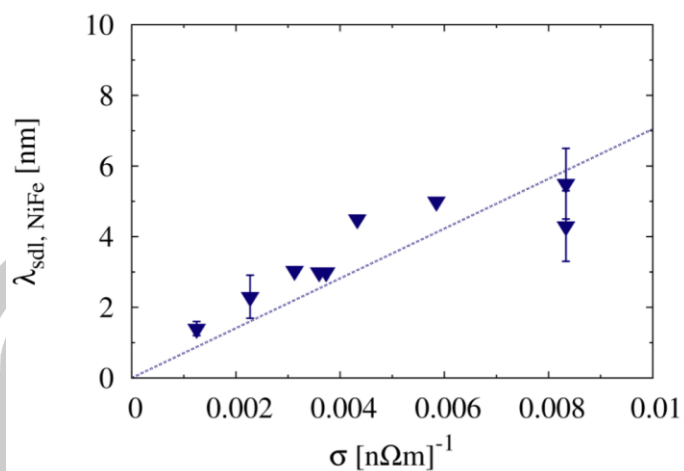
$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}}(T) &= \sigma_{\uparrow}(T) + \sigma_{\downarrow}(T) \\ &= \frac{\rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow(0)} + 4\rho_{\uparrow\downarrow(0)} + 6AT^2}{\rho_{\uparrow(0)}\rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)}) + 2AT^2(\rho_{\uparrow(0)} + \rho_{\downarrow(0)} + \rho_{\uparrow\downarrow(0)}) + 3A^2T^4} \end{aligned}$$

การพิจารณาค่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุในเชิงการทดลองสามารถพิจารณาได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ [199], [202]–[205] โดยความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแพร่ของสปินและสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ Co NIFe และ Cu ซึ่งได้จากการทดลองแสดงตามภาพประกอบ 4.4 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.15) แสดงให้เห็นว่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการแพร่ของสปินกับสภาพการ

นำไฟฟ้าของวัสดุจะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ $\frac{\sqrt{3\kappa}}{e^2 N(E_F) v_F}$



(ก)

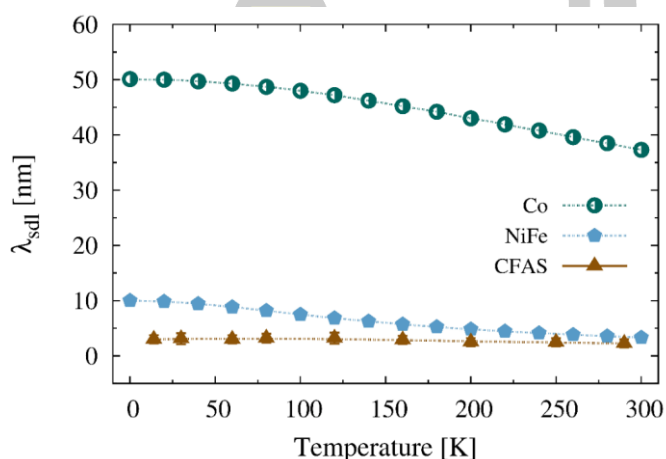


ภาพประกอบ 4.4 การเปลี่ยนแปลงระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ (ก) Co (ข) NiFe และ (ค) Cu ที่เป็นฟังก์ชันของสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุ [208] โดยจุดสามเหลี่ยมแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้นประแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสภาพความนำไฟฟ้ากับระยะการแพร่ของวัสดุ โดยการพลอตด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression method)

เมื่อทำการพลอตข้อมูลความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสภาพความนำไฟฟ้ากับระยะการแพร่ของวัสดุ Co NiFe และ Cu ที่ได้จากการทดลอง ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression method) ได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \lambda_{sdl,Co} : & \quad y = 1.813 \times 10^{-15} x + 21.701 \times 10^{-9} \quad \text{เมื่อ } R^2 = 0.2656 \\ \lambda_{sdl,NiFe} : & \quad y = 0.5 \times 10^{-15} x + 1 \times 10^{-9} \quad \text{เมื่อ } R^2 = 0.8108 \\ \lambda_{sdl,Cu} : & \quad y = 7.365 \times 10^{-15} x + 146.86 \times 10^{-9} \quad \text{เมื่อ } R^2 = 0.2 \end{aligned}$$

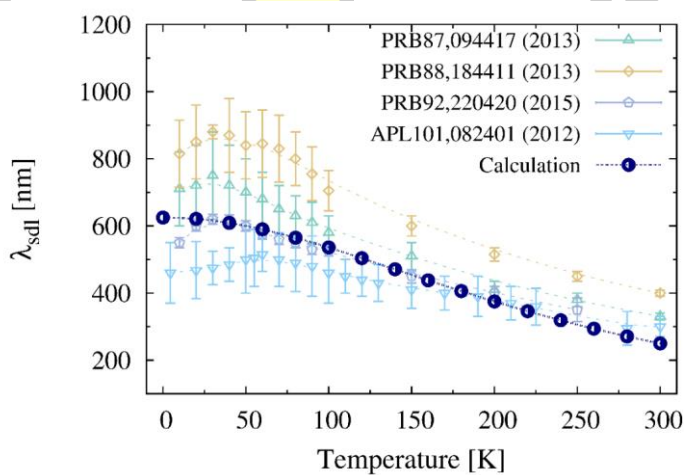
จากสมการข้างต้นพบว่าวัสดุ Co NiFe และ Cu มีค่าความชันหรือค่าคงที่ $\frac{\sqrt{3\kappa}}{e^2 N(E_F) v_F}$ เท่ากับ 1.813×10^{-15} 0.5×10^{-15} และ 7.365×10^{-15} ตามลำดับ จากการพิจารณาค่าความชันจากภาพประกอบ 4.4 (ก) และ (ข) นำไปสู่การคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co และ NiFe ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.5 โดยค่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co และ NiFe ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการวัดในเชิงการทดลอง [208] นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS ที่อุณหภูมิใดๆ ที่วัดได้จากการทดลองในงานวิจัยของ T.M. Nakatani และคณะ [70] ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพประกอบ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระยะการแพร่ของสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

สำหรับการพิจารณาระยะการแพร่ของสปินที่อุณหภูมิใดๆ ของวัสดุ Cu พบว่าสามารถคำนวณระยะการแพร่ของสปินได้โดยตรงจากค่าคงที่ $\frac{\sqrt{3\kappa}}{e^2 N(E_F) v_F}$ เนื่องจากทราบพารามิเตอร์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุทุกค่าดังนี้ $v_F = 1.57 \times 10^6$ m/s $\kappa_{def} = 6.8 \times 10^{-4}$ $\kappa_{ph} = 11.8 \times 10^{-4}$ และ $N(E_F) = 1.8 \times 10^{28}$ state/eV/m³ [202]–[205] ซึ่งเมื่อทำการแทนค่าต่างๆ จะทำให้ได้ค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 3.74×10^{-15} Ω·m² ซึ่งให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยพบว่าค่าความชันมีค่าเท่ากับ 7.365×10^{-15} Ω·m² แต่ในกรณีที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุจำเป็นต้องอาศัยค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการแพร่ของสปินกับสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุในเชิงการทดลอง

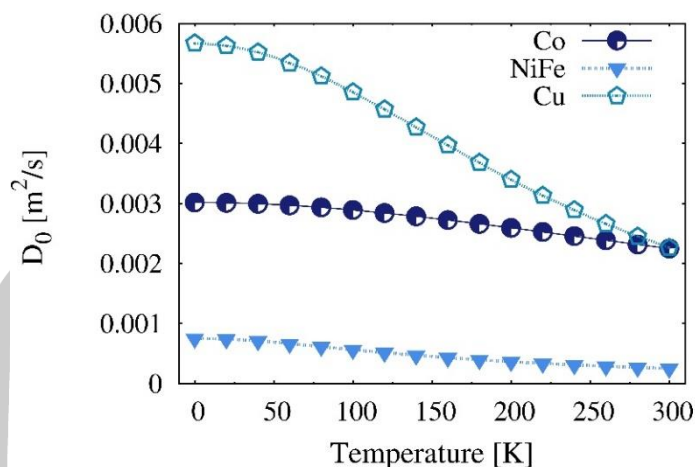
จากนั้นสามารถพิจารณาการแพร่กระจายของสปินของวัสดุ Cu ที่อุณหภูมิใดๆ จากการใช้สมการที่ (4.15) และทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับการวัดระยะการแพร่ของสปินจากผลการทดลอง [199], [203]–[205] แสดงดังภาพประกอบ 4.6 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ ระยะการแพร่ของสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกลับทิศทางของสปินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของความบกพร่องของโครงสร้าง พื้นผิวของวัสดุและผลของรอยต่อระหว่างเกรน อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมีค่าประมาณ 30 – 60 เคลวิน ระยะการแพร่ของสปินจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความน่าจะเป็นของการผันกลับทิศทางที่เกิดขึ้นจากการกระเจิงของโครงสร้างของวัสดุมีค่าลดลง [204], [205] นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ระยะการแพร่ของสปินของวัสดุจะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของผลการกระเจิงของโฟนอน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกเกิดการสั่นและสปินมีความความผันผวนมากขึ้น ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการกลับทิศทางของสปินมีค่าน้อยลง โดยการเปลี่ยนแปลงของระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ Cu ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจากการคำนวณให้แนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง



ภาพประกอบ 4.6 การเปรียบเทียบผลของความร้อนที่มีต่อระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ Cu ระหว่างผลการคำนวณและการทดลอง

4.1.4 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าคงที่การแพร่

การอธิบายค่าคงที่การแพร่ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของไฮสไตน์ซึ่งแสดงตามสมการที่ (4.11) โดยพบว่าค่าคงที่การแพร่มีค่าแปรผันตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่การแพร่ของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังแสดงตามภาพประกอบ 4.7



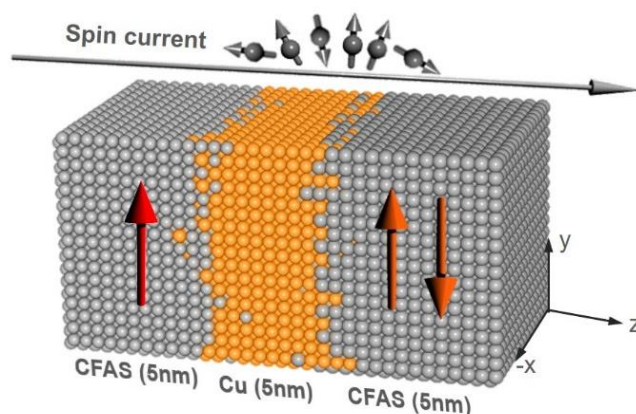
ภาพประกอบ 4.7 ผลของความร้อนที่มีต่อระยะค่าคงที่การแพร่ของวัสดุ Co NiFe และ Cu

จากการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ พบว่าค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อการสั่นของอะตอมและโครงสร้างผลึกทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงอะตอมและเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ภายในวัสดุ จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ในลำดับถัดไปคือการใช้ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ สำหรับการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างสปินนาล์ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน

ความร้อนเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ จากผลการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดความผันผวนของสปินและการเปลี่ยนแปลงลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างของอิเล็กทรอนิกส์ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุ [209]–[211] ซึ่งจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ นำไปสู่การศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินที่ใช้การพิจารณาค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่อุณหภูมิใดๆ

หัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของโครงสร้างวัสดุสามชั้นที่ประกอบด้วย CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ผ่านการคำนวณค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ซึ่งเพื่อง่ายต่อการคำนวณและเป็นการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน งานวิจัยในส่วนนี้จะไม่ทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยจะทำการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มให้มีทิศทางที่แน่นอนและการจัดเรียงทิศทางตามแนวแกน +y ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามจัดเรียงตัวในทิศทาง +y และ -y ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.8 จากนั้นจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีเท่ากับ 5 MA/cm^2 ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุสามชั้น และกำหนดความหนาของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเกิดจากการผสมกันของอะตอมมีค่าเท่ากับ 0.3 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 4.8 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นขนาด 5 MA/cm^2 โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและชั้นอิสระแสดงตามลูกศรแดงและสีส้ม ตามลำดับ

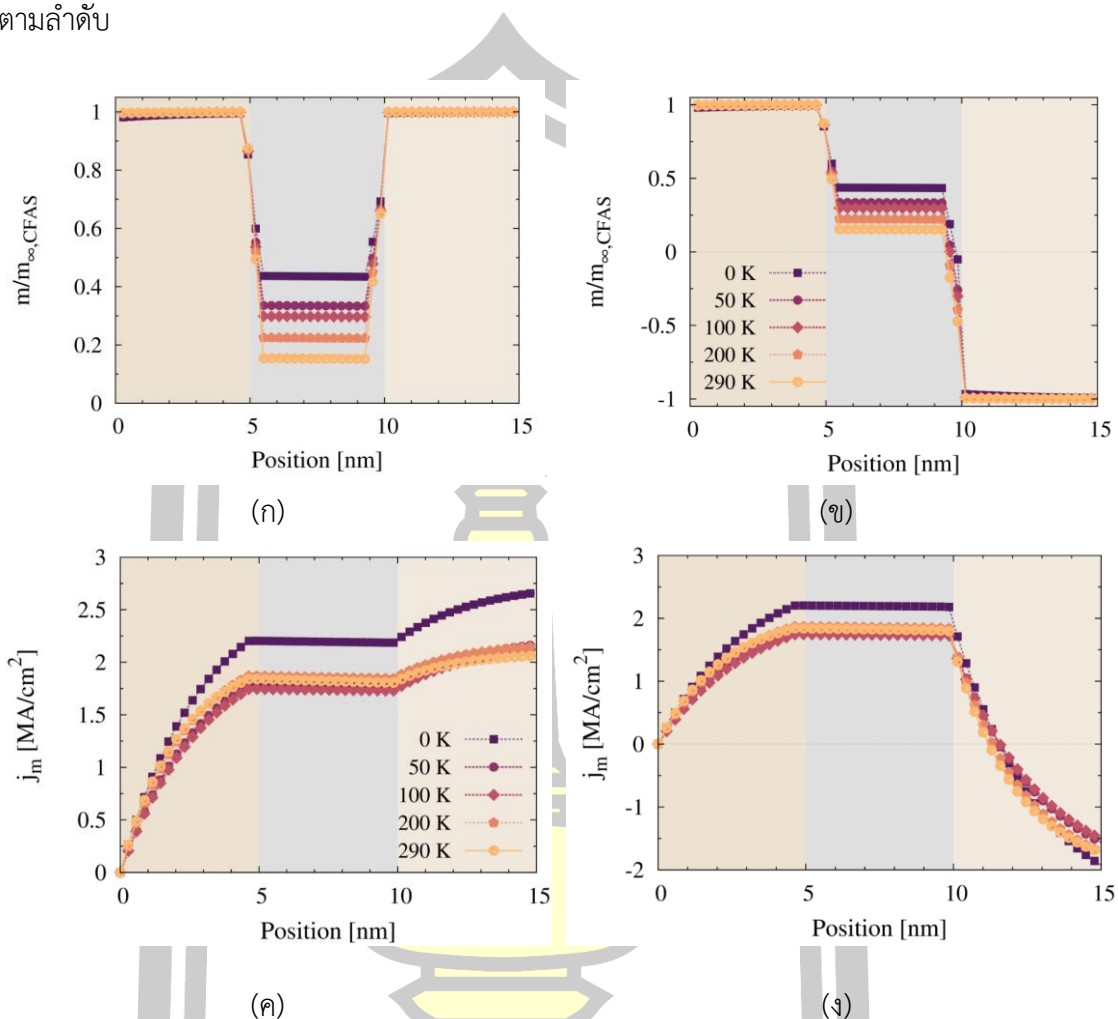
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและกระแสสปินที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกใช้ในการคำนวณค่า RA ของโครงสร้างวัสดุและค่า RA รวมในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ซึ่งรายละเอียดการคำนวณการสะสมสปินและกระแสสปินที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิมียังตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีน

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนที่อุณหภูมิใดๆ ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อการสะสมสปีนและกระแสสปีน โดยจะทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0 - 290 เคลวิน โดยการศึกษาจะทำการพิจารณาในสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม โดยโครงสร้างของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวในแนว $+y$ ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามจะมีการจัดเรียงตัวในแนวแกน $+y$ และ $-y$ ตามลำดับ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการสะสมสปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โดยเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าการสะสมสปีนจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุได้เร็วขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อการลดลงของระยะการแพร่ของสปีนภายในวัสดุ โดยเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนภายในชั้นนอนแมกเนต พบว่าผลของความร้อนส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนภายในชั้นนอนแมกเนต โดยค่าการสะสมสปีนจะมีค่าลดลงและลู่เข้าสู่ศูนย์หรือค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุนอนแมกเนตได้เร็วขึ้น เนื่องจากการลดลงของระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุนอนแมกเนต โดยระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุนอนแมกเนตมีค่าลดลงจาก 625 นาโนเมตร เป็น 260 นาโนเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 58.4 เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เคลวินเป็น 290 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนที่อุณหภูมิใดๆ ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม แสดงดังภาพประกอบ 4.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการสะสมสปีน ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อกระแสสปีนของโครงสร้างสปีนแล้ว จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่ากระแสสปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เช่นเดียวกับการสะสมสปีนและมีค่าลู่เข้าสู่ค่ากระแสสปีนที่สภาวะอิมิตัวของวัสดุตามระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุ โดยค่ากระแสสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวจะมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิ เนื่องจากการลดลงของค่าสปีนโพลาริเซชันของสนามนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในทำนองเดียวกันเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่ากระแสสปีนจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่ากระแสสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุได้เร็วกว่าที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการลดลงของระยะการแพร่ของสปีน โดยผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปีนในโครงสร้างที่

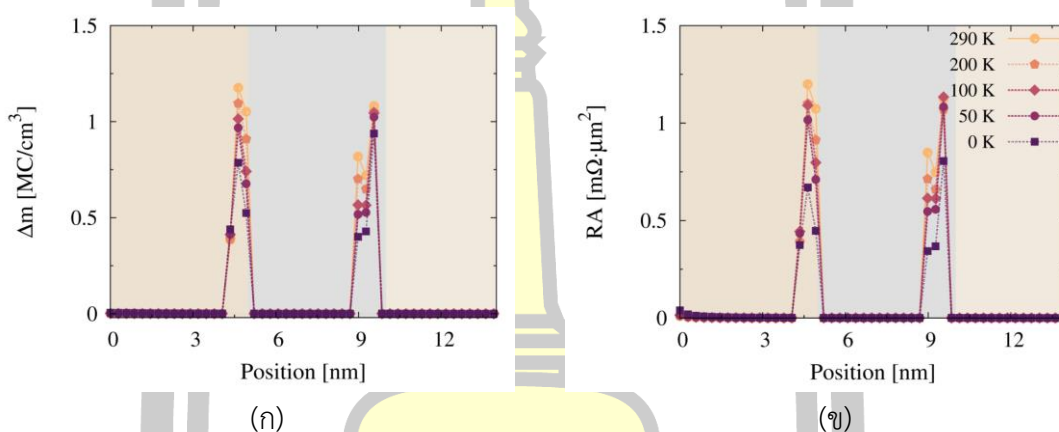
แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามแสดงดังภาพประกอบ 4.9 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.9 ผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้ามและกระแสสปินในโครงสร้าง (ค) แบบขนานและ (ง) แบบตรงกันข้าม

จากนั้นจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่า Δm และขนาดของกระแสสปิน จากการพิจารณาค่าการสะสมสปินและกระแสสปินของโครงสร้างวัสดุสามชั้นที่อุณหภูมิใดๆ เพื่อคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA ของโครงสร้างวัสดุ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าภายในบัลค์ของวัสดุ ค่า Δm จะมีค่าน้อยมากๆ และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากความต่อเนื่องของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุในบริเวณบัลค์และการสะสมสปินมีแนวโน้มนำการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ค่าการสะสมสปินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ส่งผลให้ค่า Δm มีค่าสูงสุดในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม โดย

ขนาดของค่า Δm มีค่าแปรผันตรงกับผลของอุณหภูมิ เนื่องจากการลดลงของระยะการแพร่ของสปินของวัสดุส่งผลให้ค่าการสะสมสปินเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีค่าคู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุได้อย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงของค่า Δm ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 4.10 (ก) นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่า Δm มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า RA ของวัสดุ โดยค่า RA มีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า Δm และการลดลงของค่ากระแสสปินที่เกิดขึ้นจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า RA ที่อุณหภูมิต่างๆ ของวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) แสดงดังตามภาพประกอบ 4.10 (ข)



ภาพประกอบ 4.10 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า Δm และ (ข) ค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานของวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm)

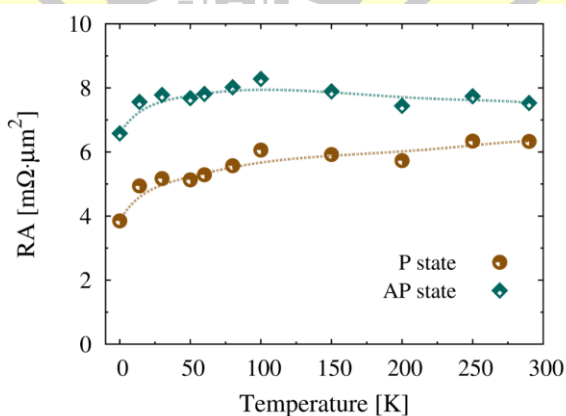
จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่า Δm และค่า RA ในโครงสร้างสปีนวาล์ว ในลำดับถัดไปคือการคำนวณค่า RA รวมในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุ ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

4.2.2 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมและค่าอัตราส่วน MR

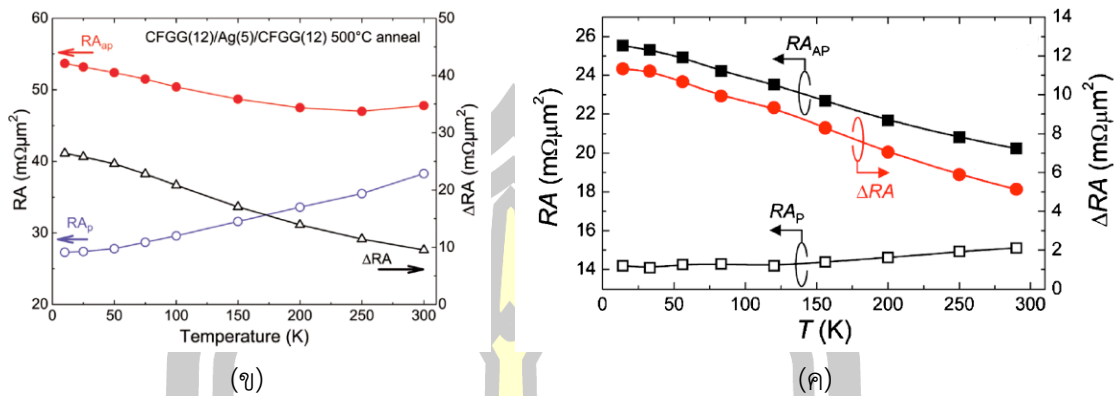
จากการศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ ที่มีต่อค่า RA ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่า RA รวมที่อุณหภูมิต่างๆ ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุสามชั้นจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ผลการศึกษาพบว่าค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานจะมีค่าต่ำกว่าค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามดังแสดงตามภาพประกอบ 4.11 (ก) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

ที่ว่าการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานจะทำให้เกิดการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม และภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม โดยค่า RA รวมของในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิและเริ่มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่า 150 เคลวิน ในขณะที่ค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ เนื่องจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้าของวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อผลของการลดลงของค่ากระแสสปินและค่าระยะการแพร่ของสปินที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า Δm ในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนต

จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามที่อุณหภูมิใดๆ มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลองของ Y. K. Takahashi และคณะ [114] และ T. M. Nakatani และคณะ [70] ที่ทำการศึกษาค่าผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น $\text{Co}_2\text{FeGe}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}(12\text{nm})/\text{Ag}(5\text{nm})/\text{Co}_2\text{FeGe}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}(12\text{nm})$ และโครงสร้าง CFAS(2.5nm)/Ag(5nm)/CFAS(2.5nm) ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.11 (ข) และ (ค) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่า RA รวมระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองพบว่าค่า RA รวมจากผลการคำนวณด้วยการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินที่ทำการพิจารณาเฉพาะผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุให้ค่า RA รวมที่ต่ำกว่าผลการทดลอง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของแบบจำลอง ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสปินและแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุ

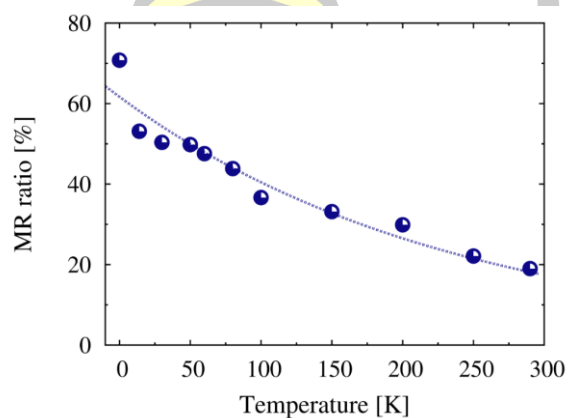


(ก)



ภาพประกอบ 4.11 (ก) ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) และผลการทดลองของ (ข) Y. K. Takahashi และคณะ [114] และ (ค) T. M. Nakatani และคณะ [70]

โดยทั่วไปการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจะถูกพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า RA รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุสปินวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ผลการคำนวณค่าอัตราส่วน MR จากการพิจารณาค่า RA รวมที่มีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงจาก 70.77% เป็น 48.5% คิดเป็นร้อยละ 71.43 เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 290 เคลวิน เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ที่อุณหภูมิใดๆ แสดงดังภาพประกอบ 4.12



ภาพประกอบ 4.12 ผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ในโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) จุดวงกลมแสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณและเส้นประแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์

จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีของค่า RA รวมและค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุสามชั้นจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนที่อุณหภูมิใดๆ พบว่าค่า RA รวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า Δm และการลดลงของค่ากระแสสปีน ในขณะที่ค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิ เนื่องจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วน MR ซึ่งเป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในการจำแนกสัญญาณข้อมูลบิต 0 และบิต 1 จะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนของวัสดุในโครงสร้างหัวอ่านนั้นๆ โดยผลของความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนและค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า RA รวมจากผลการคำนวณจะพบว่ามีความโน้มที่สอดคล้องกับการทดลองแม้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าที่แตกต่างจากผลการทดลอง เนื่องจากการพิจารณาวัสดุต่างชนิดกันและในงานวิจัยส่วนนี้ต้องการพิจารณาเฉพาะผลของความร้อนที่มีต่อการส่งผ่านสปีนเท่านั้น ซึ่งทำให้พบว่าการส่งผ่านสปีนส่งผลอย่างมากต่ออัตราส่วน MR โดยกำหนดให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุมีทิศทางที่แน่นอนและเป็นอิสระกับผลของอุณหภูมิ ซึ่งโดยปกติคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับผลของความร้อนก็ตาม [177], [212], [213] เพื่อที่จะสามารถระบุได้ว่าผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของหัวอ่านเกิดจากส่วนใดเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อความเสมือนจริงของแบบจำลองสำหรับการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของสปีนวาล์วจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนและพลวัตแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแมกนีไทเซชันและค่าอัตราส่วน MR

ความร้อนเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ [177], [212], [213] โดยทั่วไปการจัดเรียงทิศทางของสปีนภายในวัสดุแม่เหล็กจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางแกนง่ายของวัสดุ โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปีนให้มีการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของแกนง่ายจะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุ โดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราเมออุณหภูมิจากของระบบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie tempertaure) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของวัสดุมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปีนให้มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางของแกนง่ายจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้พลังงานความร้อนสามารถเอาชนะพลังงานกีดกันของวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดความผัน

ผวนของสปินและเกิดการหักล้างทิศทางกันของสปินจนวัสดุไม่เหลือสภาพความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้น การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจึง เป็นส่วนที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่อุณหภูมิ ใดๆ

4.3.1 ผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชัน

การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กสามารถ อธิบายได้ด้วยสมการ Laudau-Lifshitz-Gilbert (LLG) ตามรายละเอียดที่ได้กล่าวในบทที่ 2 การ เปลี่ยนแปลงพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่ กระทำกับสปินภายในระบบ ซึ่งสนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะประกอบไปด้วย สนามปฏิสัมพันธ์ แลกเปลี่ยน สนามแอนไอโซโทรปี สนามแม่เหล็กภายนอก สนามลบสภาพความเป็นแม่เหล็กและ สนามความร้อน ในขณะที่ไม่มีผลของความร้อน การจัดเรียงตัวของสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุจะมี ค่าขึ้นอยู่กับสนามปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนและสนามแอนไอโซโทรปี ซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในวัสดุ โดย สปินจะมีการจัดเรียงตัวในสถานะที่พลังงานมีค่าต่ำที่สุดและมีทิศทางตามแนวแกนง่ายของวัสดุ ซึ่ง การจัดเรียงตัวของสปินภายในวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยวัสดุแม่เหล็ก เฟอร์ไรต์ CFAS มีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กดังนี้

$$\text{ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก} : \mu_s = 1.246 \times 10^{-23} \text{ J/T}$$

$$\text{ค่าบริพันธ์การแลกเปลี่ยน} : J_{ij} = 5.1094 \times 10^{-21} \text{ J/link}$$

$$\text{ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี} : k_u = 9.0261 \times 10^{-24} \text{ J/atom}$$

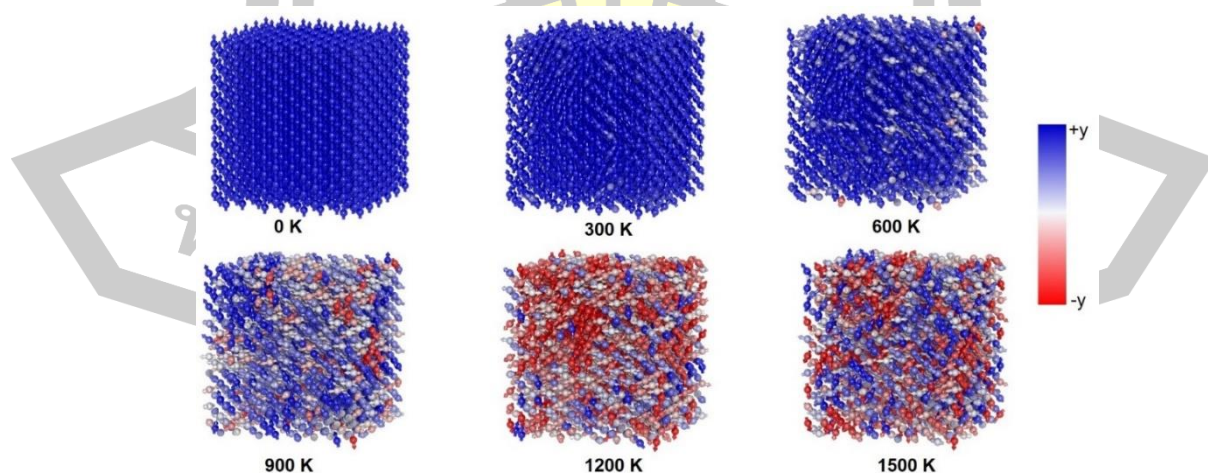
$$\text{ค่าคงที่การหน่วง} : \alpha = 0.005$$

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สนามความร้อนจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการ จัดเรียงตัวของสปินภายในวัสดุ เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อการลดลงของค่าคงที่แอนไอโซโทรปี และค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินมีให้แนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของ แกนง่ายภายในวัสดุ ดังนั้นในลำดับแรกจึงจะทำการพิจารณาผลของสนามความร้อนที่มีต่อพลวัตของ แมกนีไทเซชันภายในวัสดุ เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0 เคลวิน เป็น 290 เคลวิน

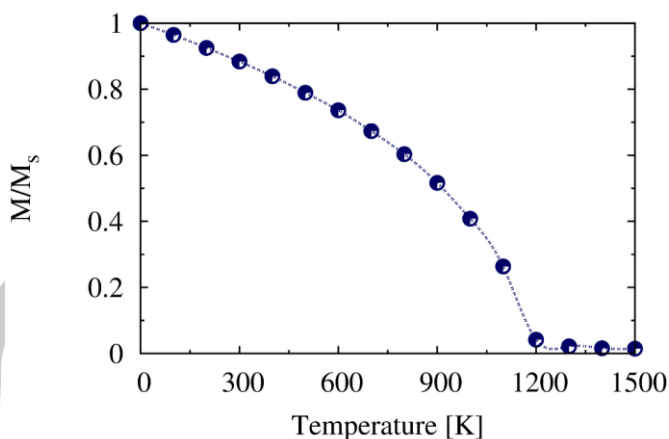
กระบวนการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ค่าความต้านทาน ทางแม่เหล็กในการแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อแสดงในรูปแบบของ ค่าสัญญาณทางไฟฟ้า ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียง ทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นฟิล์มบางแม่เหล็กภายในโครงสร้างสปินวาล์ว โดยทั่วไปความผัน

ผวนของแมกนีไทเซชันภายในหัวอ่านข้อมูลจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดสัญญาณรบกวนในกระบวนการอ่านข้อมูล ซึ่งความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในหัวอ่านข้อมูลสามารถเกิดได้จากผลของความร้อน (thermal magnetisation fluctuation noise หรือ mag noise) และสปินทอร์ก (spin transfer torque noise) โดยค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้จากความผันผวนของแมกนีไทเซชันทั้งภายในชั้นพินและชั้นอิสระ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถอธิบายผลของความร้อนส่งผลต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ในกรณีนี้จะทำการเลือกค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 5 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำและไม่ทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ซึ่งจะทำการพิจารณาเฉพาะผลของความร้อนที่มีต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นซึ่งประกอบด้วย CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm)

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ CFAS การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วแสดงตามภาพประกอบ 4.8 แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจัดเรียงตัวในทิศทาง +y ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามจัดเรียงตัวในทิศทาง -y และ +y ตามลำดับ โดยทั่วไปคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ผลของความร้อนส่งผลต่อการลดลงของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีและค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปิน วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กพารา เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิคูรี เนื่องจากที่อุณหภูมิคูรีค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแกนง่ายของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์



(ก)



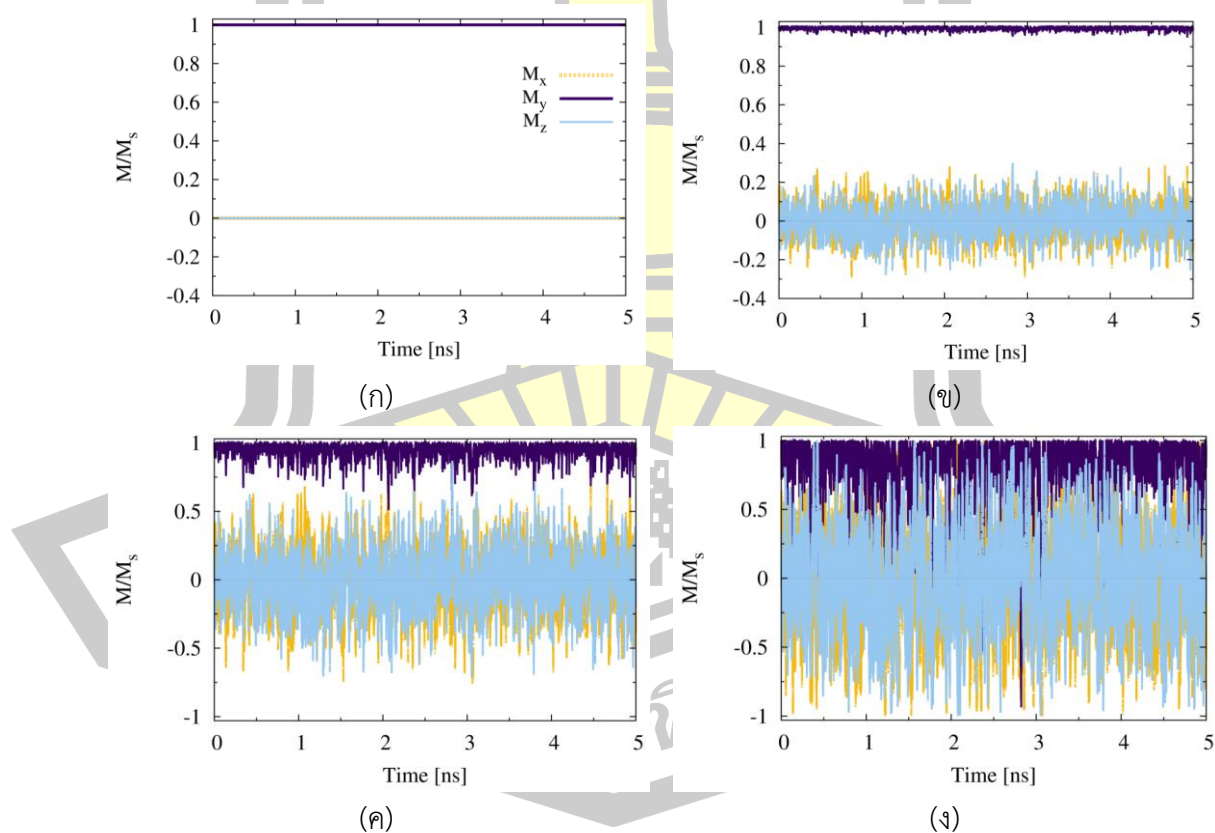
(ข)

ภาพประกอบ 4.13 ผลของความร้อนที่มีต่อ (ก) ค่าแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS และ (ข) ค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของชั้นพินและชั้นอิสรระ ซึ่งมีค่า T_c ประมาณ 1200 K ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลอง [214], [215]

จากผลการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการจัดเรียงตัวของสปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS พบว่า ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน สปินภายในวัสดุจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางของแกนง่ายหรือตามแนวแกน $+y$ ได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สปินภายในระบบจะเกิดความผันผวนและมีการจัดเรียงตัวเบนออกจากแนวแกนง่าย และเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิคูรีจะมีการเรียงตัวแบบสุ่ม โดยความผันผวนและการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของสปินจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.13 (ก) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็ก CFAS พบว่าขนาดของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าประมาณ 1200 เคลวิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.13 (ข) โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการศึกษาในเชิงการทดลอง [214], [215] ที่พบว่าอุณหภูมิคูรีของวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ CFAS มีค่าประมาณ 1170 เคลวิน

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการจัดเรียงตัวของสปินและขนาดของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น โดยการพิจารณาผลของความร้อนที่มีค่าตั้งแต่ 0 – 290 เคลวิน เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา [70],[115],[69] โดยในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสรระหรือชั้นแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล จากผลการคำนวณ

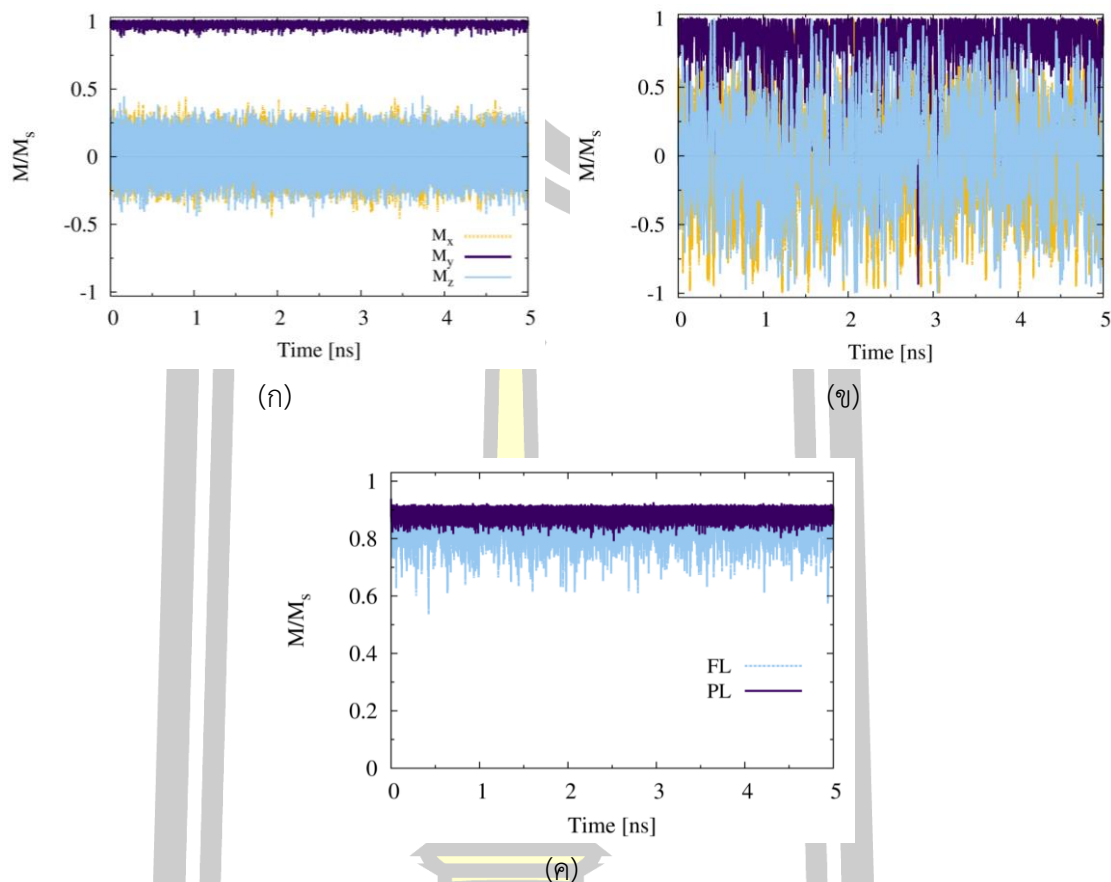
แสดงให้เห็นว่าความร้อนส่งผลโดยตรงต่อความผันผวนของพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระของหัวอ่านข้อมูล โดยที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระสามารถจัดเรียงตัวในทิศทางของแกนง่ายหรือทิศทางแกน y ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากในขณะที่ไม่มีผลของความร้อน การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้สปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางแกนง่ายของวัสดุ โดยพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.14 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผลของความร้อนจะทำให้ค่าพลังงานในการรักษาทิศทางของสปินในแนวแกนง่ายมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้สปินเกิดความผันผวนและมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนง่าย ทำให้เกิดองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x และ z ซึ่งการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนง่ายของแมกนีไทเซชันหรือการเกิดองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x และ z มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ ซึ่งความผันผวนของพลวัตของแมกนีไทเซชันจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามผลของอุณหภูมิ โดยพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 14 100 และ 290 เคลวินแสดงดังภาพประกอบ 4.14 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.14 ผลของความร้อนที่ส่งผลต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่อุณหภูมิ (ก) 0 (ข) 14 (ค) 100 และ (ง) 290 เคลวิน

นอกจากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ในงานวิจัยนี้ได้ยังได้ทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินเพื่อให้มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากความผันผวนดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในหัวอ่านข้อมูล และแบบจำลองหัวอ่านข้อมูลโดยทั่วไปจะกำหนดให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินมีทิศทางที่แน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำกับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยในโครงสร้างสปินวาล์วแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะถูกกำหนดทิศทางให้มีทิศทางที่แน่นอน จากการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ที่เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนพลังงานของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ซึ่งจากการปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าเท่ากับศูนย์ (Coercivity field, H_c) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น ซึ่งเพื่อความเสมือนจริงของแบบจำลองในการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นได้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางแกนง่ายของวัสดุโดยตรงแทนการใช้สนามไบอัสแลกเปลี่ยน เพื่อกำหนดให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินมีทิศทางที่แน่นอน เมื่อพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 290 เคลวิน พบว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินมีความผันผวนที่น้อยกว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กภายนอกพยายามเอาชนะผลของสนามความร้อนที่ทำให้สปินภายในวัสดุเกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ให้มีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุ นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาขนาดของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระที่เวลาต่างๆ พบว่าขนาดของแมกนีไทเซชันของวัสดุมีค่าลดลง เนื่องจากผลของความร้อนทำให้สปินเกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่มและเกิดการหักล้างทิศทางระหว่างสปินภายในชั้นวัสดุ ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะมีความผันผวนที่น้อยกว่าชั้นอิสระ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.15 (ค) เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กภายนอกพยายามจัดเรียงทิศทางของสปินภายในชั้นพินให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่าย ส่งผลให้สปินภายในชั้นพินเกิดการเบี่ยงเบนจากแนวแกนง่ายที่น้อยลงและมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มที่ต่ำ



ภาพประกอบ 4.15 พลวัตของแมกนีไทเซชันของ (ก) ชั้นพิน (ข) ชั้นอิสระ และ (ค) ขนาดของแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 290 เคลวิน

จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ พบว่าความร้อนส่งผลโดยตรงต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อกำหนดทิศทางของสปินภายในชั้นพินให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแกนง่ายของวัสดุ จะช่วยลดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินเมื่อเทียบกับชั้นอิสระ อย่างไรก็ตาม ความผันผวนของสปินภายในชั้นพินที่เกิดขึ้นจากความร้อน จะทำให้แมกนีไทเซชันมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุ โดยความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินส่งผลให้กระแสสปินโพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวที่ไม่ขนานและตรงกันข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน MR และประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างผลของความร้อนและความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุที่มีต่อการเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณามุม

ระหว่างแนวแกนง่ายและแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อมุมระหว่างแนวแกนง่ายและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหรือมัม θ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.16 (ก) พบว่าที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้มุมระหว่างแนวแกนง่ายและแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากเมื่อไม่มีผลของความร้อนการจัดเรียงตัวของสปีนภายในวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้สปีนจัดเรียงตัวในค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดและมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุ ในการคำนวณค่ามุม θ ที่แต่ละอุณหภูมิ จะต้องทำการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชัน จากนั้นทำการหาค่ามุมเฉลี่ยเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล ในกรณีนี้ทำการพิจารณาตั้งแต่เวลา 2-5 นาโนวินาที

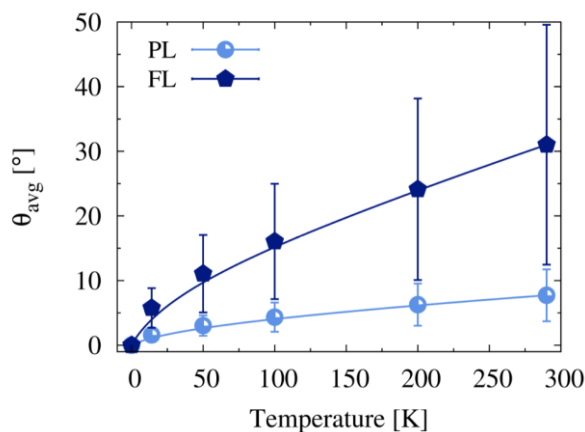
อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น พลังงานความร้อนจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งผลการคำนวณพบว่าค่ามุม θ ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิ โดยมุม θ ภายในชั้นพินจะมีค่าที่ต่ำกว่าชั้นอิสระโดยเมื่อทำการพิจารณาที่ 300 K ชั้นพินเกิดการเบี่ยงเบนไปมากที่สุดที่ 9 องศา ขณะที่ชั้นอิสระเกิดการเบี่ยงเบนจากแนวแกนง่ายเป็นมุม 30 องศา ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.16 (ข)

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาเฉพาะผลของอุณหภูมิดังนั้นจึงทำการศึกษาภายใต้สมมุติฐานที่กำหนดให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวแกนง่ายของวัสดุจากสนามไบอัสแลกเปลี่ยน โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่ามุม θ ของชั้นอิสระมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 องศาเป็น 30 องศา ที่อุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับ 14 และ 290 เคลวิน ตามลำดับ อัตราการเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 236.66 เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการลดลงของค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปีนให้มีทิศทางตามแนวแกนง่ายของวัสดุ นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม θ ของชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์แบบตามแนวแกนง่ายของวัสดุ ส่งผลให้ค่ามุม θ ที่เวลาต่างๆ มีค่าเท่ากันและไม่มีการกระจายตัวของข้อมูล อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามค่าอุณหภูมิ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของสปีนภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของค่ามุม θ ตามผลของอุณหภูมิ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.16 (ค) โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชั้นพินที่อุณหภูมิใดๆ จะมีค่าน้อยกว่าชั้นอิสระ เนื่องจากผล

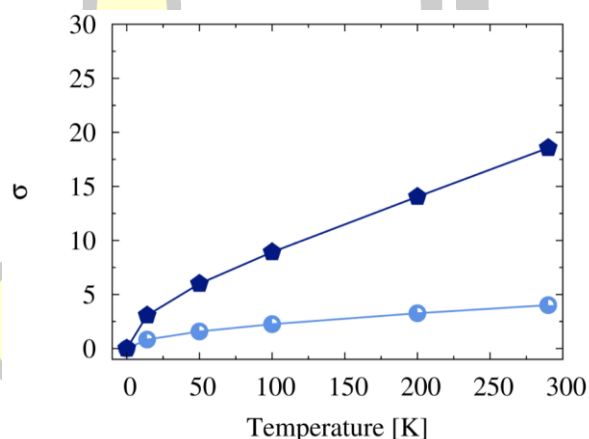
ของสนามไบอัสแลกเปลี่ยน จะทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันและการกระจายตัวของมุม θ ที่น้อยกว่าชั้นอิสระ



(ก)



(ข)

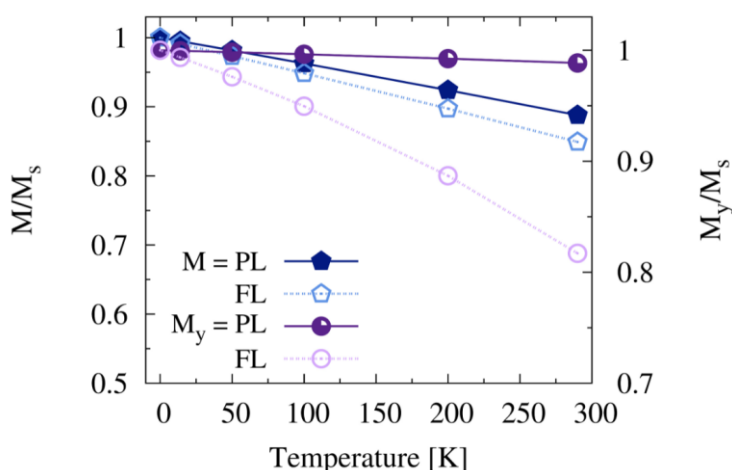


(ค)

ภาพประกอบ 4.16 (ก) การพิจารณามุมระหว่างแนวแกนง่ายและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (ข) ผลของความร้อนที่มีต่อค่ามุม θ เฉลี่ยและ (ค) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชั้นพินและชั้นอิสระ

จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าความร้อนส่งผลโดยตรงต่อการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดความผันผวนในการเคลื่อนที่ของสปินภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยการกระจายตัวของมุม θ จะมีค่าแปรผันตรงกับความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในระบบ เพื่อทำการศึกษผลของความร้อนที่ส่งผลต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาขนาดของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการคำนวณพบว่าขนาดของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระเฉลี่ยมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิของระบบ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.17 เนื่องจากผลของความร้อนทำให้

เกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของสปีน ส่งผลให้เกิดการหักล้างกันระหว่างสปีนภายในวัสดุ ซึ่งแนวโน้มการลดลงของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของชั้นพินและชั้นอิสรระมีผลที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันของวัสดุ CFAS ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.13 (ข) โดยที่อุณหภูมิ 290 เคลวิน ขนาดของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสรระมีค่าลดลงร้อยละ 11 และร้อยละ 15 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชันในแนวแกน y เฉลี่ยของชั้นพิน พบว่าขนาดของแมกนีไทเซชันมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อกำหนดทิศทางของสปีนภายในชั้นพินให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวง่ายหรือแกน y ของวัสดุ ในขณะที่เมื่อพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อแมกนีไทเซชันในแนวแกน y เฉลี่ยของชั้นอิสรระ พบว่าค่าแมกนีไทเซชันในแนวแกน y เฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าลดลงร้อยละ 19 เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เคลวิน เป็น 290 เคลวิน เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของสปีน ซึ่งส่งผลให้สปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุที่มากขึ้น



ภาพประกอบ 4.17 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแมกนีไทเซชันและองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน y เฉลี่ยของชั้นพินและชั้นอิสรระที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสรระ พบว่าผลของความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากความร้อนและส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการอ่านข้อมูลของหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยผลการศึกษาเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าผลของความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการออกแบบหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในลำดับต่อไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของ

โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันและค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุที่มีต่อการสะสมสปินและกระแสสปินของวัสดุ โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

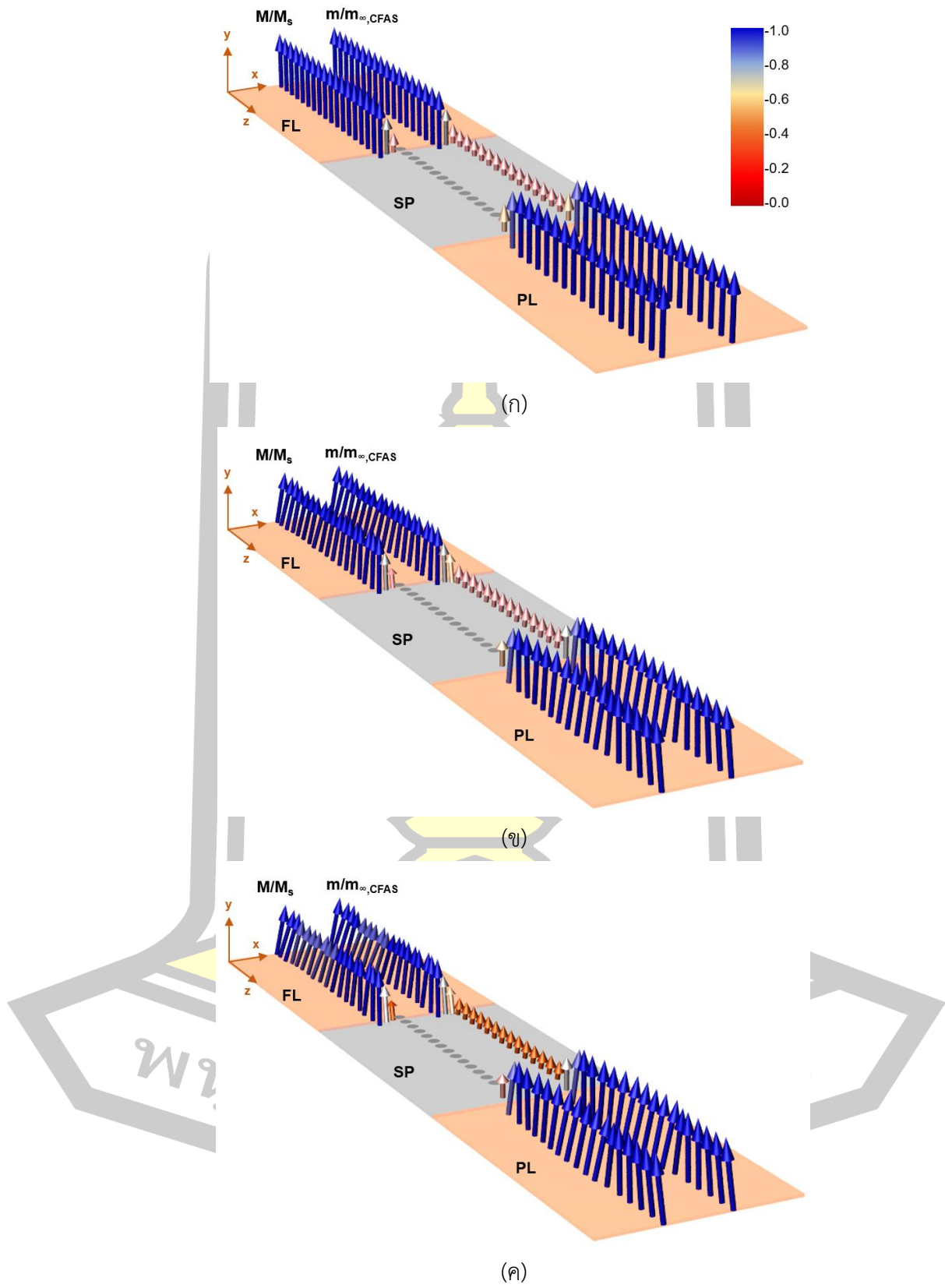
4.3.2 ผลของความร้อนที่มีต่อการสะสมสปินและกระแสสปิน

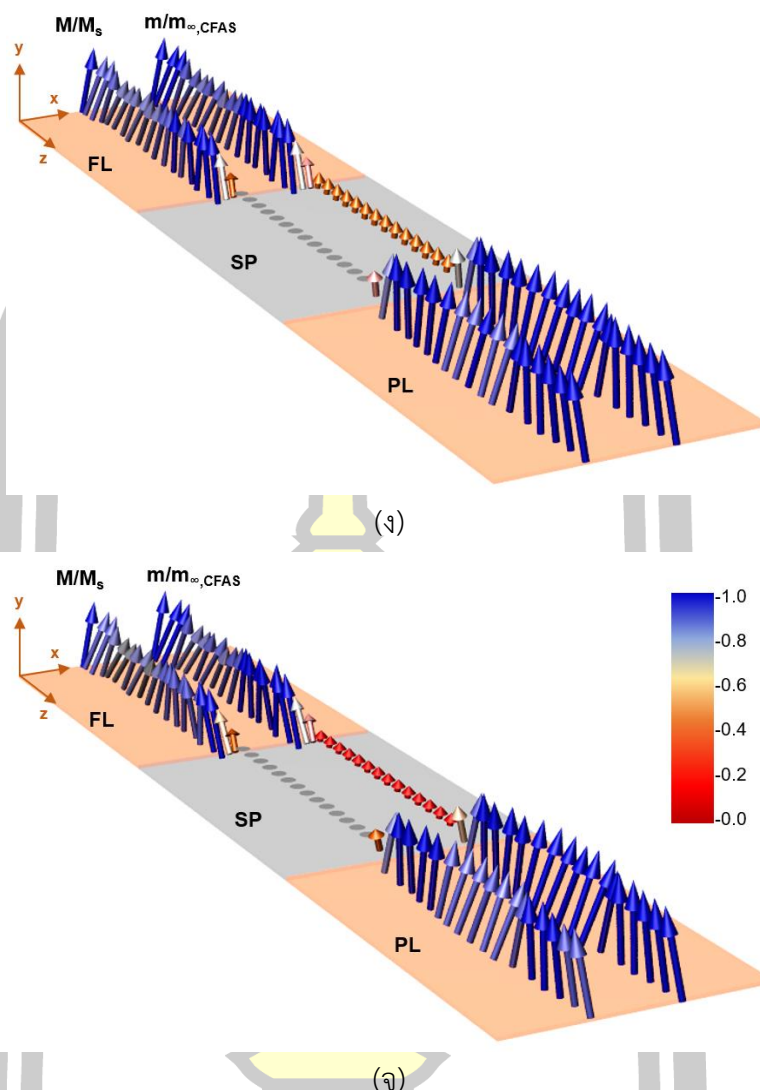
จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุและพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ ที่มีต่อการสะสมสปินและกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่สภาวะสมดุล ในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางขนาน ผลการศึกษาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระมีทิศทางที่แน่นอนและจัดเรียงตัวในแนวแกน y (แกนง่ายของวัสดุ) เนื่องจากเมื่อไม่มีผลของสนามความร้อน การจัดเรียงตัวของสปินภายในชั้นพินและชั้นอิสระจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสนามแอนไอโซโทรปีของวัสดุ ซึ่งจะกำหนดให้สปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามแกนง่ายของวัสดุ นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินยังมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่พยายามเหนี่ยวนำให้สปินภายในชั้นพินมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แน่นอน และในขณะเดียวกันผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลยังส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินเช่นกัน นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าการผสมกันของอะตอมระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์และวัสดุนอนแมกเนต ส่งผลให้แมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าเท่ากับศูนย์ภายในชั้นนอนแมกเนต ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.18 (ก) จากนั้นเมื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น พบว่าการสะสมสปินมีแนวโน้มจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ เนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน $s-d$ ระหว่างสปินของอิเล็กตรอนตัวนำของกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ โดยการสะสมสปินภายในชั้นบัลค์ของชั้นพินและชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวในแนวแกน y และไม่มีองค์ประกอบในแกน x และ z ในขณะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มค่าการสะสมสปินจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการผสมกันของอะตอมระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์และนอนแมกเนต โดยค่าการสะสมสปินจะมีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุนอนแมกเนต ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าการสะสมสปินภายในชั้นวัสดุนอนแมกเนตมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของค่าการสะสม-

สปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.18 (ก) เนื่องจากความหนาของชั้นสเปสเซอร์มีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุนอนแมกเนตค่อนข้างมาก

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผลของความร้อนจะส่งผลต่อแนวโน้มการจัดเรียงตัวและความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก กล่าวคือผลของความร้อนจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสนามความร้อนและสามารถเอาชนะพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางแกนง่ายของวัสดุได้ เนื่องจากการลดลงของค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเกิดการกวัดแกว่งและไม่สามารถจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ โดยผลของความร้อนส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากทิศทางของแกนง่ายและมียองค์ประกอบในแนวแกน x และ z ที่สูงขึ้น ความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปิน เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน $s-d$ ที่ทำให้การสะสมสปินจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การสะสมสปินภายในบัลค์ของวัสดุจะเกิดความผันผวนตามทิศทางของแมกนีไทเซชัน ซึ่งส่งผลให้ค่าการสะสมสปินมีองค์ประกอบในแนวแกน y ที่ลดลงและมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางในแนวแกน x และ z ที่เพิ่มมากขึ้น โดยผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าความผันผวนของแมกนีไทเซชันและการสะสมสปินภายในวัสดุจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.18 (ข) – (จ) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินที่อุณหภูมิ 50 100 200 และ 290 เคลวิน ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นค่าการสะสมสปินภายในชั้นนอนแมกเนตจะมีค่าลดลงและลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อการลดลงของระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ โดยค่าการสะสมสปินภายในชั้นนอนแมกเนตมีค่าลดลงจาก 0.5 เท่าของค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุ CFAS เป็น 0.2 เท่าเมื่ออุณหภูมิมียิ่งเพิ่มสูงขึ้นจาก 0 เคลวินเป็น 290 เคลวิน เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อการลดลงของระยะการแพร่ของสปินภายในชั้นนอนแมกเนต

พูน ปณ ทิโต ชีเว

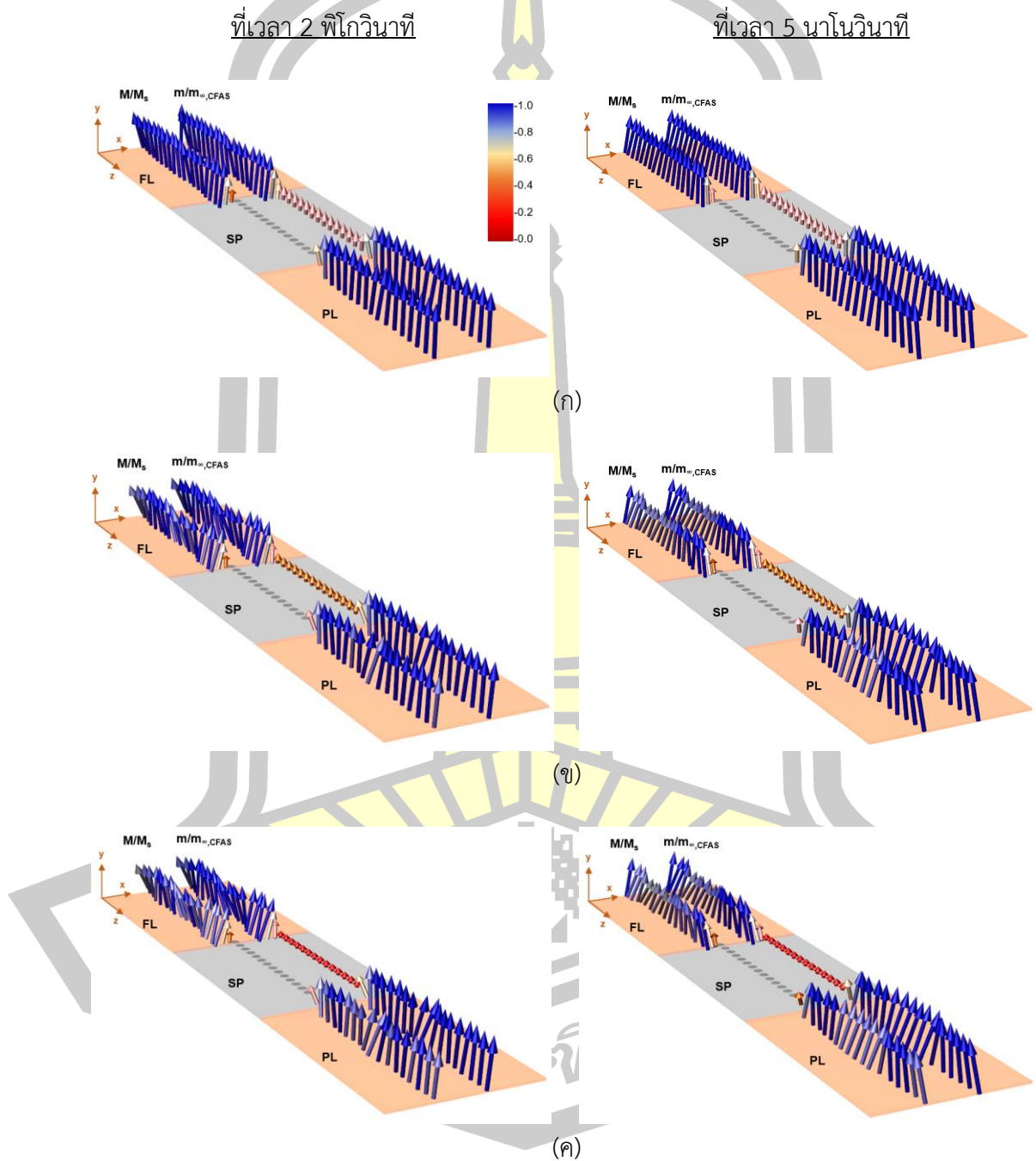




ภาพประกอบ 4.18 ผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและแมกนีไทเซชัน ต่อตำแหน่งที่เวลา 5 นาโนวินาที ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนาน ที่อุณหภูมิ (ก) 0 (ข) 50 (ค) 100 (ง) 200 และ (จ) 290 เคลวิน

โดยทั่วไปพลังงานความร้อนเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยความผันผวนของแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของระบบ ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการสะสมสปินจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยการกวัดแกว่งของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนส่งผลโดยตรงต่อความผันผวนของการสะสมสปินภายในวัสดุ ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ ที่สภาวะเริ่มต้น (2 พิโกวินาที) และที่สภาวะสมดุล (5 นาโนวินาที) พบว่าการสะสมสปินจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ

โดยที่สภาวะเริ่มต้นแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุจะมีการกวัดแกว่งที่สูง เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในวัสดุยังคงมีการปรับเปลี่ยนทิศทางและยังไม่ได้จัดเรียงตัวในสภาวะสมดุลของระบบ ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิ 50 200 และ 290 เคลวิน แสดงดังภาพประกอบ 4.19 (ก) - (ค) ตามลำดับ

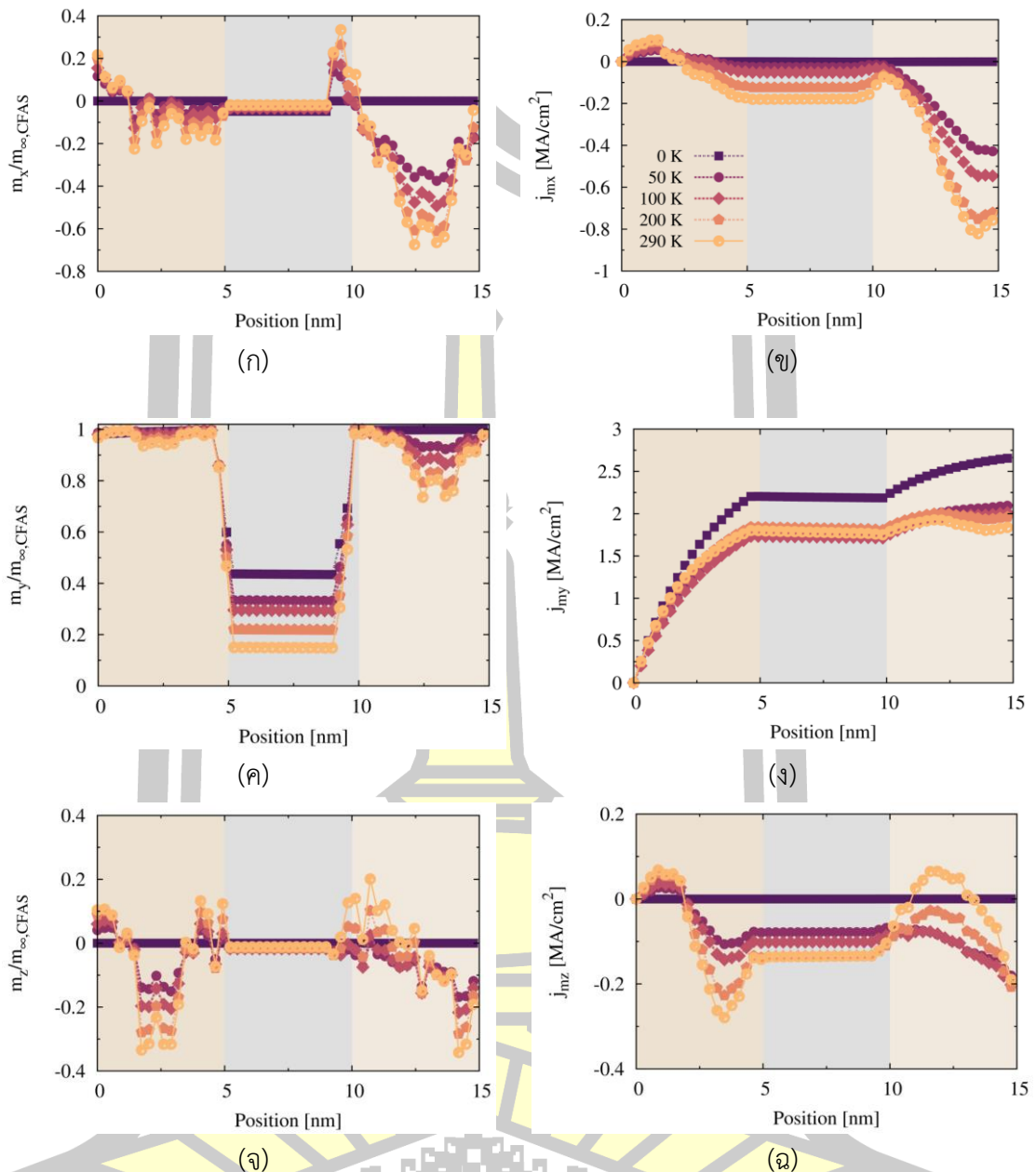


ภาพประกอบ 4.19 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งที่เวลา 2 พิโกวินาทีและ 5 นาโนวินาที ที่อุณหภูมิ (ก) 50 (ข) 200 และ (ค) 290 เคลวิน

จากการศึกษาพลวัตของค่าการสะสมสปีนต่อตำแหน่งที่อุณหภูมิต่างๆ ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของกระแสสปีน จากผลการศึกษาพบว่ากระแสสปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเช่นเดียวกับการสะสมสปีนดังแสดงตามภาพประกอบ 4.20 โดยกระแสสปีนจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน เนื่องจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างสปีนของอิเล็กตรอนตัวนำของกระแสสปีนและแมกนีไทเซชัน ซึ่งจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวส่งผลให้กระแสสปีนที่มีจัดเรียงตัวแบบสุ่ม มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันและมีค่าลู่อู่เข้าสู่ค่าสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุ

จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน กระแสสปีนจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวแกน y ตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุซึ่งมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่าย ซึ่งจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ส่งผลให้กระแสสปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือมีองค์ประกอบในแนวแกน y เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สนามความร้อนจะส่งผลต่อการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นและสามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันของวัสดุได้ จะทำให้สปีนเกิดความผันผวนและมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนง่าย เนื่องจากการลดลงของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ทำให้สปีนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวแกนง่ายของวัสดุ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กระแสสปีนจึงมีองค์ประกอบในแนวแกน x และ z ตามความผันผวนของแมกนีไทเซชัน โดยองค์ประกอบของกระแสสปีนในแนวแกน x และ z จะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.20 (ข) และ (ค) ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่ากระแสสปีนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่ากระแสสปีนเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของสปีนภายในกระแสไฟฟ้าภายนอก โดยค่ากระแสสปีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เนื่องจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปีนและแมกนีไทเซชันของวัสดุ ซึ่งค่ากระแสสปีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลู่อู่เข้าสู่ค่ากระแสสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่ากระแสสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุจะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการลดลงของค่าสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปีนโพลาริเซชันอิมิตัวของวัสดุมีค่าลดลง



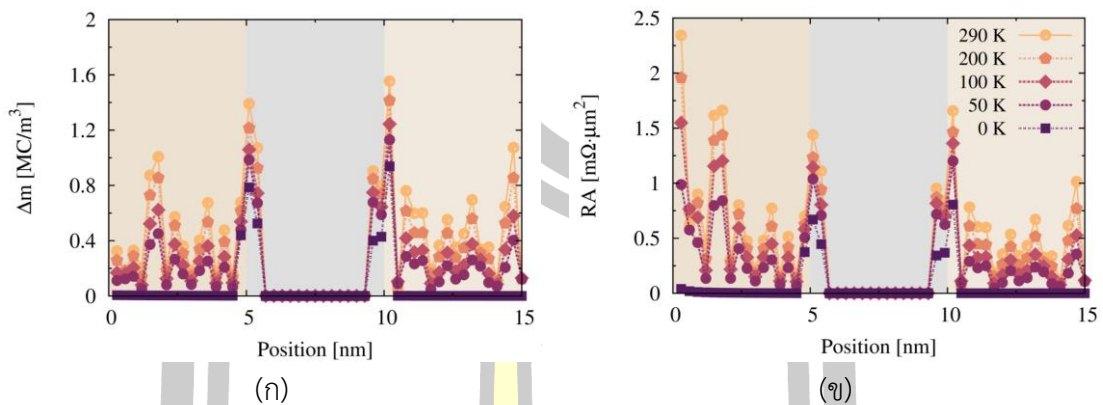
ภาพประกอบ 4.20 ผลของความร้อนที่มีต่อองค์ประกอบของค่าการสะสมสปินในแนวแกน (ก) x (ค) y และ (ฉ) z และองค์ประกอบของค่ากระแสสปินในแนวแกน (ข) x (ง) y และ (ฉ) z ที่เวลา 5 นาโนวินาที ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ในกรณีที่มีแม่เหล็กเซ-ชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนาน

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินที่เวลาต่างๆ ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่า RA ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

4.3.3 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR

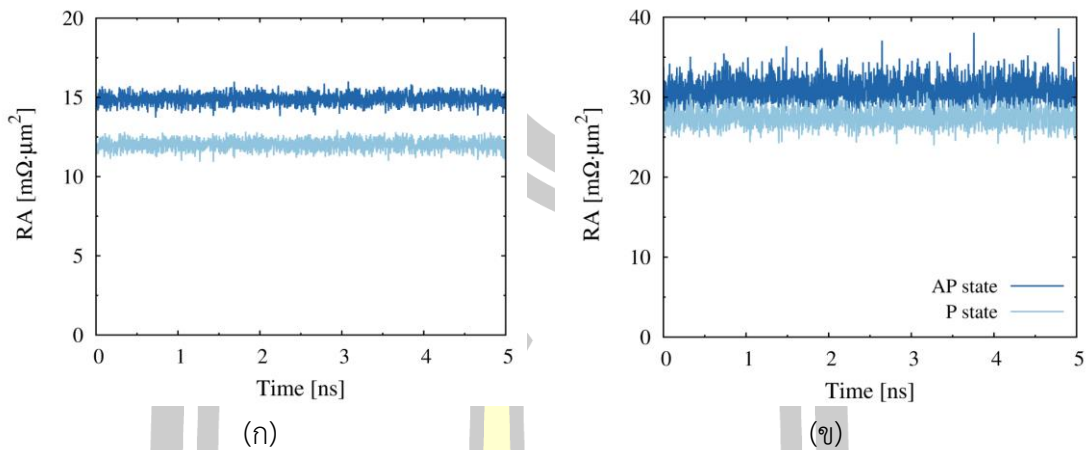
จากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าพลวัตของการสะสมสปีนและกระแสสปีน ในหัวข้อนี้จะการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนหรือค่า Δm และขนาดของค่ากระแสสปีน เพื่อคำนวณพลวัตของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่หรือค่า RA ของโครงสร้างวัสดุ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ค่า Δm ภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหรือบัลค์จะมีค่าน้อยมากๆ และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากความต่อเนื่องของแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนภายในวัสดุ ในขณะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ค่า Δm จะมีค่าสูง เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของแมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อและความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติการส่งผ่านของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต ซึ่งในกรณีที่ไม่มีผลของความร้อน ค่า Δm ที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงสุดและเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผลของความร้อนจะทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันและการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนภายในบัลค์ โดยค่า Δm ภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีความผันผวนและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามผลของอุณหภูมิ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.21 (ก) นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าพีคของค่า Δm ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าแปรผันตรงกับผลของอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการลดลงของระยะการแพร่ของสปีนของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้ค่าการสะสมสปีนเกิดการเปลี่ยนแปลงและลู่เข้าสู่ค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุลของวัสดุได้เร็วขึ้น

ในลำดับต่อมาเมื่อทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA ของวัสดุ พบว่าค่า RA มีค่าแปรผันตรงกับค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Δm ภายในวัสดุ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.21 (ข) โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ค่า RA รวมจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า RA ในบริเวณรอยต่อ เนื่องจากการจัดเรียงตัวแบบต่อเนื่องของแมกนีไทเซชันส่งผลให้ค่า Δm และค่า RA ในบริเวณบัลค์มีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่า RA ในบริเวณบัลค์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิ เนื่องจากการกวัดแกว่งของแมกนีไทเซชันที่ทำให้ค่าการสะสมสปีนเกิดความผันผวนซึ่งส่งผลให้ค่า Δm ภายในชั้นวัสดุและค่า RA มีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของความร้อน นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่า ค่า RA ในบริเวณเริ่มต้นของชั้นฟิล์มจะมีค่าที่สูง เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวกระแสสปีนที่มีทิศทางแบบสุ่มจะเริ่มถูกเหนี่ยวนำทิศทางและจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ส่งผลให้ในบริเวณเริ่มต้นค่ากระแสสปีนที่ถูกนิยามจากผลต่างของจำนวนสปีนขึ้นและสปีนลงภายในกระแสสปีนมีค่าที่ต่ำ



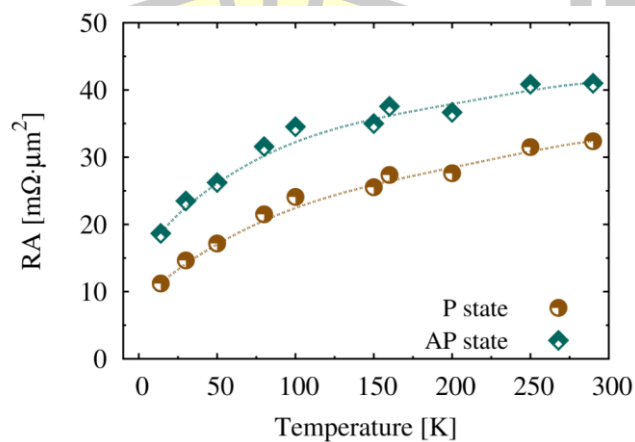
ภาพประกอบ 4.21 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า Δm และค่า RA ที่เวลา 2 พิโกวินาที ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนาน

จากผลการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า RA ต่อตำแหน่งที่เวลาใดๆ ในลำดับต่อไปจะทำการคำนวณผลวัดของค่า RA รวมของโครงสร้างสปีนวาล์วที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลรวมของค่า RA ทุกๆ ตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าผลของความร้อนส่งผลโดยตรงต่อความผันผวนของผลวัดของค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุสามชั้น โดยค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานจะมีค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้าม เนื่องจากการกระเจิงของสปีนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนตและภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในโครงสร้างแบบขนานจะมีค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้าม ซึ่งค่า RA รวมทั้งในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามผลของอุณหภูมิ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้แมกนีไทเซชันภายในวัสดุเกิดความผันผวนและไม่สามารถจัดเรียงตัวตามทิศทางของแกนง่ายของวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การสะสมสปีนซึ่งมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันเกิดความผันผวนและมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสสปีนของวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการลดลงของค่าสปีนโพลาริเซชันของวัสดุ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน แสดงตามภาพประกอบ 4.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.22 พลวัตของค่า RA ในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) ที่อุณหภูมิ (ก) 14 และ (ข) 290 เคลวิน

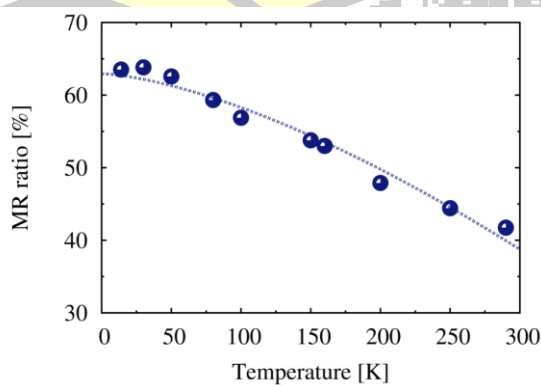
จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของค่า RA รวมในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่า RA รวมเฉลี่ยของโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามที่อุณหภูมิต่างๆ จากการเฉลี่ยค่า RA รวมตั้งแต่ 2 พิโกวินาทีถึง 5 นาโนวินาที ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า RA รวมเฉลี่ยในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามมีค่าสูงกว่าโครงสร้างแบบขนานดังแสดงตามภาพประกอบ 4.23 โดยค่า RA รวมเฉลี่ยทั้งโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าแปรผันตามผลของอุณหภูมิ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กและการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ ส่งผลให้ค่า Δm ภายในบัลค์และบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและขนาดของค่ากระแสสปินมีค่าที่ต่ำลง



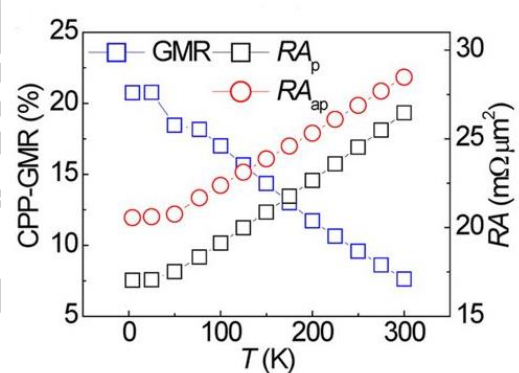
ภาพประกอบ 4.23 ผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมเฉลี่ยในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของวัสดุแม่เหล็ก CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm)

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่า RA รวมเฉลี่ยในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามนำไปสู่การคำนวณค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) มีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิของระบบ โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงจากร้อยละ 64. เป็น 41 คิดเป็นร้อยละ 36.92 เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 14 เคลวินเป็น 290 เคลวิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.24 (ก) เนื่องจากการลดลงของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุและการเพิ่มขึ้นของความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินโพลาไรซ์มีค่าต่ำลง ในขณะที่ความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจึงมีค่าที่ลดลง

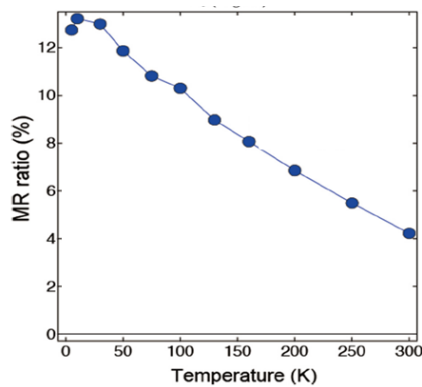
นอกจากการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ในเชิงทฤษฎี ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลอง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจากผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลองของ Z. Wen และคณะ [216] และ B. Kwon และคณะ [217] ซึ่งทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง NiMnSb/Ag/NiMnSb ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.24 (ข) และ (ค) ตามลำดับ และการทดลองของ T. Furubayashi และคณะ [218] ซึ่งทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR โครงสร้างวัสดุ CFAS/Ag/CFAS ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.24 (ง) จากผลการศึกษาในเชิงการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



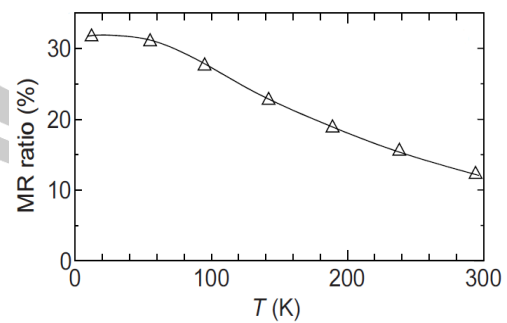
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 4.24 การเปรียบเทียบผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR (ก) ผลการคำนวณในโครงสร้าง CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(5nm) จากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (ข) ผลการศึกษาเชิงการทดลองในโครงสร้าง NiMnSb/Ag/NiMnSb ของ Z. Wen และคณะ [216] (ค) B. Kwon และคณะ [217] และ (ง) ในโครงสร้าง CFAS/Ag/CFAS ของ T. Furubayashi และคณะ [218]

ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ค่า RA รวมของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ ในขณะที่ค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนและการลดลงของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินที่ดีและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

นอกจากผลของความร้อนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล จากผลการศึกษาในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นอิสระเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของเซนเซอร์หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

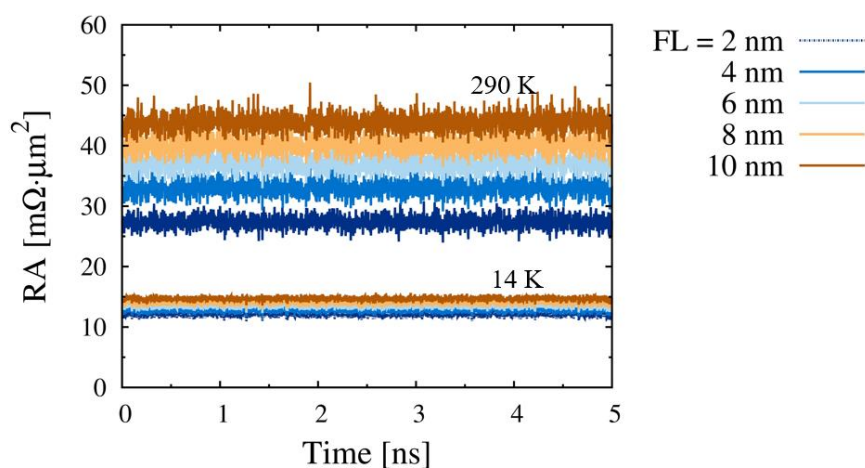
4.4 ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

โดยทั่วไปประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน MR และค่า SNR ของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ปัจจุบันความต้องการลดขนาดของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การลดขนาดของเซนเซอร์ของหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องของบิตข้อมูล ในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาดของชั้นอิสระเป็นตัวแปรที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากความหนาของชั้นอิสระจำเป็นต้องมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดของบิตข้อมูล เพื่อให้หัวอ่านข้อมูลสามารถอ่านข้อมูลได้อย่างถูกต้องและไม่เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้างเคียง [52]

จากผลการศึกษาความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อปรากฏการณ์ GMR ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.3 แสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นอิสระและมีค่าลู่ออกเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ [70], [113] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาความหนาของชั้นอิสระของโครงสร้างสปีนวาล์วที่มีต่อค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ในบทที่ 3 ได้ทำการพิจารณาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุและความหนาของชั้นอิสระซึ่งเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุสามชั้น ดังนั้นเพื่อความเสมือนจริงของผลการคำนวณ ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณทั้งผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่ส่งผลกระทบต่อค่า RA ค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน โดยในส่วนนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(t_F) โดยความหนาของชั้นอิสระมีค่าตั้งแต่ 2.5 – 10 นาโนเมตรและทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจัดเรียงตัวในแนวแกน +y ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามจัดเรียงตัวในแนวแกน +y และ -y ตามลำดับ โดยกำหนดความหนาของการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 3 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

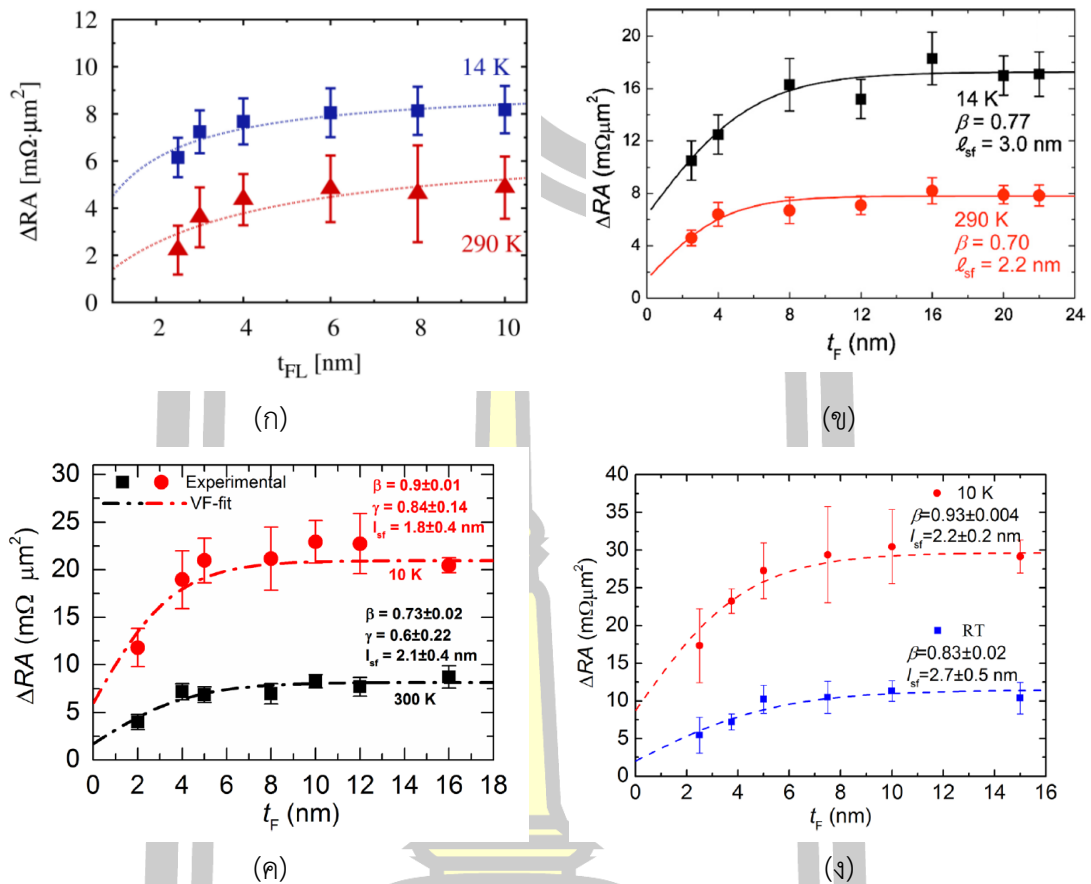
ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อพลวัตของค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบไปด้วย CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(t_{FL}) จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่า Δm และค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งที่เวลาใดๆ ดังรายละเอียดการคำนวณในหัวข้อ 4.3 ที่ได้กล่าวมาแล้วผลการศึกษาค่าผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA รวม ในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน พบว่าผลของความร้อนส่งผลโดยตรงต่อความผันผวนของพลวัตของค่า RA รวมของระบบ โดยความผันผวนของค่า RA รวมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินให้มีการจัดเรียงในแนวแกนง่ายของวัสดุจะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้สปินมีแนวด้นการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายและมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มมากขึ้น โดยความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อค่า RA รวมของระบบ กล่าวคือค่า RA รวมจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ เนื่องจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ทำให้ค่า Δm ภายในบัลคมี่ค่าสูงเพิ่มขึ้นและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า RA รวมของโครงสร้างวัสดุ พบว่าค่า RA รวมมีแปรผันตรงกับค่าความหนาของชั้นอิสระ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปินภายในชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ โดยการเปรียบเทียบผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อพลวัตของค่า RA รวมที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวินแสดงตามภาพประกอบ 4.25



ภาพประกอบ 4.25 ความหนาของชั้นอิสระที่มีผลต่อพลวัตของค่า RA รวมในโครงสร้างแบบขนานที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน

จากการพิจารณาพลวัตของค่า RA รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น โดยการคำนวณค่า RA รวมเฉลี่ยในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่า ΔRA ของโครงสร้างวัสดุ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA ที่อุณหภูมิ 14 เคลวินมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 290 เคลวิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.26 (ก) เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าสปินโพลาไรเซชันของความสามารถนำไฟฟ้าและค่าคงที่การแพร่ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการเหนี่ยวนำทิศทางการสปีนโพลาไรเซชันให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุมีค่าที่ลดลง โดยค่าสปินโพลาไรเซชันของความสามารถนำไฟฟ้าของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร CFAS มีค่าลดลงร้อยละ 10.4 เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14 เคลวินเป็น 290 เคลวิน นอกจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของความร้อนยังทำให้เกิดความผันผวนของสปีนภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลให้แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายที่มากขึ้นและไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้ามได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ค่า ΔRA มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [69], [70], [73], [175], [218]

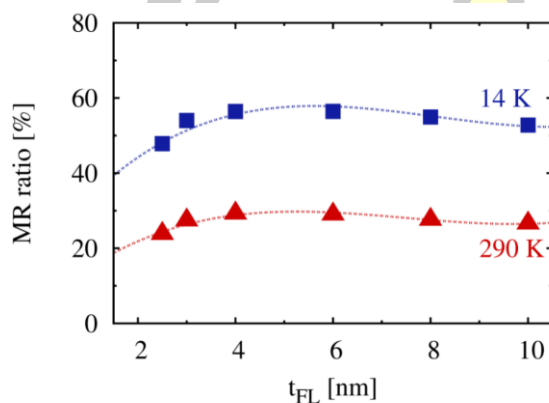
นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA พบว่าค่า ΔRA จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นอิสระและมีค่าคงที่ที่ค่าๆ หนึ่ง เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปีนภายในวัสดุ [70], [113], [115] ซึ่งจากผลการคำนวณผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.26 โดยภาพประกอบ 4.26 (ข) แสดงผลการทดลองของ T.M. Nakatani และคณะ [70] ซึ่งทำการศึกษาค่า ΔRA ภายในโครงสร้างสปีนวาล์วที่ประกอบด้วย $MgO(001)/Cr(10nm)/Ag(100nm)/CFAS(tF)/Ag(5nm)/CFAS(tF)/Ag(5nm)/Ru(8nm)$ และผลการทดลองของ H.S. Goripati และคณะ [115] และ S. Li และคณะ [69] ที่ได้ทำการศึกษาค่า ΔRA ภายในโครงสร้าง $Cr(10nm)/Ag(100nm)/Co_2Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})(tF)/Ag(5nm)/Co_2Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})(tF)/Ag(5nm)/Ru(8nm)$ ดังแสดงตามภาพประกอบ 4.26 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



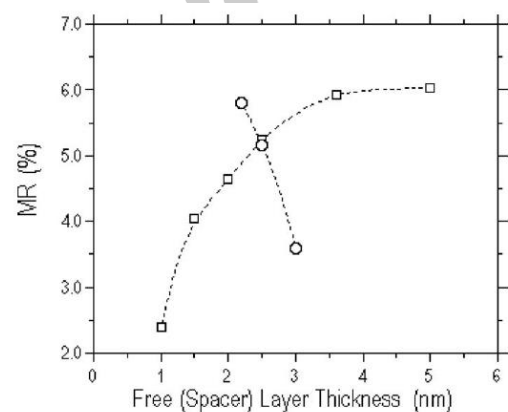
ภาพประกอบ 4.26 ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่า ΔRA (ก) ผลการคำนวณจากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน (ข) ผลการทดลองของ T.M. Nakatani และคณะ [70] (ค) H.S. Goripati และคณะ [115] และ (ง) S. Li และคณะ [69]

จากการศึกษาผลของความร้อนและความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระที่มีต่อค่า ΔRA ในลำดับถัดไปคือการคำนวณผลของความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างสปินวาล์วที่อุณหภูมิ 14 และ 290 เคลวิน จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [69], [70], [73], [175], [218] เนื่องจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุและการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน ในขณะที่ค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาของชั้นอิสระและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปินของวัสดุ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โดยค่ากระแสสปินโพลารไรซ์จะถูกเหนี่ยวนำทิศทางให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุและมีค่าลู่เข้าสู่ค่าสปินโพลารไรซ์เซชันอิมิตัวของวัสดุอย่างสมบูรณ์เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน ซึ่งผลการคำนวณผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุ CFAS(5nm)/Cu(5nm)/CFAS(t_{FL})

แสดงดังภาพประกอบ 4.27 (ก) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นอิสระของผลการคำนวณแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลองของ K. Nikolaev และคณะ [13] ซึ่งทำการวัดค่าอัตราส่วน MR ที่มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นอิสระของโครงสร้างสปีนวาล์ว $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{Rh}_2\text{CuSn}/\text{Co}_2\text{MnGe}$ ดังแสดงภาพประกอบ 4.27 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4.27 (ก) ผลของความร้อนและความหนาของชั้นอิสระที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของวัสดุ $\text{CFAS}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{CFAS}(t_{FL})$ และ (ข) ผลการทดลองผลของความหนาของชั้นอิสระ (□) และความหนาของชั้นสเปซเซอร์ (○) ของโครงสร้างวัสดุ $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{Rh}_2\text{CuSn}/\text{Co}_2\text{MnGe}$ ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ที่อุณหภูมิต่ำ [13]

จากผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิของระบบ เนื่องจากการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุและความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากผลของความร้อน โดยค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นอิสระและมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นอิสระมีค่ามากกว่าระยะการแพร่ของสปิน ซึ่งผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง [13], [69], [70], [115], [191] จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและคุณสมบัติของการส่งผ่านสปินที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีและมีระยะการแพร่ของสปินที่ต่ำจะสามารถลดความหนาของชั้นอิสระภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลที่สูงขึ้นได้

ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิและมีค่าแปรผันตรงกับควมหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็ก โดยค่า ΔRA และค่า

อัตราส่วน MR จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่เมื่อความหนาแน่นค่ามากกว่าระยะเวลาแพร่ของสปีนของวัสดุ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีคุณสมบัติการส่งผ่านสปีนและคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่มีเสถียรภาพทางความร้อนหรือวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่ได้รับความร้อนแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กที่ต่ำ จะช่วยทำให้หัวอ่านข้อมูลยังคงมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีระยะเวลาแพร่ของสปีนที่ต่ำเป็นชั้นอิสระจะทำให้สามารถลดขนาดของชั้นฟิล์มที่ใช้ตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลให้มีขนาดเล็กลงได้ จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคตได้



บทที่ 5

การศึกษาค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลในเชิงการทดลอง

ความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นำไปสู่การลดขนาดของแตร็คและบิตข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งการลดขนาดของพื้นที่การบันทึกข้อมูลดังกล่าวทำให้เกิดการลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับขนาดของบิตการบันทึกข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันการศึกษารออกแบบหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกำลังได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทฤษฎี [14], [19], [52] และการทดลอง [67], [141], [181] โดยทั่วไปหลักการออกแบบหัวอ่านข้อมูลให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญสองประการคือค่าอัตราส่วน MR และอัตราส่วนสัญญาณขาออกต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราส่วน MR และค่า SNR จะมีความสัมพันธ์กับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ผลของความร้อน [187]–[190] ผลที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอก [158], [185], [186] และผลจากการลดขนาดของโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล [169], [170] เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาแนวทางเพื่อเพิ่มค่า SNR และค่าอัตราส่วน MR โดยลดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในอนาคต

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและอัตราส่วน MR ในเชิงทฤษฎีดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในโครงสร้างหัวอ่าน [44], [70], [141] ขนาดของโครงสร้างหัวอ่าน [169], [170] ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า [158], [185], [186] และผลของความร้อน [187]–[190] เป็นต้น นอกจากการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ในเชิงทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้งานจริงในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งในบทนี้จะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านในเชิงการทดลอง โดยจะทำการพิจารณาขนาดและความหนาของโครงสร้างสปินวาล์ว ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านตัวทำความร้อนของหัวอ่าน (reader heater) และผลของแรงดันไบอัส (bias voltage) ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR

จากผลการศึกษาในเชิงทฤษฎีในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นแม่เหล็กอิสระและชั้นสเปเซอร์ของโครงสร้างสปินวาล์วส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่า

อัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในบทนี้จะทำการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ในเชิงการทดลองจะทำการศึกษาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width, RW) และระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันหรือความหนาของโครงสร้างสปีนวาล์ว (shield to shield spacing, SS spacing) ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล เพื่อทำความเข้าใจพื้นฐานและลักษณะของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ในหัวข้อต่อไปจะทำการอธิบายรายละเอียดและประเภทของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ลักษณะของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรม

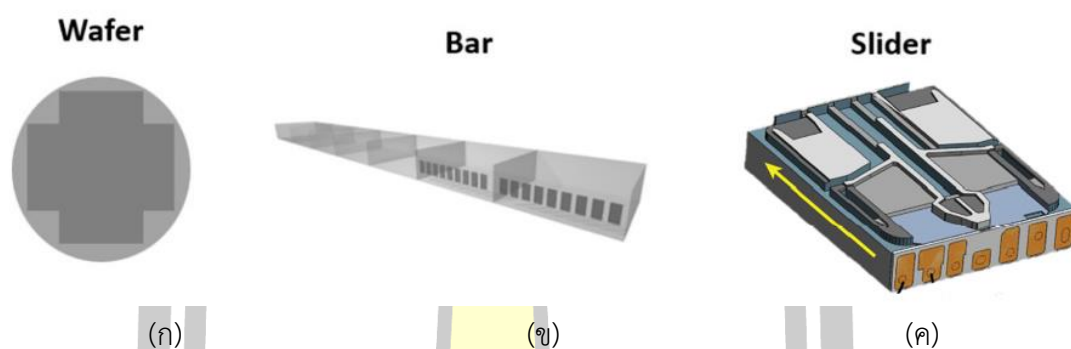
ปัจจุบันกระบวนการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอาศัยคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ในการเก็บข้อมูลในรูปแบบของไบนารีบิต โดยการบันทึกข้อมูลของบิต 0 และ 1 จะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยทั่วไปกระบวนการการแปลงค่าสัญญาณทางแม่เหล็กเพื่อแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้าอาศัยปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีค่าแปรผันตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 กล่าวคือหัวอ่านข้อมูลจะแสดงค่าความต้านทานต่ำสุดหรือแสดงค่าสัญญาณบิต 0 เมื่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และในทางตรงกันข้ามหัวอ่านข้อมูลจะแสดงค่าความต้านทานสูงสุดหรือแสดงค่าสัญญาณบิต 1 เมื่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

โครงสร้างสปีนวาล์วเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณและมีผลโดยตรงต่อการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 หรือ 1 อย่างไรก็ตาม โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมยังประกอบไปด้วยส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งช่วยให้กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น ดังนั้นเพื่อความเข้าใจลักษณะพื้นฐานของหัวอ่านที่ใช้ในการทดลอง ในลำดับแรกจะทำการอธิบายรูปแบบและลักษณะของหัวอ่านข้อมูลจริงที่ใช้ในการทดลอง โดยทั่วไปลักษณะของหัวอ่านข้อมูลในเชิงอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้หาลักษณะตามขั้นตอนการผลิตเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1.) เวเฟอร์ (wafer) ประกอบไปด้วยโครงสร้างของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล โดยทำการปลูกผลึกในลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบางแม่เหล็กหลายชั้นภายในโครงสร้างสปีนวาล์วบนฐานรอง (substrate) ด้วยกระบวนการเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์หรือการเคลือบด้วยไอกายภาพ (physical vapor deposition) จากวิธีการสปัตเตอร์ริง (sputtering process) ซึ่งทำหน้าที่เป็น

หัวอ่านข้อมูลและทำการเว้นระยะห่างระหว่างหัวเขียนและหัวอ่าน ซึ่งในลำดับถัดไปจะเป็นการปลูกผลึกของโครงสร้างหัวเขียนข้อมูลและการปลูกผลึกของขดลวดล้อมรอบโครงสร้างของหัวเขียนข้อมูล โดยมีลักษณะของแผ่นเวเฟอร์แสดงตามภาพประกอบ 5.1 (ก)

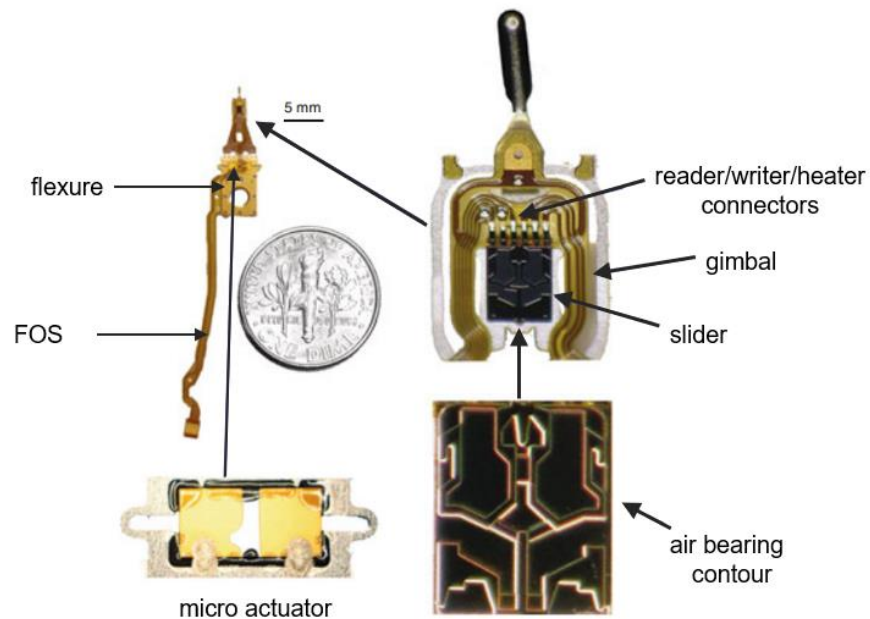
2.) บาร์ (bar) เป็นการตัดแผ่นเวเฟอร์ออกเป็นแถวโดยในแต่ละบาร์จะประกอบไปด้วยหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของสไลเดอร์ (slider) ที่เรียงติดต่อกันดังแสดงตามภาพประกอบ 5.1 (ข)



ภาพประกอบ 5.1 ลักษณะของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบของ (ก) เวเฟอร์ (ข) บาร์ และ (ค) สไลเดอร์ [219]

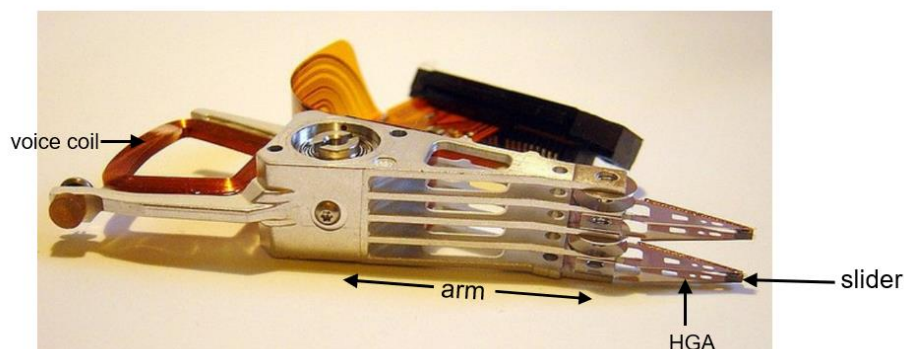
3.) สไลเดอร์ (slider) เป็นการตัดแบ่งโครงสร้างบาร์ โดยในแต่ละสไลเดอร์จะประกอบไปด้วยหนึ่งหัวเขียนและหนึ่งหัวอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 5.1 (ค)

4.) การประกอบหัวอ่าน-เขียนกับฐานรอง (head gimbal assembly, HGA) โดยสไลเดอร์เดี่ยวจะถูกนำมาประกบติดกับฐานรอง (trace gimbal assembly, TGA) โดยฐานรองสไลเดอร์จะประกอบไปด้วยแผ่นรองรับสไลเดอร์ซึ่งถูกเรียกว่าเฟล็กซ์เซอร์ (flexture) และเชื่อมต่อกับสายไฟ (flex on suspension, FOS) โดยบริเวณส่วนปลายของ FOS มีลักษณะเป็นสายไฟที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมวงจรระหว่างสไลเดอร์กับวงจรพิมพ์ (printed circuit cable assembly) ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน FOS เข้าสู่สไลเดอร์ผ่านทางตัวเชื่อมต่อของหัวเขียน/หัวอ่าน/ตัวทำความร้อน (reader/writer/heater connectors) ในกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 5.2 นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลยังอาศัยการทำงานของไมโครแอกทูเอเตอร์ (micro actuator) ที่อยู่บน TGA สำหรับการหาตำแหน่งที่ต้องการบนแผ่นการบันทึกข้อมูล



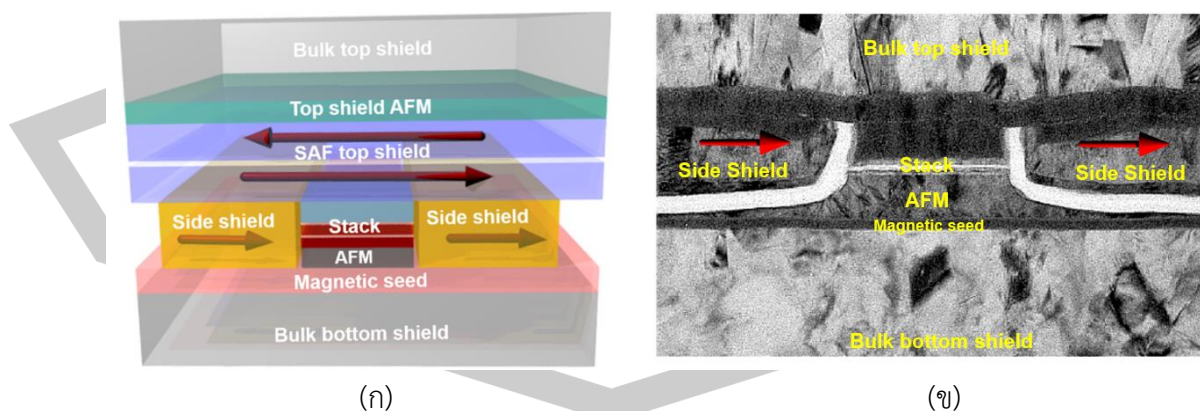
ภาพประกอบ 5.2 โครงสร้าง HGA ซึ่งเป็นการรวมสไลเดอร์เดี่ยวจะถูกนำมาประกบติดกับฐานรอง [220]

5.) การประกอบ HGA เข้าด้วยกัน (head stack assembly, HSA) ก่อนนำไปประกอบเข้ากับแผ่นดิสก์ โดยโครงสร้าง HGA หลายๆ ตัวจะถูกนำมาประกอบเข้ากับแขนกล (arm coil assy) เพื่อทำหน้าที่เป็นฐานประกอบ HGA โดยจะมีวอยล์คอยล์ (voice coil) สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลในกระบวนการบันทึกและอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.3 โดยจำนวน HGA ภายในโครงสร้าง HSA จะมีจำนวนเท่ากับ 2 4 6 หรือ 8 ตัวขึ้นอยู่กับความจุข้อมูลและจำนวนแผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



ภาพประกอบ 5.3 โครงสร้าง HSA จากการรวมโครงสร้าง HGA กับแขนกล [221]

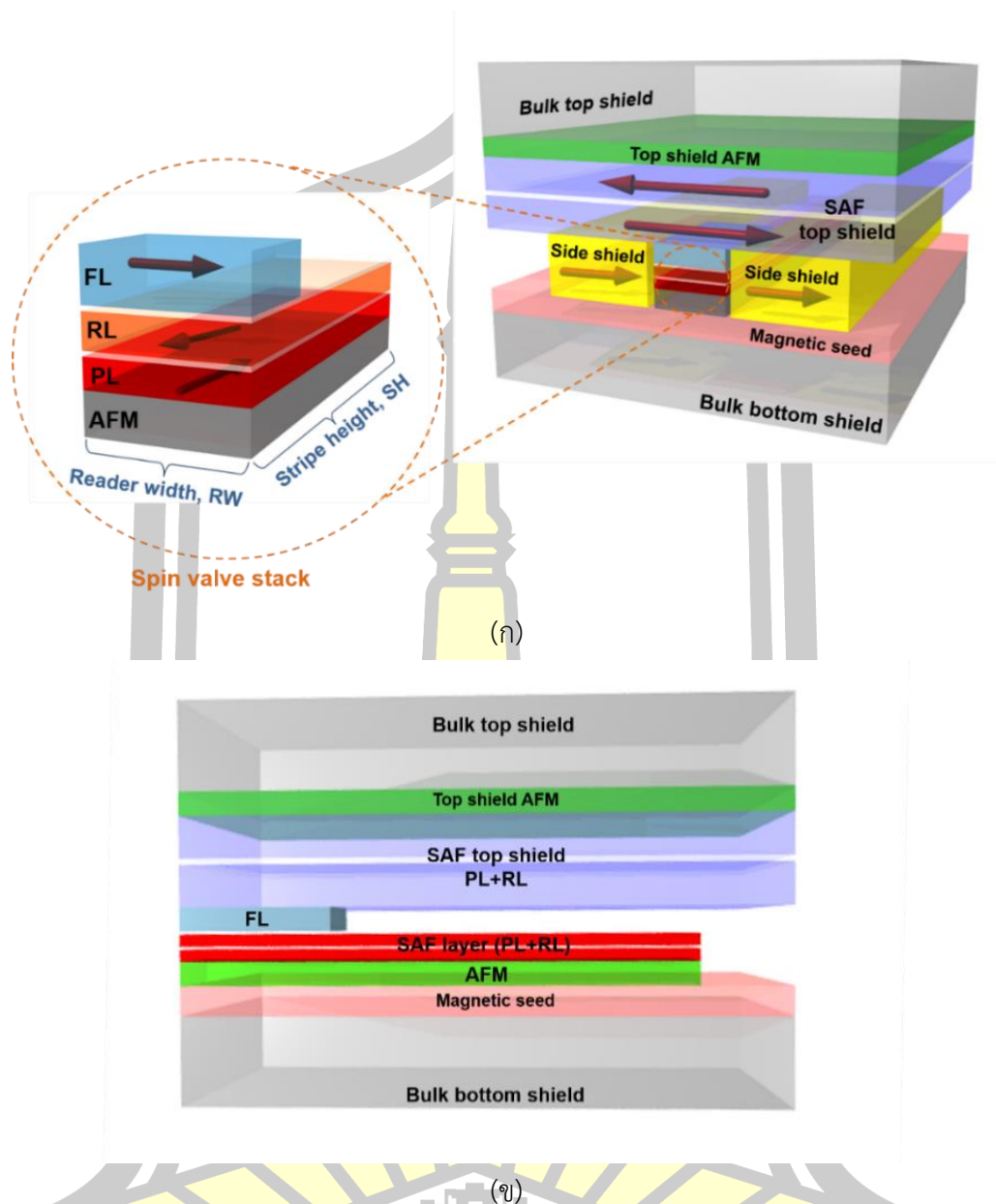
ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายโครงสร้างภายในหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลประกอบด้วยโครงสร้างสปินวาล์วที่ถูกปลูกบนชั้นแรกเริ่มแม่เหล็ก (magnetic seed layer) และอยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นป้องกันด้านข้าง (side shield) ชั้นแรกเริ่มแม่เหล็กถูกใช้เป็นฐานรองเพื่อกำหนดโครงสร้างผลึกของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและชั้นป้องกันด้านข้างของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นชั้นป้องกันด้านข้างมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnet) โดยโครงสร้างของชั้นป้องกันด้านข้างถูกสร้างขึ้นเพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในขณะที่ยังไม่มีภาระเหนี่ยวนำจากแผ่นบันทึกข้อมูลและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในบริเวณขอบด้านข้างของโครงสร้างสปินวาล์ว จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าคุณสมบัติของชั้นป้องกันด้านข้างมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน ดังนั้นการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นป้องกันจึงอาศัยอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นป้องกันด้านข้างและชั้นเสมือนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อยู่ด้านบน (synthetic antiferromagnetic (SAF) top shield) เพื่อเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นป้องกันด้านข้างให้มีค่าที่แน่นอน ซึ่งนอกจากการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นป้องกันด้านข้าง โครงสร้างเสมือนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อยู่ด้านบนยังถูกสร้างขึ้นเพื่อลดผลกระทบของสนามสเตรย์ (stray field) ที่มีต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลข้างเคียงในกระบวนการอ่านข้อมูล โดยโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลทั้งหมดจะถูกประกบด้วยชั้นป้องกันด้านล่าง (bulk bottom shield) และชั้นป้องกันด้านบน (bulk top shield) เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหัวอ่านข้อมูล ดังแสดงในภาพประกอบ 5.4 (ก) โดยลักษณะภาพตัดขวางของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) [222] ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.4 (ข)



ภาพประกอบ 5.4 (ก) ภาพร่างลักษณะของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล และ (ข) ภาพถ่ายตัดขวางของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริง [222]

จากการอธิบายองค์ประกอบโดยรวมภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายรายละเอียดของโครงสร้างสปีนวาล์วหรือโครงสร้างสแตค (stack) ของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล โดยทั่วไปโครงสร้างสปีนวาล์วจะประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กหลักๆ สี่ชั้นได้แก่ ชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร ชั้นพิน ชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูล ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงจะมีทิศทางที่แน่นอนและจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน เนื่องจากปฏิสัมพันธ์การควบคู่แลกเปลี่ยนทางอ้อม (indirect exchange coupling) ตามรายละเอียดในบทที่ 2 ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์ (synthesis antiferromagnetic, SAF) ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ซึ่งถูกกำหนดจากปรากฏการณ์ไอบัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปีนภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร

โครงสร้างสปีนวาล์วที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้วัสดุแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium-oxide, MgO) เป็นชั้นคั่นกลางเพื่อป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยในขณะนี้ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึก ข้อมูลทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงดังแสดงตามภาพประกอบ 5.5 (ก) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความยาวของหัวอ่านข้อมูล (stripe height) พบว่าความยาวของชั้นอิสระมีค่าน้อยกว่าความยาวของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและชั้นเสมือนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เนื่องจากความต้องการเพิ่มความเร็วในการตรวจจับสัญญาณของชั้นอิสระหรือความเร็วในการอ่านข้อมูล ในขณะที่การเพิ่มความยาวของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและชั้นเสมือนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนตจะส่งผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและชั้นพิน โดยความแตกต่างของความยาวระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระสามารถพิจารณาได้จากภาพตัวขวางของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลดังแสดงตามภาพประกอบ 5.5 (ข)



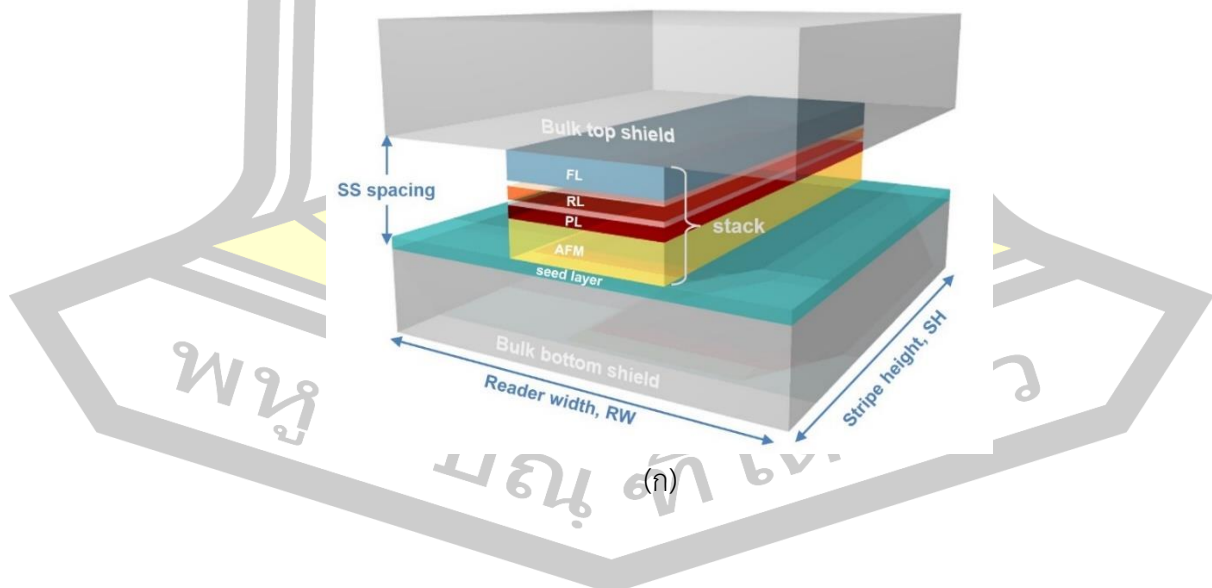
ภาพประกอบ 5.5 (ก) โครงสร้างสปินวาล์วภายในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลโดยลูกครีสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มและ (ข) โครงสร้างภาพตัดขวางของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล

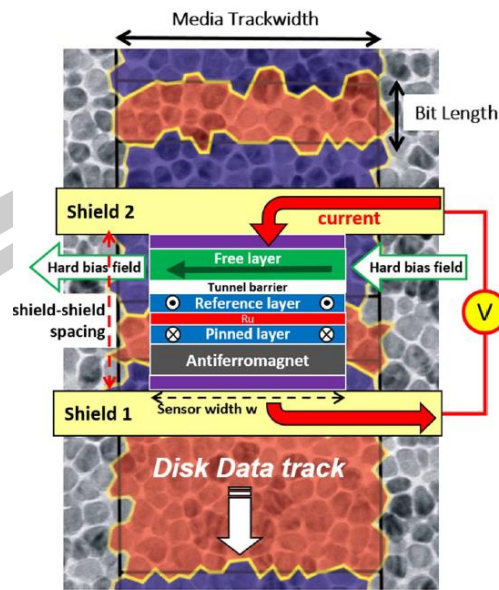
จากการพิจารณาลักษณะของหัวอ่านข้อมูลในเชิงอุตสาหกรรมและโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในเชิงการตลาด ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของขนาดของหัวอ่านข้อมูลที่มีผลต่อความต้านทานทางแม่เหล็กและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

5.2 ขนาดของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ปัจจุบันความต้องการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นำไปสู่การลดขนาดของแตร็คข้อมูล (data track) และบิตข้อมูล (data bit) ภายในแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูล (areal density, AD) การลดขนาดของพื้นที่ของการบันทึกข้อมูลดังกล่าวส่งผลต่อการลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของแตร็คและบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยทั่วไปความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ความหนาของโครงสร้างสปินวาล์วหรือระยะห่างระหว่างชั้นป้องกัน (shield to shield spacing, SS spacing) และความยาวของหัวอ่านข้อมูล (stripe height, SH) จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของแตร็คและบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.6 (ก) โดยขนาดของระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของบิตข้อมูล ในขณะที่ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความกว้างของแตร็คข้อมูล (track width) ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.6 (ข)

โดยทั่วไปขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับขนาดของบิตการบันทึกข้อมูล ซึ่งความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าความกว้างของแตร็คการบันทึกข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากขอบแตร็ค (track-edge noise) [55] และขนาดของโครงสร้างของสปินวาล์วจะต้องมีความหนาที่น้อยกว่าขนาดของสองบิตข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นจากบิตข้างเคียง [52]





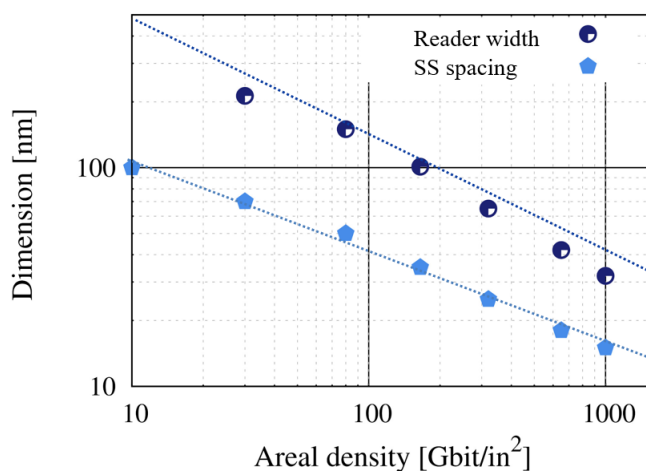
(ข)

ภาพประกอบ 5.6 (ก) โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และ (ข) โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-TMR บนแทร็คข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยพื้นที่สีม่วงและสีแดงภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางพุ่งเข้าและพุ่งออกจากระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลตามลำดับ [99]

จากความสัมพันธ์ของขนาดของหัวอ่านข้อมูลและพื้นที่การบันทึกข้อมูล แสดงให้เห็นว่าความกว้างและระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [52], [99], [223] โดยค่าระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันและความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 33 และ 56 ตามลำดับ เมื่อความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 500 Gbit/in² เป็น 1 Tbit/in² ดังแสดงตามภาพประกอบ

5.7

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันกับความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [223]

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มความจุข้อมูลและขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงให้เห็นว่าขนาดของโครงสร้างของหัวอ่านจะมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูล ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและขนาดของระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ที่มีค่าขึ้นกับขนาดของหัวอ่านข้อมูล โดยในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในรูปแบบบาร์ซึ่งได้มาจากบริษัทซีเกทเทคโนโลยี (สหราชอาณาจักร) โดยทำการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดกึ่งสถิตย์ (quasi static tester) ซึ่งโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง โดยกลุ่มแรกจะพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width, RW) และกลุ่มที่สองเป็นการพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance area, RA) ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันที่แตกต่างกัน โดยการปรับเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นสเปเซอร์ รายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลในแต่ละกลุ่มแสดงตามตารางที่ 5.1

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและความหนาของชั้นสเปเซอร์ (กลุ่มการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทาง-

แม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลถูกวัดจากการใช้เครื่องมือวัดกึ่งเสถียร ซึ่งรายละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองแสดงรายละเอียดในบทที่ 2

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8 nm) RA=0.4 $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$		กลุ่มตัวอย่างที่ 2 CoFeB(3nm)/MgO(t=0.5-1 nm)/CoFeB(8 nm) RW=26 nm	
ความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (นาโนเมตร)	จำนวนของ หัวอ่านข้อมูล	ค่าความต้านทานเชิงพื้นที่ ($\Omega \cdot \mu\text{m}^2$)	จำนวนของ หัวอ่านข้อมูล
26	285	0.30	405
29	405	0.35	402
41	405	0.40	404
		0.45	337
รวม	1,095	รวม	1,548

ในลำดับแรกของการทดลองจะทำการวัดผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล เพื่อพิจารณาขนาดของค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด หรือค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวัลล์แบบตรงกันข้ามและแบบขนาน จากการป้อนค่าแรงดันไบอัสมาตรฐาน (บริษัทซีเทท) ขนาด 140 มิลลิโวลต์ผ่านหัวอ่านข้อมูลที่อุณหภูมิห้องและทำการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ทำให้เกิดการส่งผ่านสปีนโมเมนต์ที่น้อยและเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกระบวนการอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เพื่อทำการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของหัวอ่านข้อมูล จะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่ -2 ถึง +2 กิโลเออร์สเตด (kilo Oersted, kOe) เข้าสู่หัวอ่านข้อมูล ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถสร้างขึ้นได้ โดยไม่ทำให้เครื่องเกิดความร้อนมากเกินไป (overheating) และมีเสถียรภาพในการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของกลุ่มข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่านข้อมูลทำการพิจารณาความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

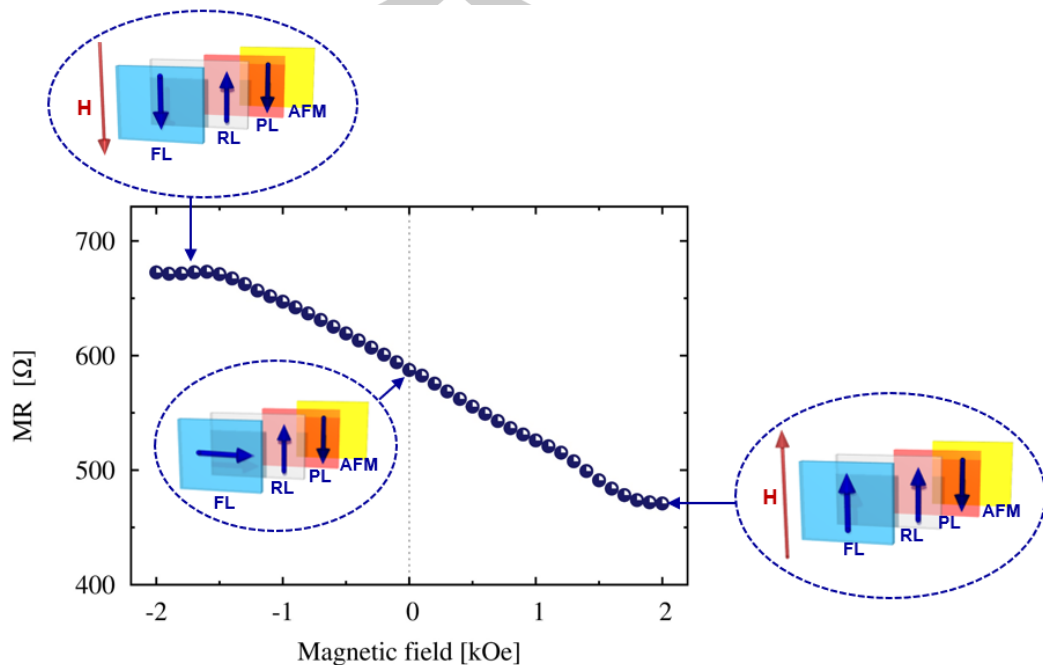
5.2.1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ในลำดับแรกจะทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก โดยในการทดสอบนี้จะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกแทนการเหนี่ยวนำจากแผ่นบันทึกข้อมูล โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8 nm) ที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตร

การทดสอบขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวารล์มีความสำคัญมาก เนื่องจากการทดสอบนี้จะนำไปสู่การบอกข้อจำกัดในการทำงานของหัวอ่านข้อมูลแต่ละหัวว่าสามารถตรวจจับสัญญาณได้ที่ขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ค่าใด และการทดสอบนี้จะนำไปสู่การออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลและการจัดวางระยะห่างระหว่างแผ่นบันทึกข้อมูลและหัวอ่านเพื่อให้เกิดสนามเหนี่ยวนำที่มากพอในการตรวจจับสัญญาณ

โดยจากผลทดลองของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกหรือที่สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเท่ากับศูนย์ ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นพินและชั้นอ้างอิง เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและแมกนีไทเซชันจากชั้นป้องกันด้านข้าง อย่างไรก็ตามเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตามค่าสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นอ้างอิง (AP state) โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดและมีค่าคงที่เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าประมาณ -1.7 กิโลเออร์สเตด เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าต่ำสุดและมีค่าคงที่เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าประมาณ $+1.9$ กิโลเออร์สเตด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกและการอธิบาย

สถานะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง สปินวาล์วในทิศทางขนาน ตรงกันข้ามและ ในขณะที่ไม่ม่มีผลของสนามแม่เหล็กภายนอก แสดงดังภาพประกอบ 5.8



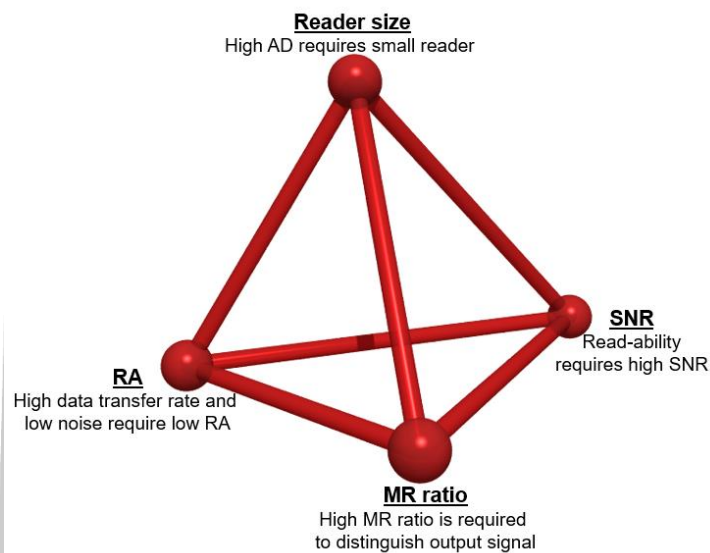
ภาพประกอบ 5.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 26 นาโนเมตร

5.2.2 ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

โดยทั่วไปขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานเชิงพื้นที่ (RA) ค่าอัตราส่วน MR และค่าอัตราส่วน SNR ซึ่งเป็นอัตราส่วนของสัญญาณที่อ่านได้ต่อสัญญาณรบกวน โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างมากจะมีค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การทะลุผ่านของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ส่งผลให้กระแสสปินโพลาร์ไรซ์สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลได้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการตรวจจับสัญญาณที่ดี อย่างไรก็ตามหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างมากจะทำให้เกิดผลของค่าสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขอบของแตร็คข้อมูลข้างเคียง (track edge noise) [55] และข้อจำกัดของการใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงในการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง

ปัจจุบันการลดขนาดของแตร็คข้อมูลเพื่อเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลทำให้เกิดการลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

จากแตร็คข้อมูลข้างเคียง ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล โดยข้อดีของการลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า RA ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการอ่านข้อมูลและการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการแสดงความแตกต่างระหว่างค่าสัญญาณบิต 0 และบิต 1 มีค่าลดลง [51] นอกจากนี้หัวอ่านข้อมูลที่มีค่า RA ที่สูงยังทำให้เกิดข้อจำกัดของค่า SNR หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล [224] โดยความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลและขนาดของหัวอ่านข้อมูลแสดงตามภาพประกอบ 5.9



ภาพประกอบ 5.9 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลซึ่งเป็นเงื่อนไขในการออกแบบหัวอ่านข้อมูล

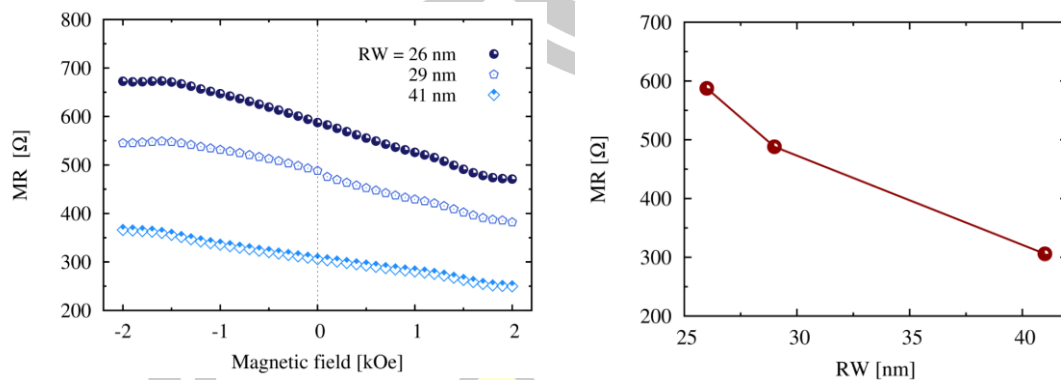
ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่า RA และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยในลำดับแรกจะทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของกลุ่มตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลแตกต่างกัน โดยทำการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบและทิศทางบวกตามลำดับ

จากการพิจารณาผลของขนาดความกว้างของหัวอ่านดังรายละเอียดข้างต้นแสดงให้เห็นว่า หัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลทีมากจะต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นเพื่อเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีทิศทางขนานหรือทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นอ้างอิง โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 41 นาโนเมตรจะต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่า 2 กิโลเออร์สเตดเพื่อที่จะสามารถเหนี่ยวนำทิศทางของสปินทั้งหมดภายในชั้นอิสระให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากบิตข้อมูลเพื่อเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระของหัวอ่านข้อมูล ในขณะที่หัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 และ 29 นาโนเมตร จะมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสูงสุดและต่ำสุดคงที่เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่ามากกว่า -1.7 และ +1.9 กิโลเออร์สเตด ตามลำดับดังแสดงในภาพประกอบ 5.10 (ก) แต่อย่างไรก็ตามหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างที่น้อยจะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล

เมื่อทำการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กพบว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กหรือค่า RA จะมีค่าแปรผกผันกับขนาดของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลทีมากหรือมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สูง กระแสไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านหัวอ่านข้อมูลได้ง่ายซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ ความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกแสดงตามภาพประกอบ 5.10 (ข) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า RA จากการลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลและค่าสัญญาณรบกวน [51], [224]

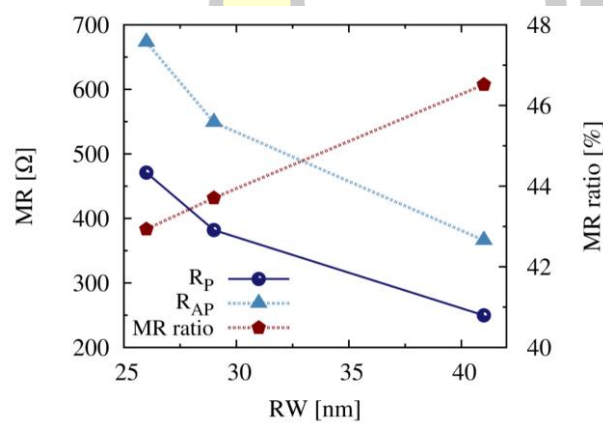
ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม จากการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่ำสุดและสูงสุดของหัวอ่านข้อมูล จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กทั้งในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าแปรผกผันกับความกว้างของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 43 เป็น 46.5 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 8.13 เมื่อความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 26 นาโนเมตรเป็น 41 นาโนเมตร ดังแสดง

ตามภาพประกอบ 5.10 (ค) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การทะลุผ่านของสปินภายในโครงสร้างสปินวาล์ว [225]



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 5.10 (ก) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่ทำการศึกษาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อ (ข) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่ไม่มีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก และ(ค) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR

จากการศึกษาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ในเชิงการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งการแสดงค่าความแตกต่างของค่าสัญญาณบิต 0 และบิต 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีขนาดที่มากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการลดลงของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กหรือค่า RA ของหัวอ่านข้อมูล

โดยส่งผลให้ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง [51], [224] อย่างไรก็ตามการเพิ่มความกว้างของหัวอ่านข้อมูลกลับทำให้เกิดข้อจำกัดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทิศทางแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ กล่าวคือค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูลจำเป็นต้องมีค่าที่สูงขึ้นและมีค่ามากพอที่จะสามารถเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้มีการจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้การเพิ่มขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลยังส่งผลต่อการเพิ่มของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากแตร็คข้อมูลข้างเคียง [55]

ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่ทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่น้อยจึงมีความสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงและมีความกว้างของแตร็คข้อมูลที่ต่ำ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ตามรายละเอียดในบทที่ 3.4 สามารถนำมาประยุกต์ใช้และแก้ไขข้อจำกัดของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-TMR ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลที่สูงในอนาคตได้

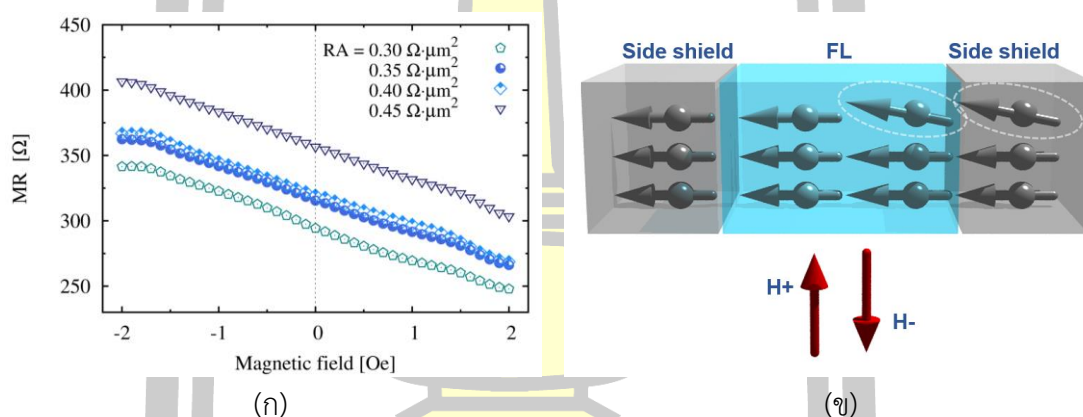
นอกจากการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่เป็นปัจจัยในการออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของความหนาของชั้นสเปสเซอร์หรือความหนาของระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

5.2.3 ความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

โดยทั่วไปค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่จะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) และความหนาของชั้นวัสดุ (L) ตามความสัมพันธ์ของสมการ $RA = \rho L$ โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่จะมีค่าแปรผันตรงกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุและความยาวของชั้นวัสดุ ในการทดลองนี้ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของโครงสร้างสปีนวาล์ว จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสเปสเซอร์หรือความหนาของชั้นฉนวน MgO ที่ใช้คั่นกลางระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระในโครงสร้าง CPP-TMR ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 26 นาโนเมตร

ในลำดับแรกจะทำการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่แตกต่างกันในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบ

ตรงกันข้ามและจะทำการพิจารณาขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจะมีการจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางบวกและทิศทางลบตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.11 (ก) นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางบวกและลบจะทำให้เกิดความไม่สมมาตรของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะการจัดเรียงตัวของสปีนภายในชั้นแม่เหล็กด้านข้างที่มีการเบี่ยงเบนจากทิศทางแกนง่ายและทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.11 (ข) ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กต่อสนามแม่เหล็กภายนอกไม่เป็นเชิงเส้น

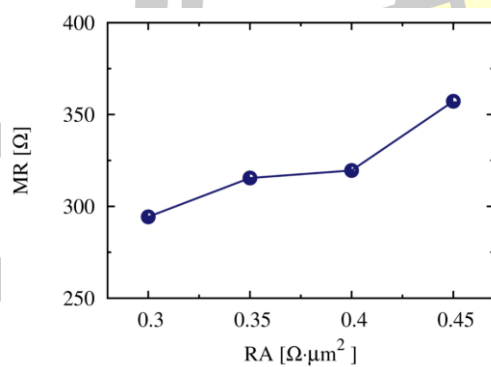


ภาพประกอบ 5.11 (ก) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (ข) ผลของการจัดเรียงทิศทางของสปีนภายในชั้นแม่เหล็กด้านข้างที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางของสปีนภายในชั้นอิสระ

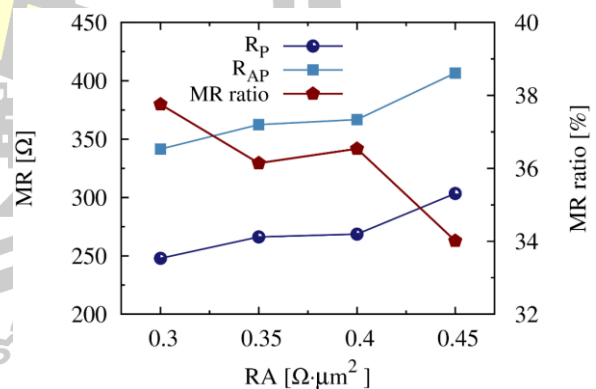
จากการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่ค่าใดๆ พบว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าแปรผันตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปีนวาล์ว [226]–[229] โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กทั้งในกรณีที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าแปรผันตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.12 (ก) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้าที่ถูกใช้คั่นกลาง

ระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ ซึ่งเมื่อความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความน่าจะเป็นของการทะลุผ่านของกระแสสปินโพลาริซจะมีค่าน้อยลง โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 22 และ 19 ตามลำดับ เมื่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.30 เป็น 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตร [227]–[229]

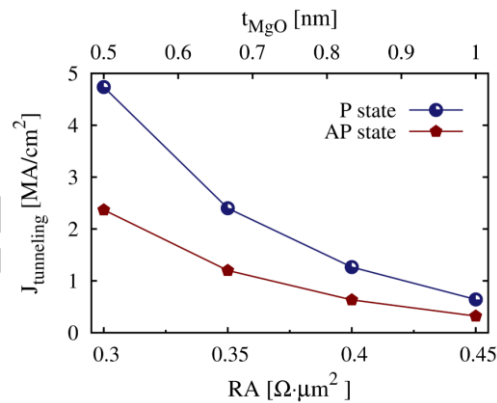
ในการทำงานเดียวกันเมื่อทำการคำนวณผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงเมื่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.12 (ข) โดยค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลงจากร้อยละ 37.75 เป็น 34.01 มีอัตราการลดลงเท่ากับร้อยละ 11 เมื่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.30 เป็น 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตร เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้น MgO มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการลดลงของกระแสการทะลุผ่านดังแสดงตามภาพประกอบ 5.12 (ค) [230] ที่คำนวณการลดลงของกระแสการทะลุผ่านจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 140 มิลลิโวลต์ผ่านโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 26 นาโนเมตรและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 35 เมกกะแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของค่ากระแสการทะลุผ่านในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและขนาดของค่ากระแสการทะลุผ่านจะมีค่าที่ลดลง ซึ่งส่งผลให้การทะลุผ่านของกระแสสปินโพลาริซและค่าอัตราส่วน MR มีค่าน้อยลง โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [151], [227]



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 5.12 (ก) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่ไม่มีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างขนานและตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล (ค) ผลของค่า RA ที่มีต่อค่ากระแสการทะลุผ่านในโครงสร้างขนานและตรงกันข้าม

ในหัวข้อได้ทำการศึกษขนาดของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลในสองลักษณะคือการศึกษากว้างของหัวอ่านข้อมูลและความหนาของชั้นสเปสเซอร์หรือระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับขนาดของแทร็คและบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลตามลำดับ ผลการศึกษาในส่วนแรกแสดงให้เห็นว่าการลดขนาดของแทร็คข้อมูลเพื่อเพิ่มพื้นที่การบันทึกข้อมูลนำไปสู่การลดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับแทร็คข้อมูล โดยทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหรือค่า RA และการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการลดลงของพื้นที่การทะลุผ่านของสปินในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ซึ่งนำไปสู่ข้อจำกัดของการเพิ่มความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล และการแสดงความแตกต่างของค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ในขณะที่ผลการศึกษาความหนาของชั้นสเปสเซอร์หรือระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลในส่วนที่สอง สามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระยะการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในชั้นฉนวนไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้าจะทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการลดลงของกระแสสปินการทะลุผ่านระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ ดังนั้นการลดระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันของหัวอ่านข้อมูล โดยการลดขนาดของชั้นสเปสเซอร์ส่งผลให้ค่า RA มีค่าลดลงและค่าอัตราส่วน MR มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้หัวอ่านข้อมูลมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการลดขนาดความหนาของชั้นสเปสเซอร์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลของอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างชั้นฟิล์ม โดยความหนาของ

ชั้นสเปสเซอร์จะต้องไม่มีค่าน้อยจนไม่สามารถป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระได้ [231]

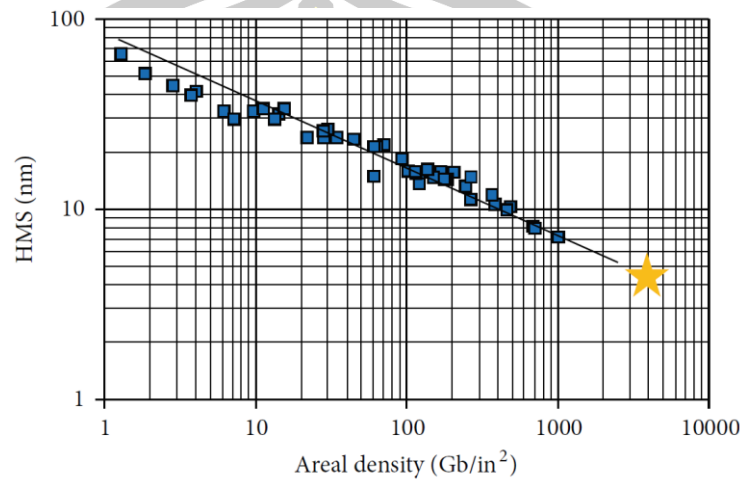
จากผลการศึกษาขนาดของหัวอ่านข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความต้องการเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การลดขนาดของแทร็คและบิตข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่สอดคล้องกับพื้นที่การบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-TMR นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า RA และการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลและค่า SNR ของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นจึงต้องออกแบบหัวอ่านข้อมูลให้มีประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูลที่ดี และมีความเหมาะสม สอดคล้องกับขนาดของแทร็คและบิตข้อมูล จากข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-TMR งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาหัวอ่านข้อมูลขนาดเล็กแบบ CPP-GMR ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ซึ่งทำให้เกิดค่า RA ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูง เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากผลของการลดขนาดหัวอ่านข้อมูล และเป็นทางเลือกในการพัฒนาหัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นและมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคตดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3

นอกจากการศึกษานาโนโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อการออกแบบโครงสร้างและประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

5.3 ผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

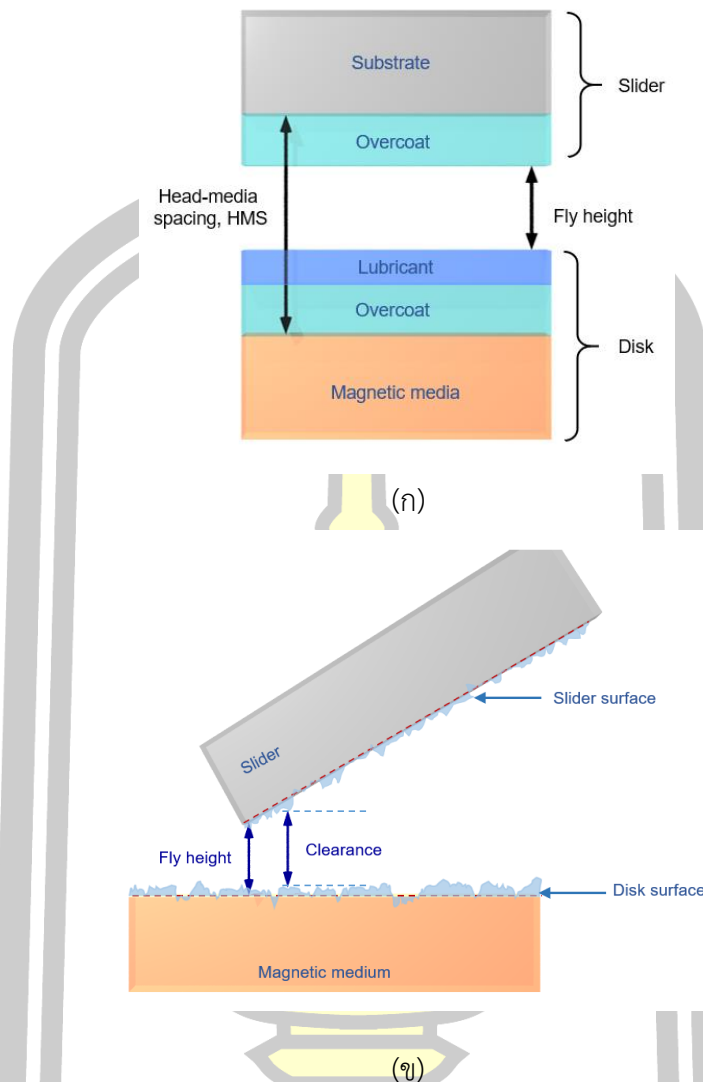
ในการเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้สูงขึ้นจำเป็นต้องทำการลดขนาดของพื้นที่การจัดเก็บข้อมูล นอกจากนี้การพัฒนาประสิทธิภาพและความเร็วในการผ่านข้อมูลยังคงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อศักยภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทั่วไปความเร็วและความถูกต้องแม่นยำในการเขียนและอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล (head-media spacing, HMS) ซึ่งการลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูล จะส่งผลให้จำเป็นต้องทำการลดค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อที่จะให้กระบวนการเขียน-อ่านข้อมูลในบิตข้อมูลที่ต้องการพิจารณา มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งการศึกษาในเชิงทฤษฎีของ B. Marchon และคณะ [98] แสดงให้

เห็นว่าค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีค่าลดลงร้อยละ 35.7 เมื่อความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลมีค่าเพิ่มจาก 1 เป็น 4 Tb/in² ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.13



ภาพประกอบ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลและระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลและแผ่นบันทึกข้อมูล โดยจุดดาวสีเหลืองคือความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลที่มีค่าเท่ากับ 4 Tb/in² [98]

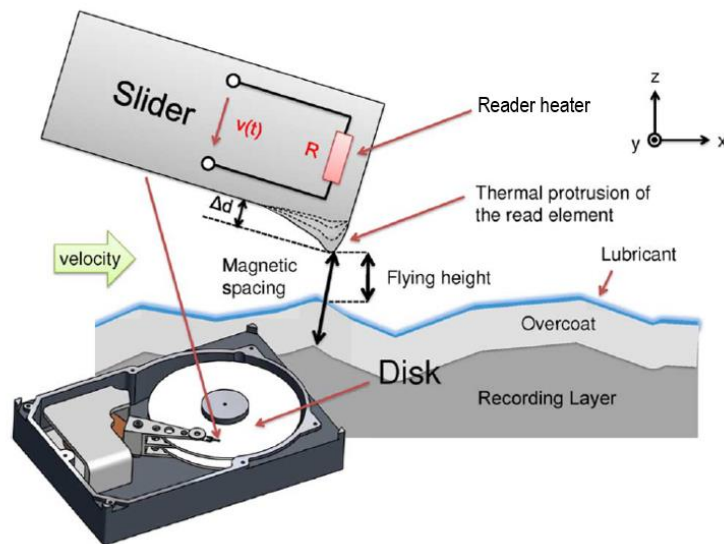
โดยทั่วไปค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกพิจารณาจาก ระยะห่างระหว่างส่วนบนสุดของชั้นบันทึกข้อมูลและพื้นผิวของตัวแปลงสัญญาณหรือชั้นแผ่นฐาน (substrate layer) ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.14 (ก) โดยค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลคือผลรวมของความหนาของชั้นเคลือบหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูล (head overcoat) ความสูงของการบิน (flying height) ชั้นฟิล์มหล่อลื่นของแผ่นบันทึกข้อมูล (media lubricant) และความหนาของชั้นเคลือบของแผ่นบันทึกข้อมูล (media overcoat) ซึ่งค่าความสูงของการบินจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างการบิน (flying clearance) และความขรุขระเฉลี่ยของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ทำให้สไลเดอร์บินได้ต่ำที่สุดโดยไม่มีการสัมผัสระหว่างสไลเดอร์และแผ่นบันทึกข้อมูล (touchdown height, TDH) ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.14 (ข) โดยทั่วไปวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นชั้นเคลือบหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลคือฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond like carbon, DLC) ซึ่งมีคุณสมบัติทนทานต่อการสึกหรอและการเสียดสี มีความแข็งแรงสูงและมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในขณะที่ชั้นฟิล์มบางหล่อลื่นจะใช้วัสดุ perfluoropolyether (PFPE) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีหรือติดไฟและทนทานต่อการทำงานในสภาวะอุณหภูมิที่สูง



ภาพประกอบ 5.14 (ก) แผนผังการแสดงค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลในอุดมคติและ (ข) ลักษณะการแสดงช่องว่างการบินและความสูงของการบิน [98]

ในการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีค่าที่ต่ำที่สุดนำไปสู่การลดค่าช่องว่างการบินและความหนาของชั้นเคลือบหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในเชิงทฤษฎีของ B. Marchon และคณะ [98] แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดของช่องว่างการบินและความหนาของชั้นเคลือบหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลจะถูกจำกัดที่ประมาณ 0.5 - 1 นาโนเมตร และ 0.9 - 1.5 นาโนเมตรตามลำดับ ดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลและฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังคงมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี การใช้ความร้อนช่วยในการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลจึงมีความสำคัญและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์การบินบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน [232]-[234] วิธีการใช้ความร้อนเข้าช่วยในการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลอาศัยการป้อน

แรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวเขียน (writer heater) และตัวทำความร้อนของหัวอ่าน (reader heater) ซึ่งจะทำให้บริเวณตัวแปลงสัญญาณของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลยื่นเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 5.15 โดยระยะการยื่นออกของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลตามลำดับ [234] ซึ่งในปัจจุบันระยะห่างของการบินระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านกับแผ่นบันทึกข้อมูลมีค่าประมาณ 4-6 นาโนเมตร ในขณะที่การใช้ความร้อนเข้าช่วยในกระบวนการอ่านข้อมูลสามารถลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล โดยมีระยะห่างประมาณ 1 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 5.15 การป้อนแรงดันทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลเพื่อยื่นให้หัวอ่านให้มีค่าเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูลและลดความสูงของการบิน [233]

การใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลในกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลให้มีค่าที่น้อยลงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลที่สูง นอกจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลจะส่งผลต่อการยื่นหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้เข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูล ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นอาจยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดจากการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยในลำดับแรกจะทำการพิจารณา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

5.3.1 การคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล

ปัจจุบันกระบวนการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านกับแผ่นบันทึกข้อมูลในกระบวนการบันทึกและอ่านข้อมูลอาศัยวิธีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล เพื่อยื่นหัวเขียนหรือหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าเข้าใกล้กับแผ่นบันทึกข้อมูล โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตัวทำความร้อนของหัวเขียนหรือหัวอ่านข้อมูล ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เซนเซอร์ของหัวเขียนและหัวอ่านเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและยื่นเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูล โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านกับแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับกำลังทางไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูล [234] ดังนั้นในลำดับแรกจะทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลจากการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิของวัสดุจากสมการ

$$R_1 = R_0(1 + \alpha T_1) \quad (5.1)$$

และ

$$R_2 = R_0(1 + \alpha T_2) \quad (5.2)$$

เมื่อ R_1 และ R_2 คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2
 R_0 คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเริ่มต้น
 α คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานของวัสดุ

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอุณหภูมิในสมการที่ (5.1) และ (5.2) สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าได้จากการนำสมการที่ (5.2) - (5.1) จะได้

$$R_2 - R_1 = R_0 \alpha (T_2 - T_1) \quad (5.3)$$

ซึ่งโดยเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิภายในวัสดุ

$$\Delta R = \alpha R_0 \Delta T \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอุณหภูมิในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (5.5)

$$\frac{dR}{R} = \alpha dT \quad (5.5)$$

เมื่อ dR คือการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

dT คือการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ

เมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิใดๆ จะได้

$$\int_{R_0}^{R(T)} \frac{dR}{R} = \int_{T_0}^T \alpha dT$$

$$\ln R \Big|_{R_0}^{R(T)} = \alpha (T - T_0)$$

$$\ln \frac{R(T)}{R_0} = \alpha (T - T_0)$$

$$R(T) = R_0 e^{\alpha(T-T_0)}$$

ในลำดับต่อไปอาศัยการประยุกต์ใช้ออนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) จากความสัมพันธ์

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

ดังนั้น
$$R(T) = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \quad (5.6)$$

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.6) สามารถพิจารณาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลได้ดังแสดงในสมการที่ (5.7)

$$T = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_{RH}}{R_0} - 1 \right) \quad (5.7)$$

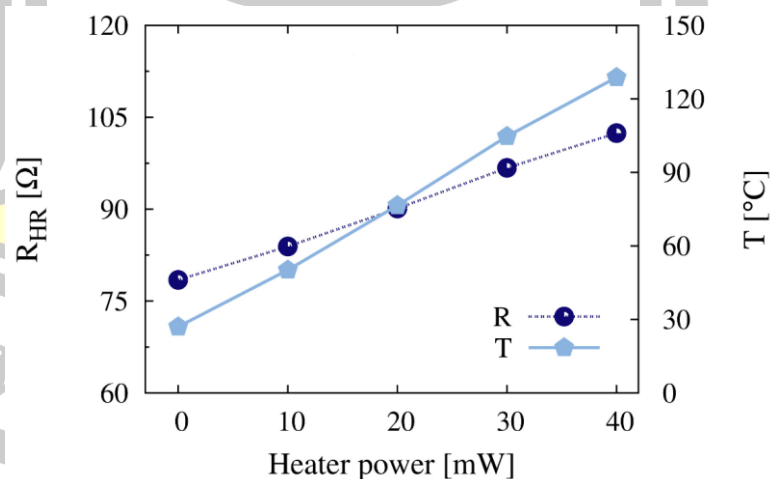
เมื่อ T คืออุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลในหน่วยองศาเซลเซียส

T_0 คืออุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่ค่ากำลังทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 มิลลิวัตต์หรืออุณหภูมิห้อง

R_{RH} คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล

R_0 คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่ค่ากำลังทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 มิลลิวัตต์หรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่อุณหภูมิห้อง

ในงานวิจัยนี้ทำการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลตั้งแต่ 0 – 40 มิลลิวัตต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผันตรงกับค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล โดยที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 78.45 เป็น 102.41 โอห์ม คิดเป็นร้อยละ 35.31 เมื่อกำลังทางไฟฟ้าภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 มิลลิวัตต์ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.16 นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณอุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้เป็นตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\alpha = 0.003$ /องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อค่ากำลังทางไฟฟ้าภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิวัตต์เป็น 40 มิลลิวัตต์ อุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27 เป็น 128.8 องศาเซลเซียส โดยค่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 377



ภาพประกอบ 5.16 ผลของกำลังทางไฟฟ้าภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล

จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิจากการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

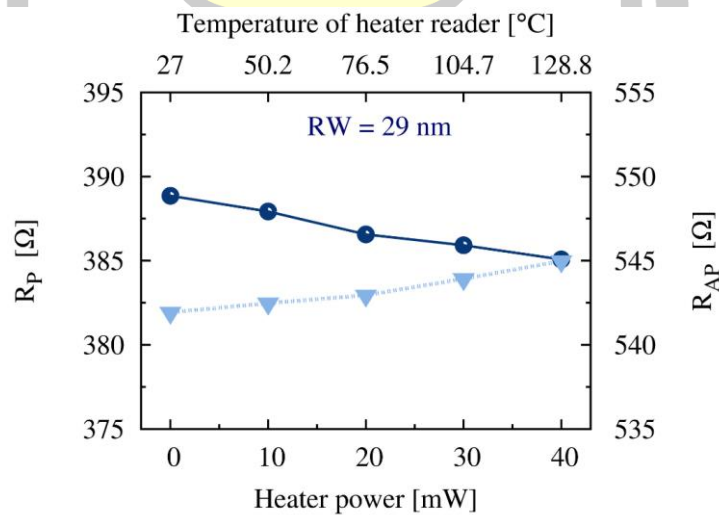
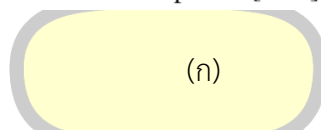
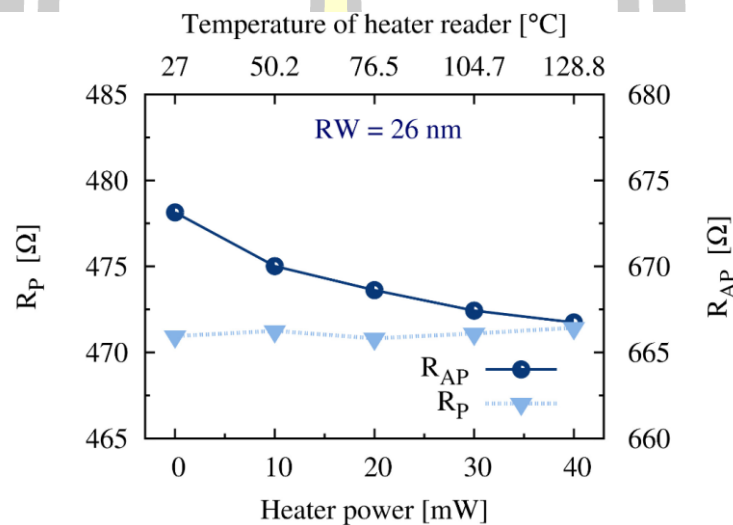
5.3.2 ผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

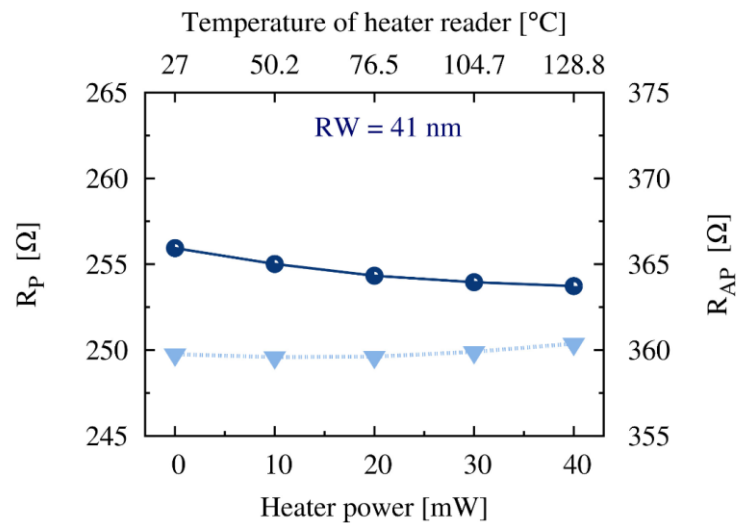
การเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลนำไปสู่การลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อให้กระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ปัจจุบันการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูลอาศัยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่าน/หัวเขียนข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดความร้อนภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่าน/หัวเขียนข้อมูล โดยความร้อนดังกล่าวจะทำให้บริเวณหัวอ่าน/หัวเขียนข้อมูลเกิดการขยายตัวและยื่นเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูล นอกจากการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-หัวอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลยังส่งผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในหัวอ่านนอกเหนือจากความร้อนที่เกิดจากความร้อนของจูลและอุณหภูมิแวดล้อมในกระบวนการอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งการทดลองนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่างคือกลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและกลุ่มการพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของกำลังทางไฟฟ้าของตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของกลุ่มการพิจารณาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

1) กลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

ในการคำนวณผลของความร้อนที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลสามารถทำได้โดยทำการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ซึ่งทิศทางการเรียงตัวของแมกนีไทเซชันสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 2 กิโลเออร์สเตดผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าแปรผกผันกับความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ดังรายละเอียดในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ส่งผลให้เกิดการแผ่รังสีความร้อน

จากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลไปยังโครงสร้างสปินวาล์วของหัวอ่านข้อมูล ทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างขนานของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.1 0.79 และ 0.24 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบตรงกันข้ามมีค่าลดลงร้อยละ 0.95 0.69 และ 0.6 ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 มิลลิวัตต์ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.17 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



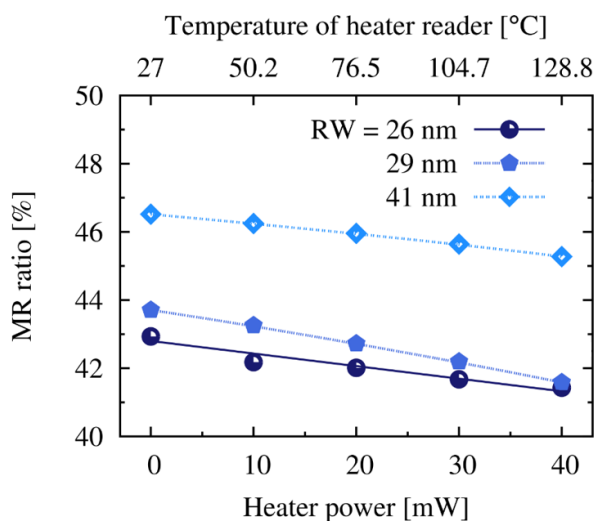


(ค)

ภาพประกอบ 5.17 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ (ก) 26 (ข) 29 และ (ค) 41 นาโนเมตร

จากการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตรมีค่าลดลงร้อยละ 3.5 4.85 และ 2.67 ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 มิลลิวัตต์ เนื่องจากผลของการแผ่รังสีความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่ส่งผลให้อุณหภูมิโดยรอบของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

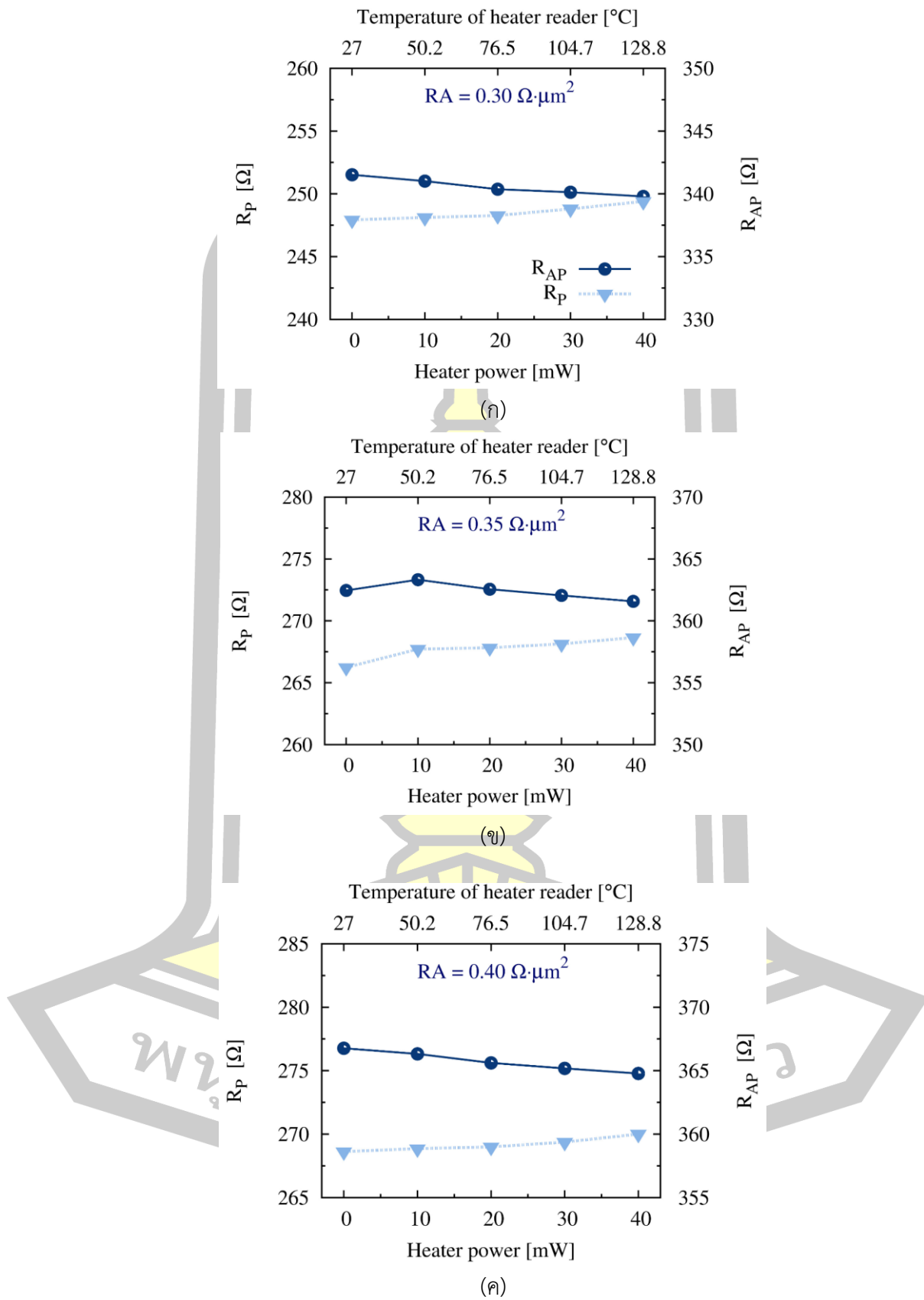


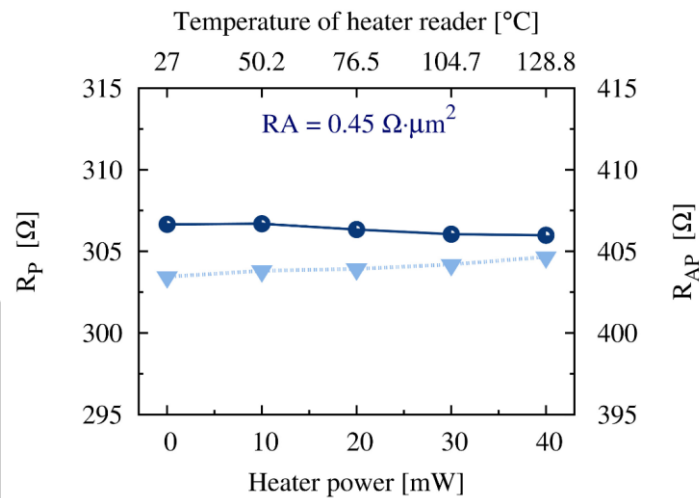
ภาพประกอบ 5.18 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

จากการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความหนาของชั้น MgO โดยมีผลการคำนวณดังต่อไปนี้

2) กลุ่มการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนาร์ลัจจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 มิลลิวัตต์ ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลในกรณีทีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานมีค่าเพิ่มขึ้นตามการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตรมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.91 0.59 0.51 และ 0.40 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามมีค่าลดลงของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตรมีค่าลดลงร้อยละ 0.24 0.5 0.54 และ 0.16 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.19 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ

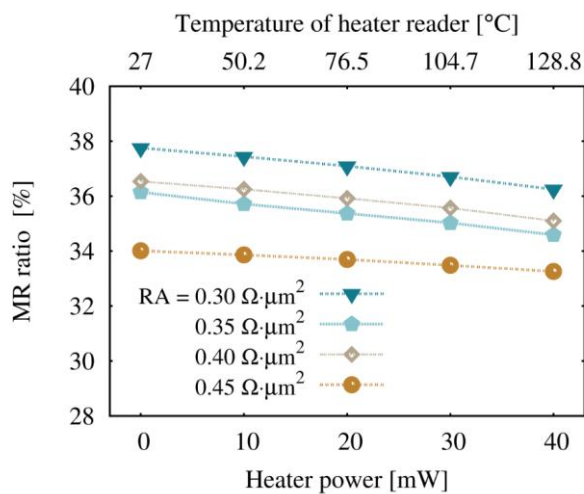




(ง)

ภาพประกอบ 5.19 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (ก) 0.30 (ข) 0.35 (ค) 0.40 และ (ง) $0.45 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลงร้อยละ 4.30 3.99 3.93 และ 2.21 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.20 เนื่องจากผลของการแผ่รังสีความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่ต่ำหรือมีความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่น้อยจะมีอัตราการลดลงค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่สูงหรือมีความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มาก โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.35 และ 0.40 โอห์มตารางไมโครเมตรมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างแบบขนานมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.12 (ค)



ภาพประกอบ 5.20 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่

จากการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟข้างต้น พบว่าอุณหภูมิภายในตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผันตรงกับค่ากำลังทางไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล โดยผลของความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความร้อนจากตัวทำความร้อนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR หรือทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพของการแสดงความต่างระหว่างการแสดงบิต 0 และ 1 เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งทำให้แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางแบบขนานและแบบตรงกันข้ามได้อย่างสมบูรณ์ โดยผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกับผลการคำนวณในเชิงทฤษฎีดังรายละเอียดในบทที่ 4

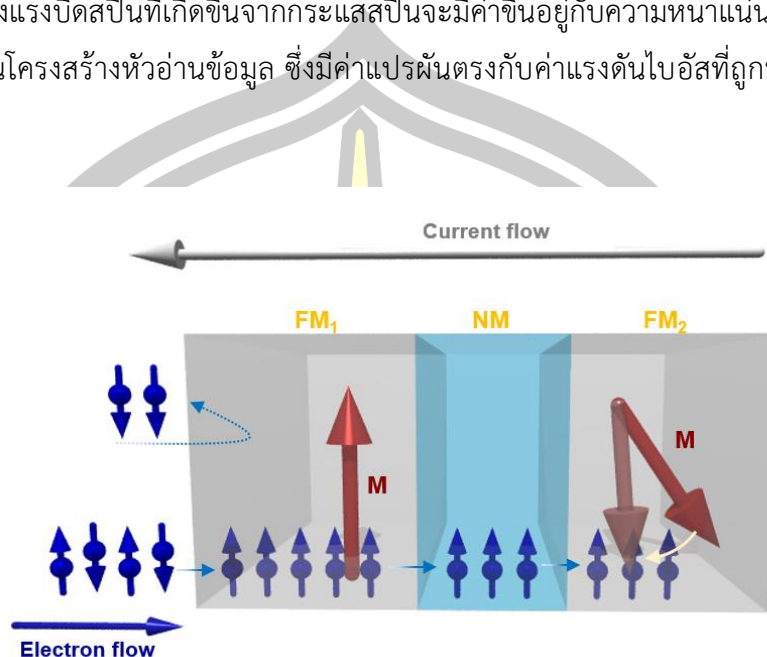
จากการพิจารณาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงาน ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของค่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัสที่มีผลต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้

5.4 ผลของค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

กระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจากการป้อนแรงดันไบอัสผ่านหัวอ่านข้อมูล เพื่อแสดงค่าสัญญาณข้อมูลบิต 1 หรือ บิต 0 โดยทั่วไปขนาดของแรงดันไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่น้อยเกินไปจนทำให้ไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของค่าสัญญาณของบิต 0 และ 1 ได้ หรือต้องมีค่าไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ เนื่องจากการส่งผ่านสปินทอร์กจากกระแสสปินโพลารไรซ์จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของกระแสสปิน นอกจากนี้การป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ายังคงส่งผลต่อการเกิดค่าสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นผลมาจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ [158], [185], [186] ซึ่งจากการพิจารณากระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลพบว่าความหนาแน่นของค่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการอ่านข้อมูลเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล จากการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับ (reverse bias) เข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยกระแสไฟฟ้ามีทิศทางการเคลื่อนที่จากชั้นอิสระไปยังชั้นพิน ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นพินไปยังชั้นอิสระดังแสดงตามภาพประกอบ 5.21 โดยสปินของอิเล็กตรอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนตัวนำของกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ส่งผลให้กระแสสปินที่มีทิศทางใดๆ มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน โดยเรียกระแสสปินที่ถูกเปลี่ยนแปลงทิศทางนี้ว่ากระแสสปินโพลารไรซ์ จากนั้นกระแสสปินโพลารไรซ์จะเคลื่อนผ่านไปยังชั้นอิสระ ซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินโพลารไรซ์และแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กขึ้นอีกครั้ง โดยอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระกระทำต่อสปินของกระแสสปินโพลารไรซ์ ในขณะที่เดียวกันก็เกิดแรงบิดสปินจากกระแสสปินที่กระทำกลับต่อแมกนีไทเซชันเช่นเดียวกัน ซึ่งแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลารไรซ์สามารถทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระได้ถ้าแรงบิดสปินของสปินมีค่าที่มากพอ โดยความแรงของแรงบิดสปินที่เกิดขึ้นจากกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับค่าแรงดันไบอัสที่ถูกป้อนเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล



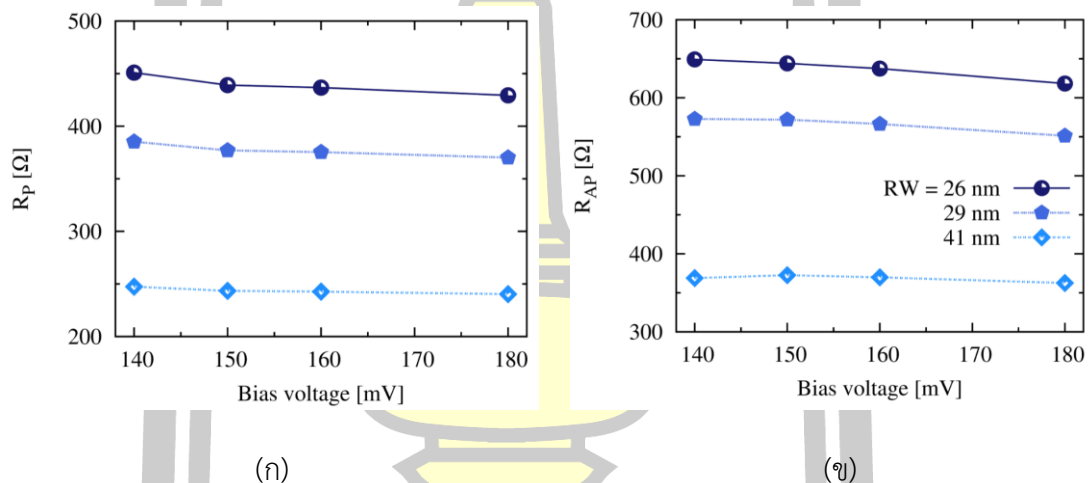
ภาพประกอบ 5.21 การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งการทดลองนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่างคือกลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล และกลุ่มการพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล โดยในลำดับแรก จะทำการพิจารณาผลแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของกลุ่มการพิจารณาความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

5.4.1 กลุ่มการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

ในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสูงสุดและต่ำสุดจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 2 กิโลเออร์สเตดในทิศทางลบและทิศทางบวก โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบอัส 4 ค่าคือ 140 150 160 และ 180 มิลลิโวลต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กทั้งกรณีที่มีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าแปรผกผันกับกับค่าแรงดันไบอัสดังแสดงตามภาพประกอบ 5.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่มีแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวในทิศทางขนานของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตรมีค่าลดลงร้อยละ

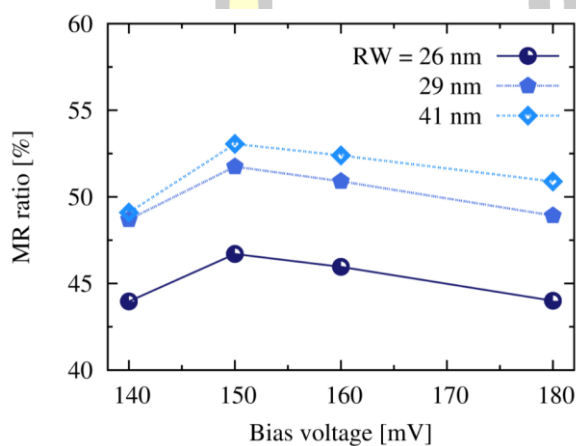
4.79 3.92 และ 2.87 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามมีค่าลดลงร้อยละ 4.76 3.77 และ 1.71 ตามลำดับ เมื่อทำการป้อนค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 180 มิลลิโวลต์ เนื่องจากการส่งผ่านกระแสสปินโพลาไรซ์ที่มีค่าสูง ซึ่งผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าแรงดันไบอัสในช่วง 140-180 มิลลิโวลต์ ค่าความต้านทานแม่เหล็กในหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าหัวอ่านที่มีขนาดใหญ่ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 นาโนเมตร พบว่ามีอัตราการลดลงที่มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 41 นาโนเมตร เป็น 3 และ 5 เท่า ในกรณีทีแมกนีไทเซชันมีทิศทางขนานและตรงกันข้ามตามลำดับ เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานทางแม่เหล็กที่สูง



ภาพประกอบ 5.22 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล

จากการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้าม ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR โดยผลการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับค่าแรงดันไบอัสของหัวอ่านข้อมูล [235]–[237] โดยค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างเท่ากับ 26 29 และ 41 นาโนเมตร มีค่าลดลงร้อยละ 0.08 0.46 และ 3.64 เมื่อค่าแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น 140 เป็น 180 มิลลิโวลต์ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.23 เนื่องจากการส่งผ่านแรงบิดจากกระแสสปินโพลาไรซ์กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินได้อย่างสมบูรณ์ โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างน้อยจะมีความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่ที่สูง ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดสปิน

จากกระแสสปินโพลาไรซ์ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลพบว่าผลของแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดการเลื่อนออกของค่าอัตราส่วน MR สูงสุด โดยค่าอัตราส่วน MR มีค่าสูงสุดที่ค่าแรงดันไบอัสเท่ากับ 150 มิลลิโวลต์ เนื่องจากผลของความไม่สมมาตรของกำแพงการทะลุผ่าน (asymmetry tunnel barrier) [238]–[240] ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแถบพลังงานและการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต โดยการเลื่อนออกของค่าอัตราส่วน MR มีค่าสูงสุดจะมีค่าแปรผันตรงกับความไม่สมมาตรของกำแพงการทะลุผ่าน [238]

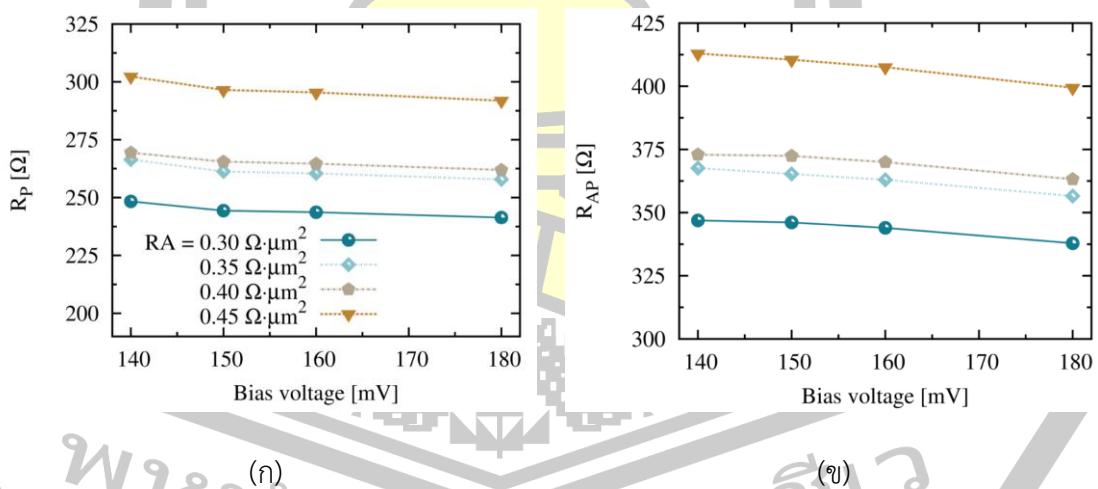


ภาพประกอบ 5.23 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลต่างๆ

จากการศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของกลุ่มหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลแตกต่างกันสามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันกับค่าแรงดันไบอัสของหัวอ่านข้อมูล โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างน้อยจะมีอัตราลดลงของค่าอัตราส่วน MR มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากหัวอ่านที่มีความกว้างน้อยจะมีพื้นที่หน้าตัดของการส่งผ่านกระแสที่แคบ ซึ่งทำให้มีความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่ที่สูง ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วที่มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การพิจารณาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลแตกต่างกัน ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่ทำการศึกษาผล โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

5.4.2 กลุ่มการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูล

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่แตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าแปรผกผันกับค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูล โดยเมื่อค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 140 เป็น 180 มิลลิโวลต์ ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตรมีค่าลดลงร้อยละ 2.80 3.21 2.77 และ 3.45 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.24 (ก) และค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามมีค่าลดลงร้อยละ 2.60 3.0 2.61 และ 3.28 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.24 (ข) เนื่องจากกระแสสปีนโพลาริซ์ที่มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพิน ส่งผ่านแรงบิดสปีนกระทำต่อแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระบางส่วนมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนตามทิศทางของกระแสสปีนโพลาริซ์ ซึ่งทำให้แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นพินได้อย่างสมบูรณ์

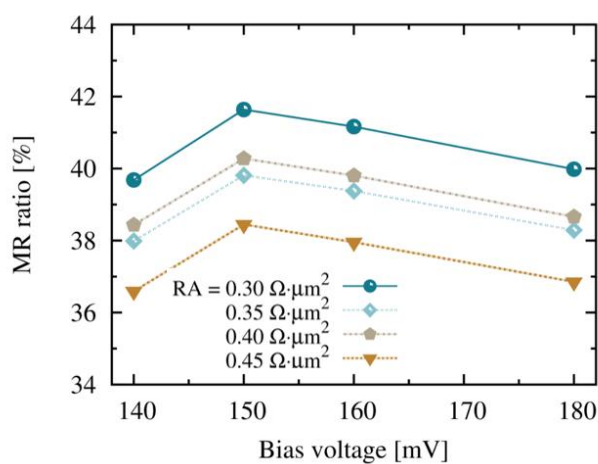


ภาพประกอบ 5.24 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้าง (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่

ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลงเมื่อค่าแรงดัน

ไบอัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์มตารางไมโครเมตรมีค่าลดลงร้อยละ 0.75 0.79 0.58 และ 0.71 ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มการป้อนแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจาก 140 เป็น 180 มิลลิโวลต์ ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.25 เนื่องจากการส่งผ่านแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าการลดลงของค่าอัตราส่วน MR มีค่าเป็นอิสระกับความหนาของชั้นสเปสเซอร์ โดยค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ที่แตกต่างกันมีอัตราการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ที่ใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วน MR พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับค่าแรงดันไบอัสและมีค่าสูงสุดที่ 150 มิลลิโวลต์ เนื่องจากผลของความไม่สมมาตรของกำแพงการทะลุผ่าน [238]–[240] ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแถบพลังงานและการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนต



ภาพประกอบ 5.25 ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่

จากการศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลสามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าแปรผกผันกับค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูล [235]–[237] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันและไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินได้อย่างสมบูรณ์ โดยหัวอ่าน

ข้อมูลที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ที่มากกว่าห้วอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดของการส่งผ่านของกระแสสปินที่น้อย ส่งผลให้มีความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่ที่มาก ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินที่สูง ในขณะที่ผลของความหนาของชั้นสเปคเซอร์มีค่าเป็นอิสระกับผลของแรงดันไบอัส

จากการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัสที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของห้วอ่านข้อมูล ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลรวมของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลที่มีต่อค่า อัตราส่วน MR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

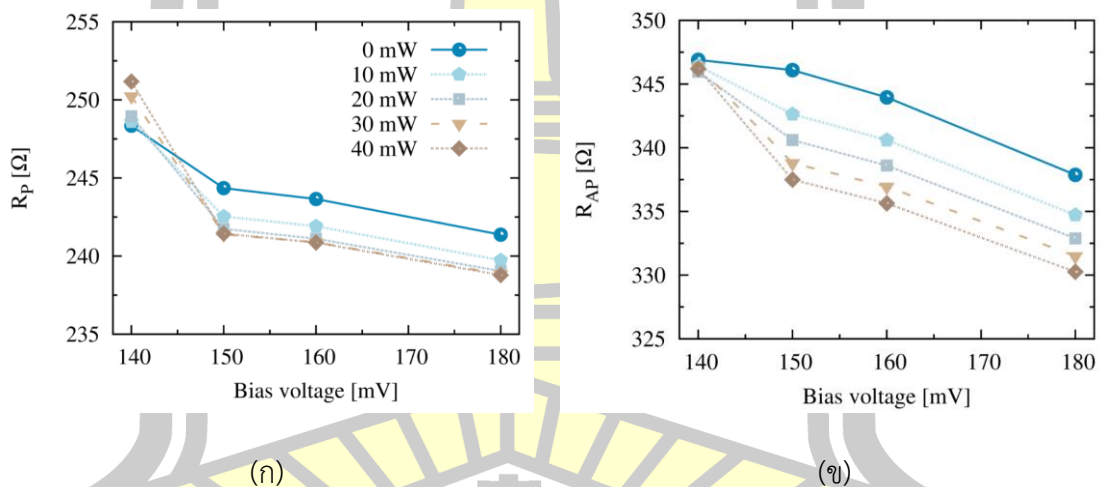
5.5 ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านและแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พลาซีการป้อนกำลังทางไฟ้เข้าสู่ตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูล เพื่อทำการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียน-ห้วอ่านข้อมูลกับแผ่นบันทึกข้อมูล โดยความร้อนขึ้นภายในตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลจะทำให้ห้วอ่านข้อมูลเกิดการขยายตัวและยื่นเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูล พร้อมทั้งในขณะเดียวกันก็ทำการป้อนแรงดันไบอัสผ่านโครงสร้างห้วอ่านข้อมูล เพื่อทำการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลและแสดงในรูปแบบของค่าสัญญาณทางไฟฟ้า จากการพิจารณากระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่ากระบวนการทำงานของห้วอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างของห้วอ่านข้อมูลและความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลที่ทำให้การยื่นห้วอ่านข้อมูลให้มีค่าเข้าใกล้แผ่นบันทึกข้อมูล ดังนั้นในห้วข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของแรงดันไบอัสและผลของความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ในห้วข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลส่งผลต่อค่าอัตราส่วน MR ของห้วอ่านข้อมูล ที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.30 โอห์มตารางไมโครเมตรในลำดับแรกจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามที่เป็นฟังก์ชันของค่าแรงดันไบอัสและการป้อนกำลังทางไฟ้เข้าสู่ตัวทำความร้อนของห้วอ่านข้อมูล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ทำการป้อนค่าแรงดันไบอัสที่มีค่าเท่ากับ 140 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ทำให้เกิดปริมาณกระแสสปินไหลผ่านห้วอ่านข้อมูลที่มีค่าเพียงพอในการตรวจจับสัญญาณและมีค่าไม่สูงเกินไปเพื่อผลของความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับระดับระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นบันทึกข้อมูล โดยทำการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลพบว่า ความร้อนที่เกิดจากส่วนนี้จะแผ่ความร้อนไปยังหัวอ่านข้อมูลและทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านสปินมีค่าลดลง เนื่องจากผลของความร้อนดังกล่าวส่งผลให้พารามิเตอร์การส่งผ่านสปินมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของกำลังทางไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล

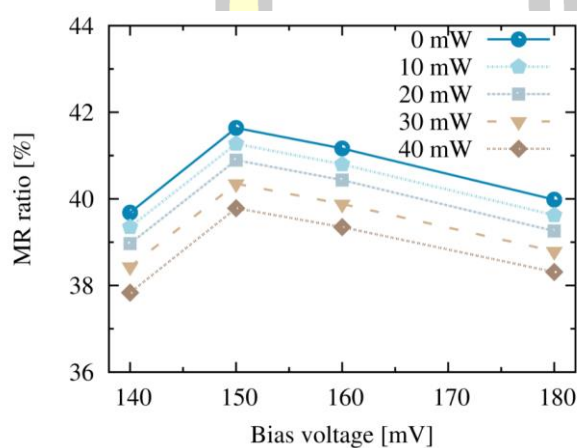
นอกจากนี้เมื่อทำการป้อนค่าแรงดันไบอัสที่มีค่ามากกว่า 140 มิลลิโวลต์ พบว่ากระแสสปินโพลาไรซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงและผลของแรงดันไบอัสจะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูล โดยการเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสสปินและการส่งผ่านสปินที่สูงที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กทั้งในกรณีทีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและแบบตรงกันข้ามมีค่าลดลง ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.26 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5.26 ผลของการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างทีแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วจัดเรียงตัว (ก) แบบขนานและ (ข) แบบตรงกันข้าม

ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผลของแรงดันไบอัสและความร้อนจากการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ผลการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับผลของความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันไบอัส ดังแสดงตามภาพประกอบ 5.27 เนื่องจากการแผ่ความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งทำให้แมกนีไทเซชัน

ภายในชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่การเพิ่มค่าแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดการส่งผ่านกระแสสปินที่มีความหนาแน่นสูงผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการส่งผ่านแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ส่งผลให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในทางตรงกันข้ามและขนานมีค่าลดลง โดยค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างตรงกันข้ามจะมีอัตราลดลงที่มากกว่าโครงสร้างที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนาน เนื่องจากผลของแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์ที่ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง



ภาพประกอบ 5.27 ผลของการป้อนกำลังทางไฟฟ้าเข้าสู่ตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนจากหัวอ่านข้อมูลและแรงดันไบอัสที่ใช้ในกระบวนการอ่านข้อมูลทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากผลของความร้อนส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดความผันผวนและผลของแรงดันไบอัสทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานหรือตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง

บทที่ 6

การศึกษาสัญญานรบกวนในหัวอ่านข้อมูล

การออกแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงสามารถทำได้โดยเพิ่มค่าความจุของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของการบันทึกข้อมูลและความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล (data transfer) นอกจากนี้ยังต้องออกแบบเพื่อให้มีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำ (power consumption) และมีความสามารถในการจำแนกค่าสัญญาณการอ่านย้อนกลับ (readback signal) ที่ดี การพัฒนาประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลักๆ สามส่วนคือ หัวเขียนข้อมูล หัวอ่านข้อมูลและแผ่นบันทึกข้อมูล ปัจจุบันความต้องการเพิ่มค่าความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถทำได้โดยลดขนาดเกรนภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งนำไปสู่การลดขนาดของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดที่ใกล้เคียงและมีเหมาะสมต่อกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูล

ความสามารถในการจำแนกค่าสัญญาณการอ่านย้อนกลับจะมีค่าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลและค่าอัตราความคลาดเคลื่อนของบิตข้อมูล (bit-error rate) โดยทั่วไปประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน MR และอัตราส่วนสัญญาณขาออกต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) ค่าอัตราส่วน MR เป็นตัวแปรที่สำคัญที่บ่งบอกถึงความแตกต่างในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของบิต 0 และบิต 1 ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ ขนาดของหัวอ่านข้อมูล ผลของความร้อนและผลของการป้อนกระแสไฟฟ้าตามรายละเอียดการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ในเชิงทฤษฎีในบทที่ 3 และ 4 และในเชิงการทดลองในบทที่ 5 ในขณะที่ค่า SNR เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลถึงความชัดเจนของการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นนอกจากการพัฒนาศักยภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะมุ่งเน้นไปยังการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล การศึกษาผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในหัวอ่านยังคงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลและฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เช่นกัน

สัญญาณรบกวน (noise) เป็นค่าสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ภายในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ โดยสัญญาณรบกวนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายส่วนของอุปกรณ์ เช่น แผ่นบันทึกข้อมูล หัวอ่านข้อมูล และตัวขยายกำลังสัญญาณ (preamplifier) เป็นต้น ปัจจุบันความต้องการเพิ่มพื้นที่การบันทึกข้อมูลและลดขนาดของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลจะส่งผลต่อการลดของหัวอ่านข้อมูล โดยหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีการออกแบบให้มีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของบิตข้อมูล ซึ่งจะส่งผลเสียทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า RA [51] และการลดลงของเสถียรภาพทางความร้อน [101] และทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนในกระบวนการอ่านข้อมูลและการ

ลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านอ่านข้อมูล โดยทั่วไปค่าสัญญาณรบกวนในหัวอ่านข้อมูลสามารถแบ่งได้หลายประเภทตามแหล่งกำเนิดของค่าสัญญาณได้แก่ ค่าสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ $1/f$ ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนของค่าต้านทานทางไฟฟ้า (thermal resistance noise) ค่าสัญญาณรบกวนช็อต (shot noise) ค่าสัญญาณรบกวนจากความร้อน (thermal magnetic fluctuation noise) ค่าสัญญาณรบกวนเทเลกราฟสุ่ม (random telegraph noise) และค่าสัญญาณรบกวนจากการส่งผ่านแรงบิดสปิน (spin-transfer torque noise) เป็นต้น โดยรายละเอียดของค่าสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทจะถูกอธิบายในหัวข้อ 6.1

สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยและส่งผลต่อกระบวนการทำงานของอุปกรณ์การบันทึกข้อมูล ดังนั้นความเข้าใจถึงสาเหตุ (root cause) ของการเกิดค่าสัญญาณรบกวนและการลดการเกิดค่าสัญญาณรบกวนเพื่อที่เพิ่มค่า SNR ของหัวอ่านข้อมูลจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาและออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูง ปัจจุบันการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูลได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทฤษฎี [187], [241]–[243] และการทดลอง [188], [244], [245] เนื่องจากการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลส่งผลให้ค่าสัญญาณรบกวนเป็นตัวแปรที่สำคัญและส่งผลอย่างมากต่อการแสดงสัญญาณการอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กจะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ ซึ่งทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุและส่งผลให้ความชัดเจนของการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลมีค่าลดลง

โดยทั่วไปการพิจารณาค่าสัญญาณรบกวนในหัวอ่านข้อมูลในเชิงทฤษฎีอาศัยการใช้แบบจำลองในระดับจุลภาค [112], [187], [241], [242] สำหรับการศึกษาแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนและคำนวณผลกระทบของค่าสัญญาณรบกวนที่มีต่อประสิทธิภาพการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล ในปัจจุบันการลดขนาดหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดเล็กกว่า 20 นาโนเมตรทำให้เกิดข้อจำกัดของแบบจำลองในระดับจุลภาคสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางแม่เหล็กและผลของรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการพิจารณาสัญญาณรบกวนในหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาค่าสัญญาณรบกวนจากการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วด้วยแบบจำลองในระดับอะตอม โดยจะทำการพิจารณาผลของสนามคู่ขั้ว (dipolar field) สนามแม่เหล็กภายนอก ผลของความถี่ที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันต่อเวลาจะถูกนำมาคำนวณเพื่ออธิบายค่าความถี่ของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล เพื่อทำความเข้าใจพื้นฐานและสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวน

รบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล ในหัวข้อต่อไปจะทำการอธิบายรายละเอียดและประเภทของสัญญาณรบกวน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 ประเภทของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านข้อมูล

โดยทั่วไปสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่งผลกระทบต่อการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเกิดขึ้นได้จากสามส่วนหลักๆ คือ แผ่นบันทึกข้อมูล หัวอ่านข้อมูล และตัวขยายกำลังสัญญาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากหัวอ่านข้อมูลเป็นตัวแปรสำคัญและส่งผลกระทบต่อการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายพื้นฐานของค่าสัญญาณรบกวนหลักๆ ที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลได้แก่ ค่าสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ $1/f$ ค่าสัญญาณรบกวนเทเลกราฟสุ่ม ค่าสัญญาณรบกวนซีด ค่าสัญญาณรบกวนจอห์นสัน ค่าสัญญาณรบกวนจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากความร้อน และค่าสัญญาณรบกวนจากการส่งผ่านแรงบิดสปิน โดยสัญญาณรบกวนแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1.1 สัญญาณรบกวน $1/f$

ค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ หรือค่าสัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์ (Flicker noise) เป็นหนึ่งในสัญญาณรบกวนหลักที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความถี่ โดยค่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวทำให้หัวอ่านข้อมูลเกิดข้อจำกัดของประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลที่มีความถี่มีค่าต่ำกว่า 50 กิโลเฮิร์ต (kHz) [110] โดยที่สถานะความถี่ต่ำค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ จะมีค่ามากกว่าค่าสัญญาณรบกวนจอห์นสันและค่าสัญญาณรบกวนซีด การเกิดค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์ (electronic $1/f$ noise) และค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็ก (magnetic $1/f$ noise) โดยรายละเอียดของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในแต่ละส่วนจะถูกอธิบายในลำดับถัดไป

1) สัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์

สัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว โดยอิเล็กตรอนภายในกระแสไฟฟ้าจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่และสภาพเคลื่อนที่ได้ที่น้อยลงเมื่อเคลื่อนที่มายังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นสเปสเซอร์ [246] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้าง MTJ ของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ที่มีโครงสร้างรอยต่อเป็นชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นฉนวนไฟฟ้า การลด

สภาพการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น คุณสมบัติความเป็นผลึก ความบกพร่องของโครงสร้างวัสดุและค่าแรงดันไบอัส เป็นต้น การพิจารณาสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.1) ซึ่งมีหน่วยเป็น โวลต์กำลังสองต่อเฮิรต (V^2/Hz) [246]–[249]

$$S_{1/f}^{elec} = \alpha_{elec} \frac{V_B^2}{Af} \quad (6.1)$$

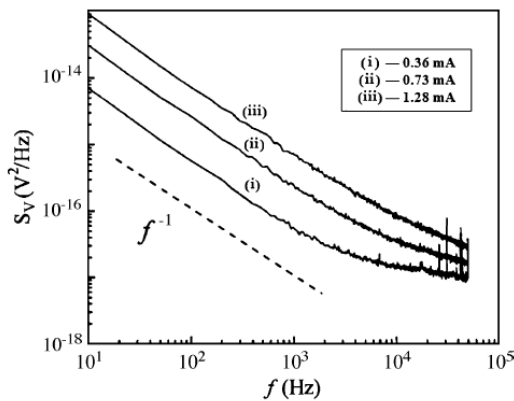
เมื่อ α_{elec} คือพารามิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ของฮุก (electronics Hooge parameter) มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

V_B คือค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์

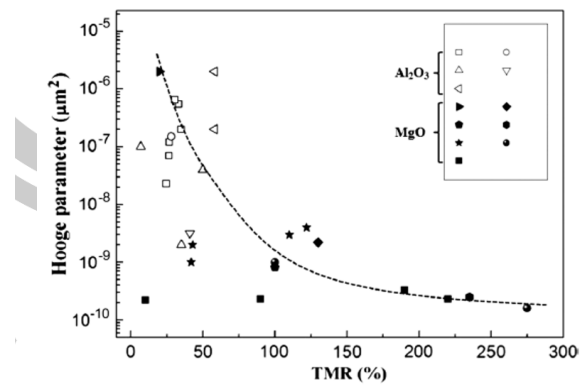
f คือความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรต

A คือพื้นที่หน้าตัดของหัวอ่านข้อมูล มีหน่วยเป็นตารางเมตร

การพิจารณาค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์ในสมการที่ (6.1) แสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์มีค่าแปรผันตรงกับค่าพารามิเตอร์ของฮุกและค่าแรงดันไฟฟ้า [250] ค่าพารามิเตอร์ฮุกสามารถพิจารณาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนและค่าความถี่ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.1 (ก) ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของฮุกที่เป็นฟังก์ชันของค่าอัตราส่วน TMR ของโครงสร้าง MTJ [246] ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.1 (ข) พบว่าค่าพารามิเตอร์ฮุกมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วน TMR โดยโครงสร้าง MTJ ที่อาศัยชั้นวัสดุ Al_2O_3 สำหรับชั้นกลางระหว่างชั้นแม่เหล็กเพอร์โรมีค่าพารามิเตอร์ฮุกที่มากกว่าการใช้วัสดุ MgO เนื่องจากชั้นวัสดุ Al_2O_3 มีคุณสมบัติความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าชั้นวัสดุ MgO [246] ในทำนองเดียวกันผลการศึกษาในเชิงการทดลองของ S.H. Liou และคณะ [248] และ J. Scola และคณะ [247] ยังแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการอบร้อนทำให้วัสดุมีการจัดเรียงตัวแบบผลึกมากขึ้น นอกจากนี้การศึกษาของ A. Gokce และคณะ [251] ยังแสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์มีแปรผันตรงกับค่า RA เนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของหัวอ่านข้อมูลทำให้สภาพการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง ดังนั้นการประยุกต์ใช้หัวอ่านข้อมูลที่มีคุณสมบัติความเป็นผลึกที่สูงจึงทำให้สามารถลดผลกระทบของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลได้ [252]



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 6.1 (ก) ผลของกระแสไบอัสที่มีต่อสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในโครงสร้าง MTJ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 2 เคลวิน [250] และ (ข) ค่าพารามิเตอร์ฮูเกที่เป็นฟังก์ชันของค่าอัตราส่วน TMR ในโครงสร้างวัสดุที่ใช้ชั้นสเปเซอร์เป็นวัสดุ Al_2O_3 และ MgO [246]

นอกจากการพิจารณาค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ อิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน $1/f$ คุณสมบัติภายในวัสดุแม่เหล็กยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการอธิบายค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็กและวิธีการลดค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็กในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

2) สัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็ก

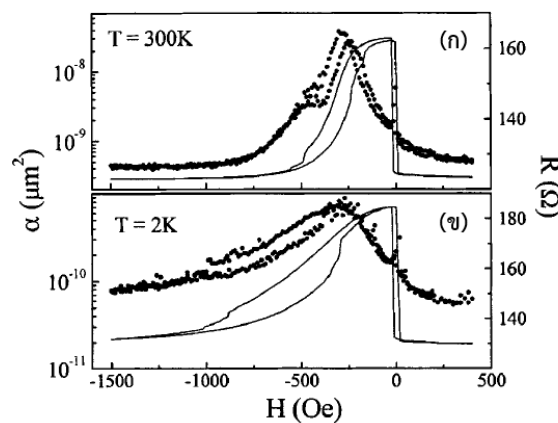
นอกจากการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำและมีลักษณะของสเปกตรัมที่แปรผกผันกับความถี่ โดยผลการศึกษาในเชิงการทดลองของ L. Jiang และคณะ [250] และ A. Gokce และคณะ [251] แสดงให้เห็นว่าค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจากการจัดเรียงตัวแบบขนานเป็นการจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้ามกับชั้นพินดังแสดงตามภาพประกอบ 6.2 การพิจารณาสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.2) ซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์กำลังสองต่อเฮิร์ต [246], [253]

$$S_{1/f}^{mag} = \alpha_{mag} \frac{2B_{sat}}{Vf} \quad (6.2)$$

เมื่อ α_{mag} คือพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของฮุก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรเทสลา

B_{sat} คือสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของชั้นแม่เหล็กอิสระ

V คือปริมาตรของชั้นอิสระ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

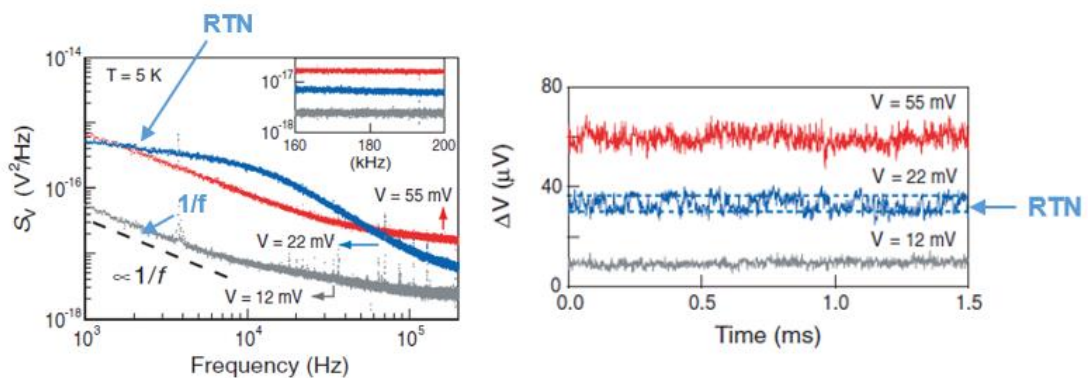


ภาพประกอบ 6.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ฮุก (จุด) และค่าความต้านทาน (เส้น) ที่อุณหภูมิ (ก) 300 และ (ข) 2 เคลวิน [250]

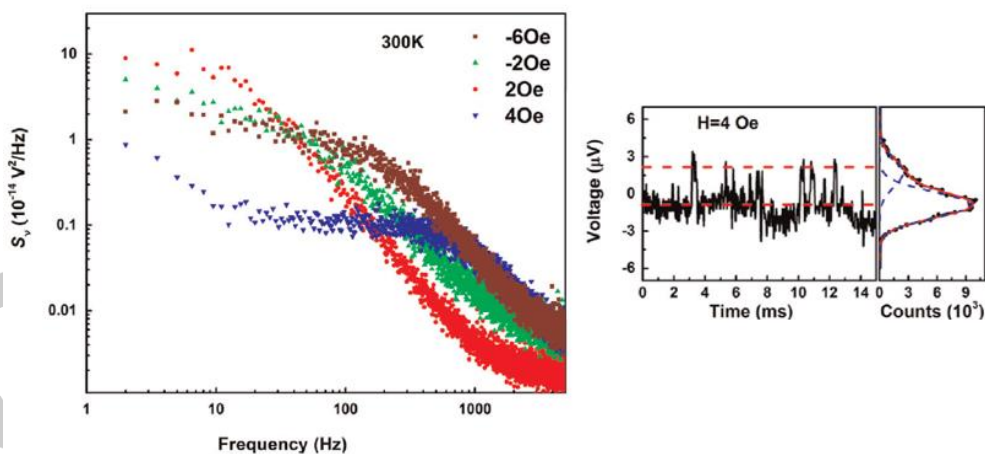
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.2) พบว่าค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็ก $1/f$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กภายนอกและมีค่าแปรผกผันกับปริมาตรของชั้นอิสระ โดยการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็ก เนื่องจากการลดลงของค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุ เพื่อลดผลกระทบของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็กอาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กฮาร์ดไบอัส (hard-bias field) จากชั้นป้องกันด้านข้างเพื่อรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ [254] อย่างไรก็ตามการอาศัยสนามแม่เหล็กฮาร์ดไบอัสทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลและความไวของการตรวจจับสัญญาณ (sensitivity) ดังนั้นการศึกษาค่าสนามฮาร์ดไบอัสที่เหมาะสมที่ทำให้หัวอ่านข้อมูลมีค่าอัตราส่วน MR ที่สูง มีความไวในการตรวจจับสัญญาณและลดผลกระทบของค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ แม่เหล็กจึงมีความสำคัญสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลในปัจจุบัน

6.1.2 ค่าสัญญาณรบกวนเทเลกราฟสุ่ม

สัญญาณรบกวนเทเลกราฟสุ่ม (random telegraph noise, RTN) หรือค่าสัญญาณป๊อปคอร์น (popcorn noise) เป็นสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่เดียวกันกับค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 50 กิโลเฮิร์ต ดังนั้นในการอธิบายสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำจำเป็นต้องพิจารณาผลของสัญญาณรบกวน RTN ร่วมกับสัญญาณรบกวน $1/f$ เพื่ออธิบายพฤติกรรมของค่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำได้อย่างครอบคลุม โดยค่าสัญญาณ RTN ที่เกิดขึ้นส่งผลให้สเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่มีลักษณะแบนราบ (flattening) ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.3 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 6.3 (ก) ผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของค่าความถี่และการเปลี่ยนแปลงพลวัตของค่าแรงดันไฟฟ้า [255] (ข) ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่าสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่และการเปลี่ยนแปลงพลวัตของค่าแรงดันไฟฟ้า [256]

การพิจารณาสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความถี่ต่ำดังแสดงในภาพประกอบ 6.3 (ก) และ (ข) สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.3) ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ และค่าสัญญาณรบกวน RTN ซึ่งมีหน่วยเป็นโวลต์กำลังสองต่อเฮิร์ต [249]

$$S_{low-f} = \sqrt{S_{RTN} + S_{1/f}} \quad (6.3)$$

โดยที่

$$S_{RTN} = \frac{S_0}{1 + (f/f_0)^2}$$

เมื่อ S_0 คือสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนที่มีความถี่เท่ากับ 0 เฮิร์ต มีหน่วยเป็นโวลต์กำลังสองต่อเฮิร์ต

f_0 คือความถี่โรลออฟ มีหน่วยเป็นเฮิร์ต ซึ่งมีค่าเท่ากับ $f_0 = (2\pi\tau)^{-1}$ โดยที่ τ คือระยะเวลาการกลับทิศทางของความผันผวนของลอเรนเซียน (Lorentzian fluctuation) สำหรับการคำนวณการปรับเปลี่ยนสถานะของแรงดันไฟฟ้า [255], [256]

เมื่อพิจารณาพลวัตของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน RTN พบว่าพลวัตของค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีความผันผวนและมีความไม่ต่อเนื่องของระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองสถานะดังแสดงตามภาพประกอบ 6.3 (ก) และ (ข) ค่าสัญญาณรบกวน RTN สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น ความไม่ต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรกับนอนแมกเน็ตหรือภายในชั้นฉนวนไฟฟ้า [257] การกลับทิศทางของโดเมนในบริเวณขอบ (edge domain switching) หรือความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าหรือผลจากความร้อน [249], [255] เป็นต้น

เพื่อลดผลกระทบของค่าสัญญาณรบกวน RTN ที่มีต่อค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลจึงมีการศึกษาสัญญาณรบกวน RTN ในเชิงการทดลองอย่างกว้างขวาง โดย J. Scola และคณะ [247] แสดงให้เห็นว่าการอบร้อนโครงสร้างสปินวาล์วทำให้ค่าสัญญาณรบกวน RTN มีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในโดเมนแม่เหล็ก ซึ่งภายหลังกระบวนการอบร้อนชั้นวัสดุแม่เหล็กจะมีความเป็นผลึกและมีการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันที่เป็นระเบียบมากขึ้น นอกจากนี้ J. M. Almeida และคณะ [258] และ G. C. Han และคณะ [249] ยังแสดงให้เห็นว่าการป้อนแรงดันไบอัสที่สูงทำให้เกิดการกวัดแกว่งของแมกนีไทเซชันและการเคลื่อนที่ของกำแพงโดเมน ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวน RTN ดังนั้นการอาศัยวิธีการอบร้อนจะทำให้โครงสร้าง

วัสดุที่มีความเป็นผลึกและลดผลกระทบค่าสัญญาณ RTN ที่เกิดจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุได้

6.1.3 สัญญาณรบกวนช็อต

ค่าสัญญาณรบกวนช็อต (shot noise) เป็นค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มหรือการผันผวนของอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนไฟฟ้า จากการป้อนแรงดันไบอัสผ่านเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ค่าสัญญาณรบกวนช็อตเป็นค่าสัญญาณรบกวนที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่หรืออุณหภูมิของวัสดุ ค่าสัญญาณรบกวนช็อตสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (6.4) โดยค่าสัญญาณรบกวนช็อตมีค่าแปรผันตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุ [259] มีหน่วยเป็นโวลต์

$$V_{SN} = R \sqrt{2qI\Delta f} \quad (6.4)$$

เมื่อ q คือค่าประจุอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูโลมบ์

I คือค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์

R คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม

Δf คือความกว้างแถบ (bandwidth) มีหน่วยเป็นต่อวินาที

ปัจจุบันการลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าสัญญาณรบกวนช็อตภายในหัวอ่าน เนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR จะทำให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงกว่าหัวอ่านข้อมูลแบบ GMR [244] เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับคั่นกลางระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระภายในโครงสร้างสปิน-วาล์ว ในขณะที่หัวอ่านแบบ GMR อาศัยวัสดุฉนวนแมกเนตที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในการคั่นกลางระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยการเพิ่มขึ้นของการเกิดสัญญาณรบกวนช็อตภายในหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR เป็นตัวแปรที่สำคัญที่นำไปสู่ข้อจำกัดของการของประสิทธิภาพการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง

6.1.4 สัญญาณรบกวนรบกวนจอห์นสัน

ค่าสัญญาณรบกวนจอห์นสัน (Johnson noise) หรือค่าสัญญาณรบกวนของความร้อนจากความต้านทานทางไฟฟ้า (thermal resistance noise) เป็นสัญญาณรบกวนพื้นฐาน

(fundamental noise) ของหัวอ่านข้อมูลที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ สัญญาณรบกวนจอร์นสันเกิดขึ้นจากความร้อนจากความผันผวนของอิเล็กตรอนภายในเซนเซอร์หัวอ่าน ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน ดังแสดงในสมการที่ (6.5) โดยค่าสัญญาณรบกวนจอร์นสันมีค่าแปรผันตรงกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและอุณหภูมิของระบบ [259] มีหน่วยเป็นโวลต์

$$V_{JN} = \sqrt{4k_B T R A f} \quad (6.5)$$

เมื่อ k_B คือค่าคงที่โบลต์ซมานซ์ (Boltzman's constant) มีหน่วยเป็นจูลต่อเคลวิน

T คืออุณหภูมิ ในหน่วยเคลวิน

R คือความต้านทานรวมของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็นโอห์ม

ค่าสัญญาณรบกวนจอร์นสันเป็นค่าสัญญาณรบกวนที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนซีต เนื่องจากการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและค่าสัญญาณรบกวนจอร์นสันภายในหัวอ่านข้อมูล

6.1.5 ค่าสัญญาณรบกวนจากความร้อน

โดยทั่วไปคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและแอนติเฟอร์โรจะมีค่าขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิของระบบ โดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและแอนติเฟอร์โรจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) และอุณหภูมินีล (Neel temperature) ตามลำดับ เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกิดการลดลงของค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุอย่างเป็นระเบียบ โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความผันผวนของสปินและส่งผลให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุมีค่าลดลง ซึ่งการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแสดงให้เห็นว่าความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการทำงานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์

ปัจจุบันการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กและส่งผลต่อค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการลดลงของค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของสปินภายในวัสดุ โดยทั่วไปความถี่ของความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (6.6) โดยความถี่ของความผันผวนของแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกีดกันและความร้อนของวัสดุ

$$f = f_0 \exp(-\Delta E/k_B T) \quad (6.6)$$

เมื่อ f_0 คือค่าคงที่ความถี่ (attempt frequency) มีค่าประมาณ 10^9 เฮิรต

ΔE คือค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชัน โดยมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แวนไอโซโทรปีและปริมาตรของชั้นอิสระ

การลดขนาดพื้นที่การบันทึกข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่การบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำให้เกิดการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลให้เล็กลงและสอดคล้องกับขนาดของแทร็คและบิตข้อมูล เพื่อลดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากขอบแทร็คและบิตข้อมูลข้างเคียงในกระบวนการอ่านข้อมูล [52] การอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเปรียบเทียบทิศทางระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 1 และ 0 โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากบิตข้อมูล โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ใช้เป็นชั้นอิสระในโครงสร้างสปีนวาล์วจะต้องมีค่าแวนไอโซโทรปีต่ำ เพื่อลดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและทำให้ชั้นอิสระมีความไวในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล อย่างไรก็ตามการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีค่าที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาตรของเกรนแม่เหล็กและค่าแวนไอโซโทรปีที่ใช้เป็นชั้นอิสระมีค่าต่ำ ซึ่งการลดลงของค่าพลังงานกีดกันทำให้เกิดการเพิ่มความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล

การพิจารณาผลของความร้อนที่ทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูลหรือแมกนอยส์ (mag-noise) สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (6.7) ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับผลของอุณหภูมิของระบบ [249]

$$V_{MN} = I \frac{\Delta R \cos \phi}{H_{stiff}} \sqrt{\frac{\alpha k_B T}{\gamma \mu_0 M_s V}} \quad (6.7)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวัด มีหน่วยเป็นแอมแปร์

ΔR คือความต่างของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่มีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบขนานและตรงกันข้าม มีหน่วยเป็นโอห์ม

α คือค่าคงที่ความหน่วง

μ_0 คือค่าสภาพให้ซาบซึมแม่เหล็กที่สุญญากาศ (vacuum permeability)

M_s คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของชั้นอิสระ

V คือปริมาตรของชั้นอิสระ

H_{stiff} คือสนามแลกเปลี่ยนประสิทธิผล (effective stiffness field) ที่เกิดจากสนามฮาร์ดไดรฟ์จากชั้นป้องกันด้านข้าง ค่าแอนไอโซโทรปีของชั้นอิสระและค่าแอนไอโซโทรปีรูปร่างภายในชั้นอิสระ

ϕ คือมุมระหว่างชั้นอิสระที่กระทำต่อความกว้างของแตร็คข้อมูล

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.7) แสดงให้เห็นว่าขนาดของแมกนอยส์มีค่าแปรผกผันกับปริมาตรของหัวอ่านข้อมูลและสนามแลกเปลี่ยนประสิทธิผล ซึ่งการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นแมกนอยส์ ดังนั้นเพื่อที่จะลดขนาดของแมกนอยส์ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลขนาดเล็ก การเพิ่มค่าสนามแลกเปลี่ยนประสิทธิผลที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีต่อการเพิ่มขึ้นของค่า SNR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งผลการศึกษาในเชิงทฤษฎี [241]–[243] และการทดลอง [245] แสดงให้เห็นว่าความไม่สม่ำเสมอของสนามฮาร์ดไดรฟ์จากชั้นป้องกันด้านข้างจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนแมกนอยส์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าสนามฮาร์ดไดรฟ์จากชั้นป้องกันด้านข้างยังช่วยให้สามารถลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width) และในขณะเดียวกันความสูงของเซนเซอร์ (stripe height) จำเป็นต้องมีค่าลดลงเช่นเดียวกันเพื่อรักษาทิศทางของค่าแอนไอโซโทรปีรูปร่าง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของสนามแลกเปลี่ยนประสิทธิผลจะทำให้เกิดข้อจำกัดของความเร็วในการตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแผ่นข้อมูลจำเป็นต้องมีค่าที่มากกว่าความแรงของสนามแลกเปลี่ยนประสิทธิผล เพื่อเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูล

6.1.6 สัญญาณรบกวนจากแรงบิดสปิน

กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการป้อนแรงดันไบอัสผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เพื่อทำการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปินวาล์วและแสดงค่าการอ่านข้อมูลในรูปแบบของค่าสัญญาณบิต 1 หรือ 0 โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระในโครงสร้างสปินวาล์ว การป้อนแรงดันไบอัสเพื่อแสดงค่าการอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินหรือสปินทอร์ก (spin-transfer torque) จากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในวัสดุเกิดการสั่นและทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่าน

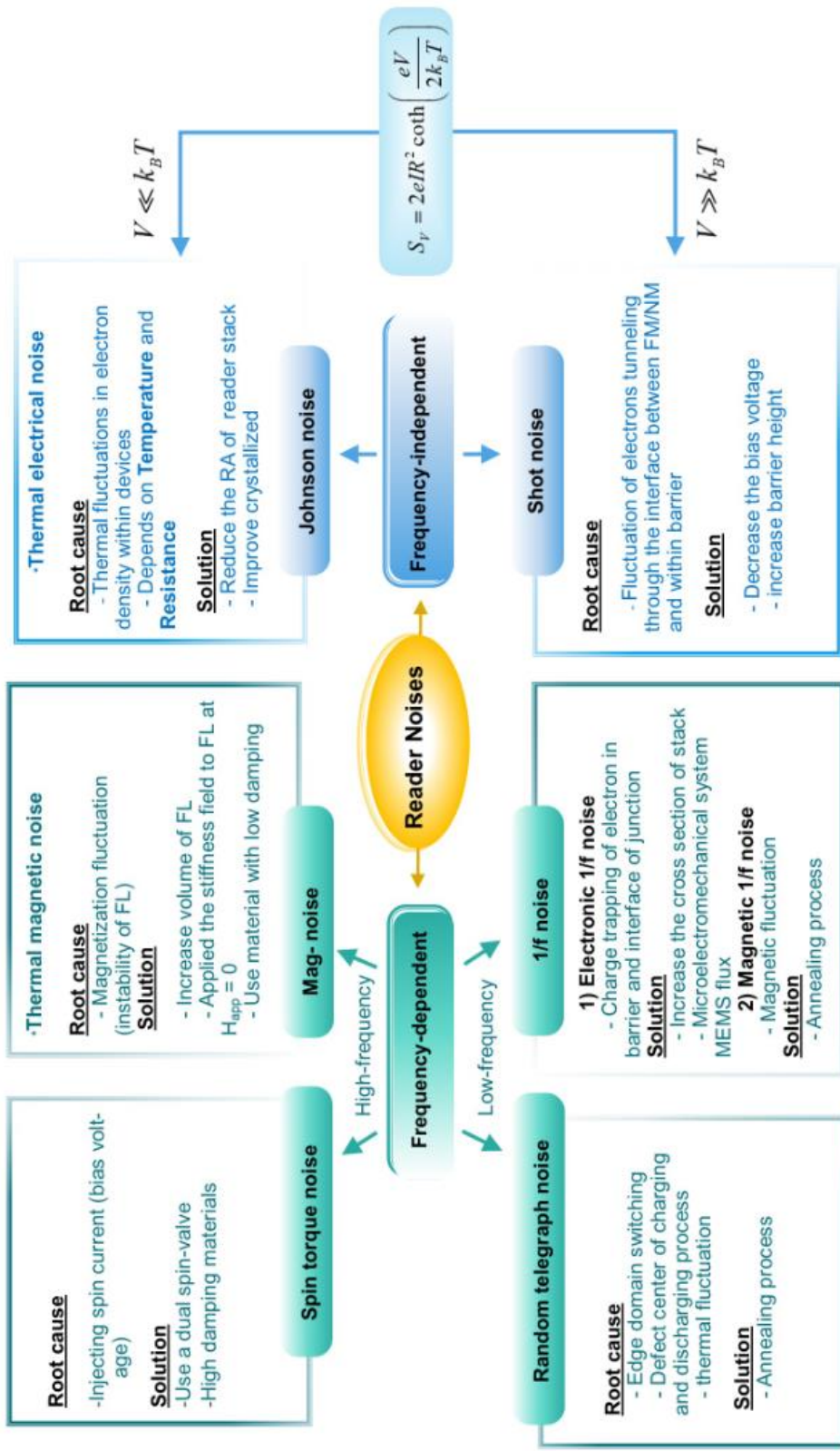
ข้อมูล โดยจะเรียกสัญญาณรบกวนประเภทนี้ว่าสัญญาณรบกวนจากแรงบิดสปิน (spin-torque noise) [170]

การป้อนแรงดันไบอัสเข้าสู่โครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านโครงสร้างสปินวาล์ว เมื่อพิจารณากรณีที่มีอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสระ การเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างสปินวาล์วจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ เมื่อกระแสสปินเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นพินที่มีการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในทิศทางที่แน่นอน กระแสสปินที่มีทิศทางใดๆ จะถูกเหนี่ยวนำทิศทางให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยน s-d ที่เกิดขึ้นจากสปินภายในชั้น s ของกระแสสปินและสปินภายในชั้น d ของวัสดุแม่เหล็ก จากนั้นเมื่อกระแสสปินที่ถูกเหนี่ยวนำทิศทางหรือกระแสสปินโพลาไรซ์ (spin-polarised current) เคลื่อนที่ไปยังชั้นอิสระที่มีทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแบบเปลี่ยนแปลงได้ จะทำให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์และแมกนีไทเซชันอีกครั้ง โดยอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนดังกล่าวจะทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากแมกนีไทเซชันกระทำต่อกระแสสปินโพลาไรซ์ ในขณะเดียวกันตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมก็จะเกิดแรงบิดสปินกระทำกลับต่อแมกนีไทเซชันเช่นเดียวกัน โดยการส่งผ่านแรงบิดสปินที่เกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ ซึ่งแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสสปินที่ถูกป้อนผ่านโครงสร้างวัสดุ ในกรณีที่ความหนาแน่นของกระแสสปินมีค่ามากพอ ผลของแรงบิดสปินจะสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระได้ การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงของแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชัน ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับความหนาแน่นของกระแสสปิน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากแรงบิดสปิน ความหนาแน่นของกระแสสปินที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจำเป็นต้องมีค่าที่น้อยกว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวิกฤต (critical current) หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้แมกนีไทเซชันเริ่มการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ถึงแม้ว่าในกระบวนการอ่านข้อมูลจะอาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตเพื่อแสดงค่าการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของกระแสสปินผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กยังคงทำให้เกิดการสั่นของแมกนีไทเซชัน เนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ [170] เพื่อที่จะลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงบิดสปินจึงได้มีการอาศัยโครงสร้างสปินวาล์วแบบคู่ (dual spin valve) เพื่อลดผลกระทบจากกระแสสปินที่สะท้อนกลับจากชั้นพินที่กระทำต่อชั้นอิสระ [158] อย่างไรก็ตามการใช้โครงสร้างสปินวาล์วแบบคู่จะมีข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้

ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความจุข้อมูลที่สูง เนื่องจากข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างชั้นป้องกัน (shield to shield spacing, SS spacing)

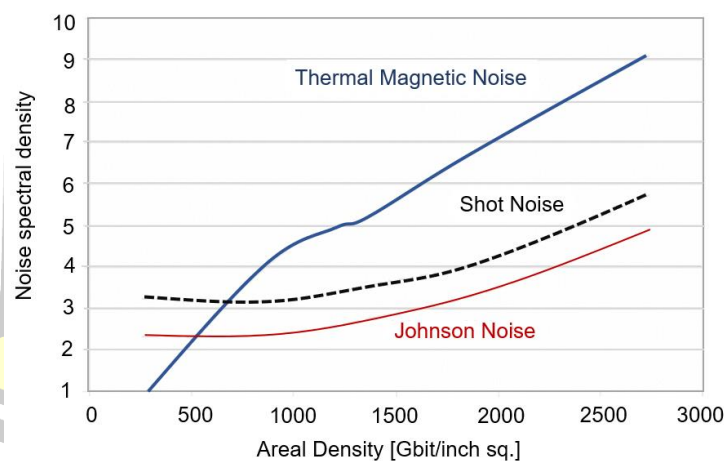
จากการพิจารณารายละเอียดของสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูลข้างต้นพบว่า สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยและส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นเพื่อความเข้าใจพื้นฐานของค่าสัญญาณรบกวนต่างๆ จึงทำการสรุปสาเหตุของการเกิดค่าสัญญาณรบกวนและแนวทางการลดค่าสัญญาณรบกวนต่างๆ ภายในหัวอ่านข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 6.4





ภาพประกอบ 6.4 การเกิดสัญญาณรบกวนต่างๆ ภายในหัวอ่านข้อมูล

ปัจจุบันความต้องการเพิ่มความหนาแน่นของพื้นที่ที่การบันทึกข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนในกระบวนการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล โดยงานวิจัยของ Y. Chen และคณะ [260] แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณรบกวนพื้นฐานจากการเพิ่มความจุข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล พบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพื้นที่ที่การบันทึกข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนจอร์นสันและสัญญาณรบกวนช็อต เนื่องจากการลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของแตร็คการบันทึกข้อมูล ทำให้เกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างสปินวาล์ว ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูล นอกจากนี้การลดขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลยังส่งผลต่อการลดลงของเสถียรภาพทางความร้อนของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการลดลงของค่าพลังงานกีดกันที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วเกิดความผันผวนและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.5 ซึ่งจากการพิจารณาค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าความผันผวนของสปินที่เกิดขึ้นจากผลของความร้อนเป็นปัจจัยหลักและส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล



ภาพประกอบ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีต่อความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล [260]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล จากการพิจารณาผลของความร้อนและผลของสนามแม่เหล็กฮาร์ดไดรฟ์ที่มีต่อค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล โดยการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในหัวอ่านข้อมูลโดย

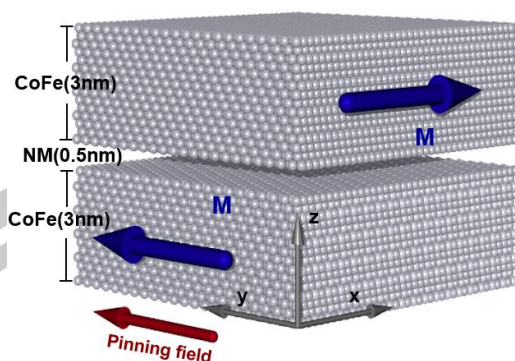
การใช้แบบจำลองในระดับอะตอม ในลำดับแรกจะทำการอธิบายโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2 ผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน

การแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในโครงสร้างสปีนวาล์วเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 โดยค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ เมื่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนสำหรับใช้เป็นชั้นอ้างอิงในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะเปลี่ยนแปลงตามการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูล เมื่อทำการพิจารณากระบวนการแสดงค่าสัญญาณไบนาไร-บิตของหัวอ่านข้อมูลพบว่า โครงสร้างที่สำคัญของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลจะประกอบไปด้วยชั้นแม่เหล็กเฟอร์ไรต์สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นนอนแมกเน็ต ดังนั้นในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของสนามประสิทธิผลที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นภายในชั้นพินและชั้นอิสระ โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.1 พลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น

การเปลี่ยนแปลงพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ซึ่งประกอบไปด้วยค่าสนามแลกเปลี่ยน สนามแอนไอโซโทรปี สนามภายนอก สนามคู่ขั้วและสนามความร้อน ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาเฉพาะผลของสนามแลกเปลี่ยนและสนามแอนไอโซโทรปีที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยจะทำการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย $\text{CoFe}(3\text{nm})/\text{NM}(0.5\text{nm})/\text{CoFe}(3\text{nm})$ ที่มีขนาดด้านแกน x และ y เท่ากับ 10×10 ตารางนาโนเมตร โดยกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินให้มีการจัดเรียงตัวในแนวแกน y จากผลของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนขนาด 0.3 เทสลาที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ในขณะที่ยังไม่มี การอ่านข้อมูล แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นพินในแนวแกน x ดังแสดงในภาพประกอบ 6.6 โดยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ CoFe แสดงตามตารางที่ 6.1 โดยในกรณีนี้จะไม่ทำการพิจารณาผลของสนามสนามคู่ขั้วที่ส่งผลต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

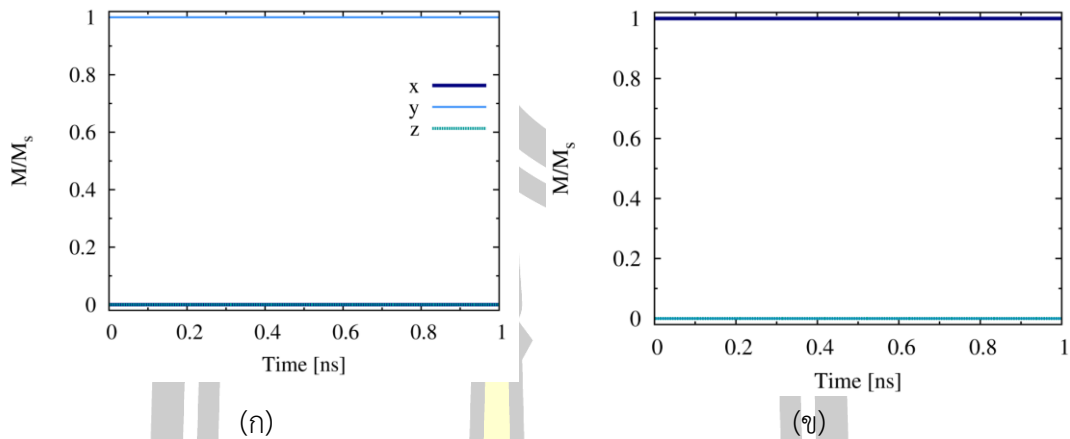


ภาพประกอบ 6.6 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงินแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ CoFe

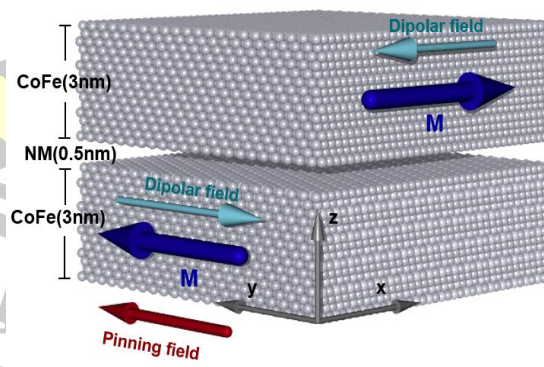
ค่าพารามิเตอร์	ปริมาณ
ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี	2.45×10^{-24} จูล/อะตอม
ค่าพรีพินซ์แลกเปลี่ยน	6.0×10^{-24} จูล/ลิ้งค์
สปินโมเมนต์	$2.5\mu_B$
ขนาดของเซลล์หนึ่งหน่วย	3.54×10^{-10} เมตร
จำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยเซลล์	4 อะตอม
ค่าคงที่ความหน่วง	0.1

เมื่อทำการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมพบว่า แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจะมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกน y ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.7 (ก) เนื่องจากผลของสนามแลกเปลี่ยน สนามแอนไอโซโทรปีและสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ออกแรงกระทำและทำให้สปินมีทิศทางการจัดเรียงตัวตามแนวแกนง่ายของวัสดุและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกน x ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.7 (ข) เนื่องจากผลของสนามแลกเปลี่ยนและสนามแอนไอโซโทรปีทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางแกนง่ายของวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่าพลวัตของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ทั้งสองชั้นจะมีค่าเท่ากับหนึ่งและไม่มีควมผันผวน เนื่องจากการไม่มีผลของสนามความร้อนและผลของสนามแม่เหล็กคู่ชั่ว



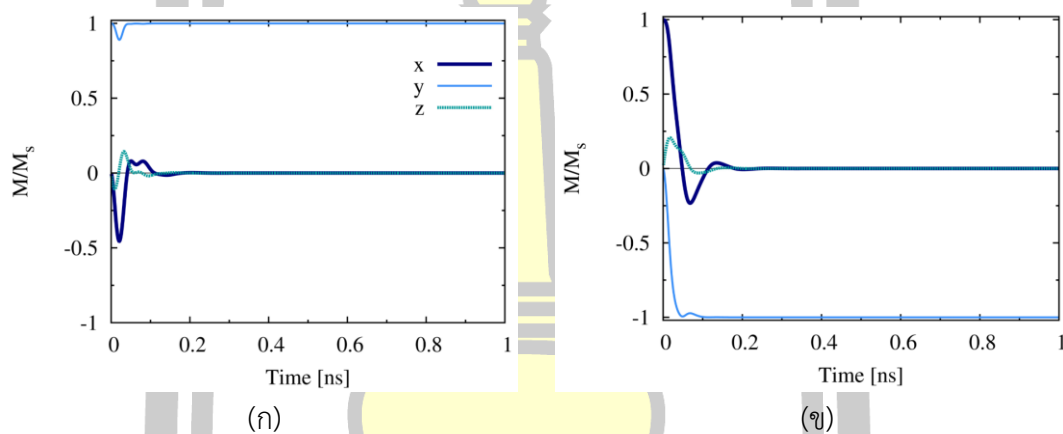
ภาพประกอบ 6.7 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพินและ(ข) ชั้นอิสระ ในกรณีที่ไม่พิจารณาสนามความร้อนและสนามคู่ขั้ว

การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว นอกจากจะมีค่าขึ้นอยู่กับผลของสนามแอนไอโซโทรปี สนามแลกเปลี่ยนและสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อสปีนภายในโครงสร้างวัสดุ ยังมีผลของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว ในลำดับถัดไปจะทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระในโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุ CoFe(3nm)/NM(0.5nm)/CoFe(3nm) โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในแนวแกน y และ x ตามลำดับ ในขณะที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.8



ภาพประกอบ 6.8 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงิน สีแดงและสีฟ้าแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและทิศทางของสนามคู่ขั้วที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นพบว่า แมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กมีการเคลื่อนที่แบบกั่นหอยเข้าหาทิศทางสนามแม่เหล็กประสิทธิผลของชั้นวัสดุ โดยผลของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กส่งผลให้ขนาดของแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระมีค่าลดลงร้อยละ 0.042 และ 0.052 ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.9 (ก) และ (ข) นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กพบว่า แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวแกน $-y$ ซึ่งเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุเนื่องจากผลของสนามสเตย์จากชั้นพินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.9 (ข)

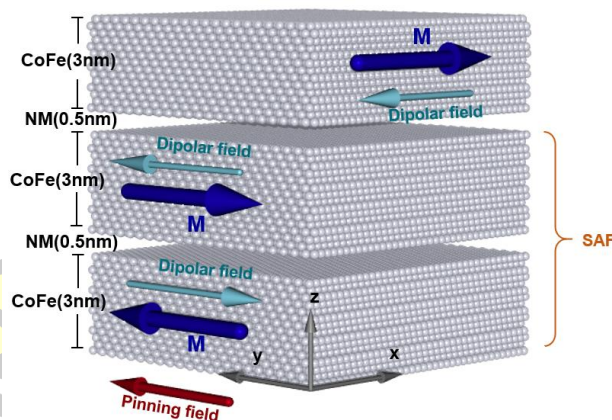


ภาพประกอบ 6.9 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพินและ (ข) ชั้นอิสระในกรณีที่พิจารณาผลของสนามคู่ขั้วที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุสามชั้น

จากการพิจารณาผลของสนามคู่ขั้วที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นพบว่า ผลของสนามแม่เหล็กคู่ขั้วและสนามสเตย์เป็นปัจจัยที่สำคัญและส่งผลต่อการจัดเรียงตัวและพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ซึ่งในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ประกอบไปด้วยชั้นพินชั้นสเปเซอร์และชั้นอิสระจะเกิดสนามสเตย์จากชั้นพินกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic structure, SAF) เพื่อลดค่าสนามสเตย์ที่ส่งผลต่อการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว [90] ในลำดับถัดไป จะทำการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กภายในโครงสร้างสปีนวาล์วที่พิจารณาผลของ SAF โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.2 พลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง SAF

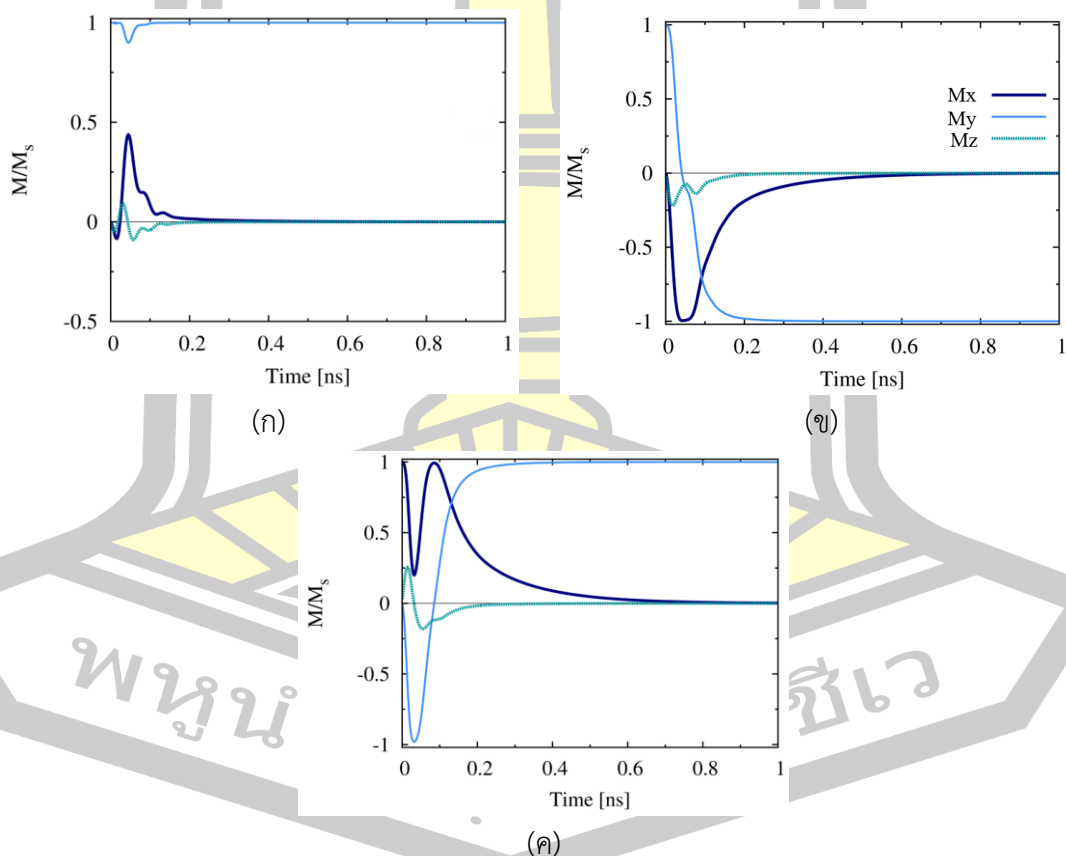
โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในปัจจุบันประกอบด้วยชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร/ชั้นพิน/ชั้นสเปสเซอร์/ชั้นอ้างอิง/ชั้นสเปสเซอร์/ชั้นอิสระ ซึ่งโครงสร้างชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร/ชั้นพิน/ชั้นสเปสเซอร์/ชั้นอ้างอิงจะถูกเรียกว่าโครงสร้าง SAF ซึ่งจะช่วยลดผลของสนามสแตย์ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาคู่มือโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยรวมผลของ SAF ที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลประกอบด้วยวัสดุ CoFe(3nm)/NM(0.5nm)/CoFe(3nm)/NM(0.5nm)/CoFe(3nm) ที่มีขนาดด้านแกน x และ y เท่ากับ 10×10 ตารางนาโนเมตร โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินให้มีการจัดเรียงตัวในแนวแกน y เนื่องจากผลของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนขนาด 0.3 เทสลาที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ในขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิงมีทิศทางการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน RKKY ซึ่งเป็นอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันชั้นพินและชั้นอ้างอิง โดยกำหนดให้ค่าคงที่แลกเปลี่ยน RKKY ระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิงมีค่าเท่ากับ -1.6×10^{-21} จูลต่อลิ้งก์ ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้นอ้างอิง โดยมีทิศทางตามแนวแกน x ตามแนวแกนง่ายของวัสดุ ดังแสดงในภาพประกอบ 6.10



ภาพประกอบ 6.10 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วย CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm)/Cu(0.5nm)/CoFe(3nm) ลูกศรสีน้ำเงิน สีแดงและสีฟ้าแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและทิศทางของสนามคู่ขั้วที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ตามลำดับ

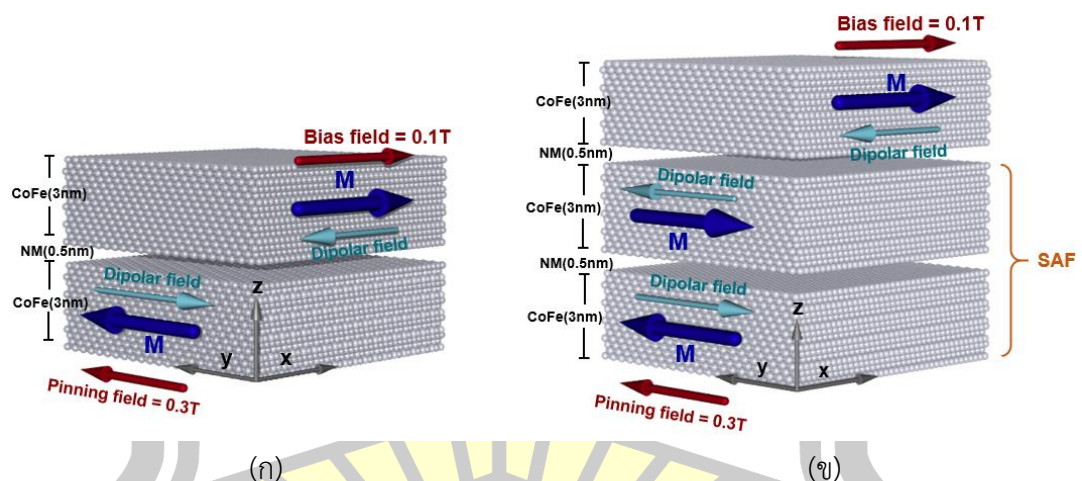
เมื่อทำการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอ้างอิงพบว่า แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินจัดเรียงตัวตามแนวแกน y เนื่องจากผลของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนส่งผลต่อการจัดเรียง

ตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.11 (ก) ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงมีการกวัดแกว่งในระนาบ $-xy$ เนื่องจากผลของสนามสเตรย์จากชั้นอิสระกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและทำให้เกิดองค์ประกอบตามแนวแกน $-x$ โดยที่สภาวะสมดุลแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง $-y$ ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.11 (ข) เนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อม RKKY ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิง ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระพบว่า แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายและจัดเรียงตัวในแนวแกน y เนื่องจากผลของสนามสเตรย์จากชั้นอ้างอิง ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.11 (ค) โดยขนาดของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.03 เมื่อเทียบกับขนาดของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่ไม่ได้ทำการคิดผลของ SAF เนื่องจากการเกิดโครงสร้างฟลักซ์ปิดที่ทำให้เกิดการหักล้างกันระหว่างฟลักซ์ของสนามสเตรย์จากชั้นอ้างอิงและชั้นพิน ส่งผลให้สนามสเตรย์ที่กระทำต่อชั้นอิสระมีค่าน้อยลง



ภาพประกอบ 6.11 ผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายใน (ก) ชั้นพิน (ข) ชั้นอ้างอิง และ (ค) ชั้นอิสระ ในโครงสร้าง $\text{CoFe}(3\text{nm})/\text{Cu}(0.5\text{nm})/\text{CoFe}(3\text{nm})/\text{Cu}(0.5\text{nm})/\text{CoFe}(3\text{nm})$ กรณีที่ไม่คิดผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่กระทำต่อชั้นอิสระ

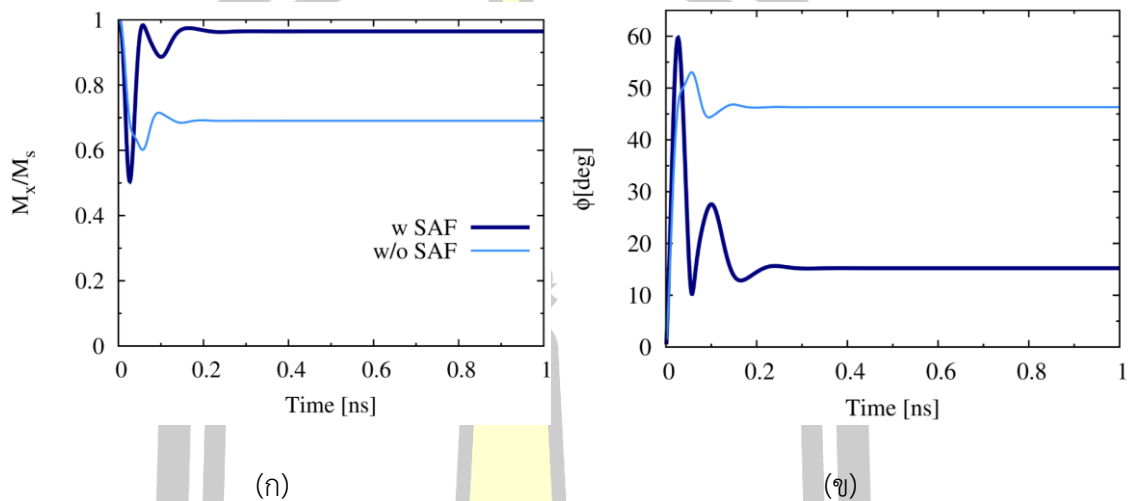
ผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสนามสเตรย์จากชั้นพินและชั้นอ้างอิงส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นพินและชั้นอ้างอิง โดยการ จัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระในระนาบเดียวกับชั้นอ้างอิงทำให้การตอบสนองของเส้นโค้ง- ทรานส์เฟอร์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและส่งผลต่อประสิทธิภาพการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [33] เพื่อให้เซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกแบบเชิงเส้นจึงอาศัยการ ป้อนสนามแม่เหล็กฮาร์ดไบอัส (hard bias field) จากชั้นป้องกันด้านข้างเพื่อกำหนดทิศทางของ แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิง ดังนั้นในลำดับถัดไป จะทำการพิจารณาผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระใน โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและโครงสร้างสปินวาล์วที่รวมผลของ SAF จากการป้อนสนามฮาร์ดไบอัส ในทิศทางตั้งฉากกับชั้นพิน โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ทิศทางของสนาม ไบอัสแลกเปลี่ยนและสนามฮาร์ดไบอัสของโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและโครงสร้างสปินวาล์วที่รวม ผลของ SAF ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.12 (ก) และ (ข)



ภาพประกอบ 6.12 (ก) โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและ (ข) โครงสร้างชั้นอิสระที่รวมผลของ SAF ที่ใช้ การป้อนสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและสนามฮาร์ดไบอัสเพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายใน ชั้นพินและชั้นอิสระ ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ในโครงสร้างสปินวาล์วที่มีและไม่มีองค์ประกอบของชั้น SAF พบว่าองค์ประกอบของแมกนีไทเซชัน ตามแนวแกน x ในโครงสร้างสปินวาล์วที่ไม่มีชั้น SAF มีค่าลดลงร้อยละ 30.9 และมีการเบี่ยงเบนออก จากทิศทางของสนามฮาร์ดไบอัส (แกน x) เท่ากับ 46.32 องศา ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.13 (ก) และ (ข) ซึ่งมียุคมากกว่าการเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนสนามฮาร์ดไบอัสในโครงสร้างสปินวาล์วที่รวม ผลของ SAF ที่มีค่าเท่ากับ 15.22 องศา ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการใช้โครงสร้าง SAF ทำให้

แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระทำมุมเบี่ยงเบนออกจากทิศทางสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่น้อยกว่าโครงสร้างสปินวาล์วที่ไม่มีโครงสร้าง SAF ร้อยละ 67.03 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้โครงสร้าง SAF ในโครงสร้างสปินวาล์วสามารถลดผลกระทบของสนามเสถียรที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ



ภาพประกอบ 6.13 (ก) การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x ภายในชั้นอิสระ และ (ข) มุมของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่กระทำต่อทิศทางของสนามฮาร์ดไดรฟ์ระหว่างโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นและโครงสร้าง SAF

จากการศึกษาผลของสนามคู่ขั้วที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปินวาล์วในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

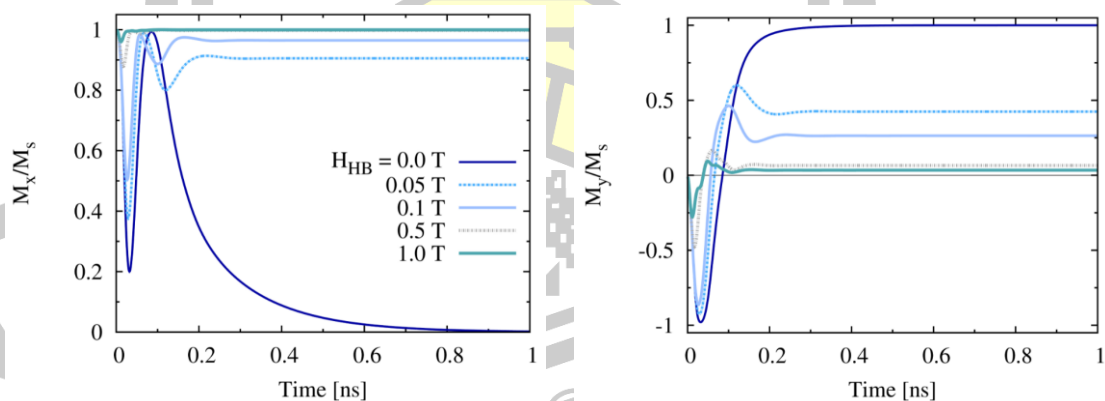
6.3 การพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่มีต่อสัญญาณรบกวน

ในขณะที่ไม่มีการอ่านข้อมูล แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงและขนานกับพื้นผิวรองรับลิ้นอากาศ (air-bearing surface, ABS) เพื่อให้เกิดความสมมาตรของการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล โดยทำการป้องกันสนามฮาร์ดไดรฟ์จากชั้นป้องกันด้านข้าง (side shield) ซึ่งสนามดังกล่าวจะกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระและทำให้หัวอ่านข้อมูลมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลแบบเชิงเส้น (linear response) นอกจากนี้สนามฮาร์ดไดรฟ์ยังช่วยลดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่เกิดจากผลของความร้อน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าสัญญาณรบกวนแมกนอยส์ในหัวอ่านข้อมูล [241]–

[243],[245] ดังนั้นการศึกษาการป้อนสนามฮาร์ตไบอัสที่เหมาะสมจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

6.3.1 ผลของสนามฮาร์ตไบอัสที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน

ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาผลของสนามฮาร์ตไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในโครงสร้างสปีนวาล์วที่พิจารณาโครงสร้าง SAF การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วแสดงตามภาพประกอบ 6.10 โดยสนามฮาร์ตไบอัสที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระมีค่าตั้งแต่ 0 – 1 เทสลาและมีทิศทางตามแนวแกน x ซึ่งตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิง เมื่อพิจารณาผลของสนามฮาร์ตไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินพบว่า แมกนีไทเซชันมีการเคลื่อนที่แบบก้นหอยเข้าหาทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล โดยแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวในระนาบ xy ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ในกรณีที่ไมทำการป้อนสนามฮาร์ตไบอัส การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีการจัดเรียงตัวในแนวแกน y และมีทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง เนื่องจากผลของสนามสแตย์จากชั้นอ้างอิง อย่างไรก็ตามเมื่อค่าสนามฮาร์ตไบอัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แรงจากสนามฮาร์ตไบอัสจะเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะเริ่มเบนออกจากระนาบของชั้นอ้างอิงและมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในแนวแกน x ในกรณีที่สนามฮาร์ตไบอัสมีค่ามากจะทำให้แมกนีไทเซชันภายในอิสระลู่เข้าสู่ทิศทางของสนามที่ป้อน (แกน x) ได้เร็วขึ้นและมีทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงเมื่อค่าสนามฮาร์ตไบอัสมีค่ามากพอ



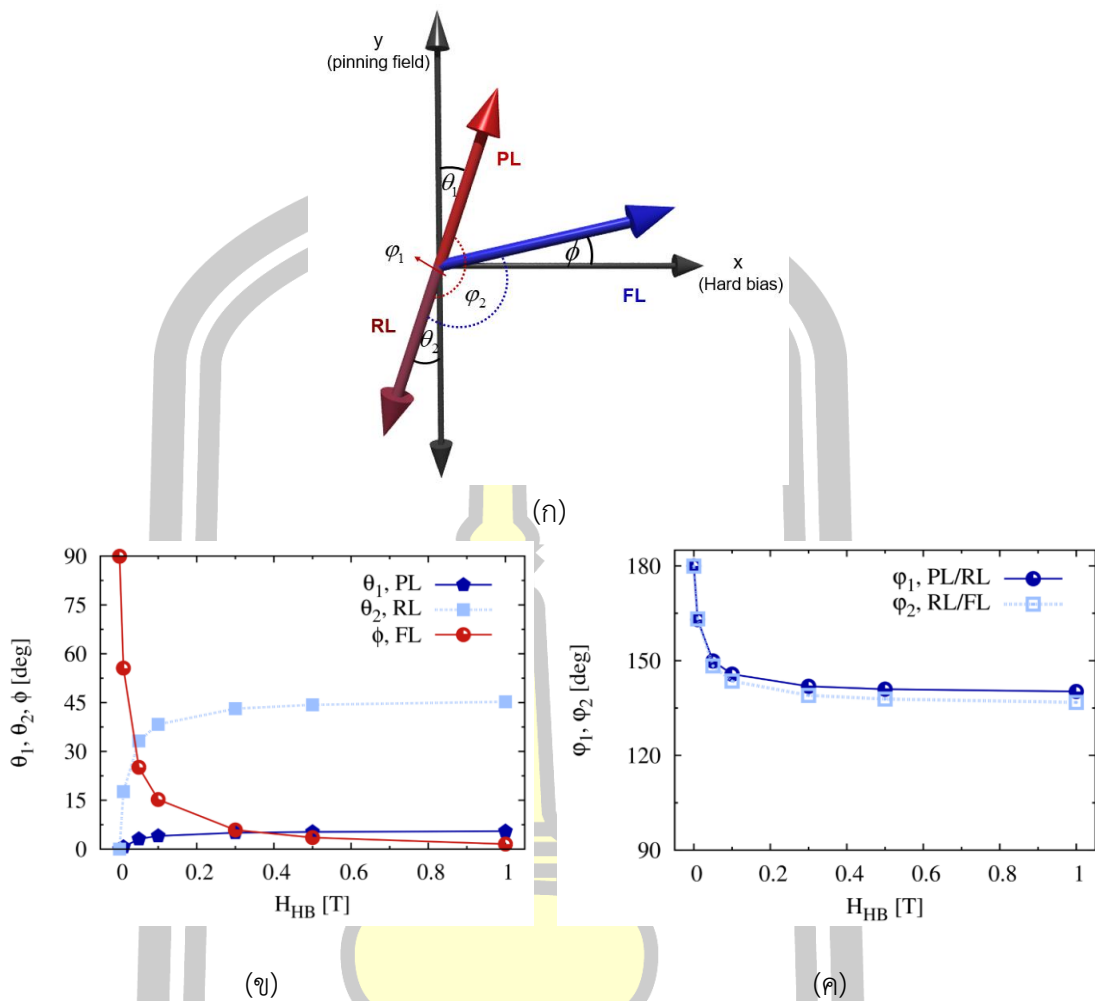
(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 6.14 ผลของสนามฮาร์ตไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระในแนว (ก) แกน x และ (ข) แกน y

จากนั้นเมื่อทำการคำนวณผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ โดยทำการพิจารณาการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระออกจากทิศทางสนามไดรฟ์แลกเปลี่ยนและทิศทางของสนามฮาร์ดไดรฟ์ตามลำดับ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.15 (ก) พบว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินทำมุมเบี่ยงเบนออกจากทิศทางของสนามไดรฟ์แลกเปลี่ยนเท่ากับ 5.48 องศาและทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงทำมุมเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนสนามไดรฟ์แลกเปลี่ยน เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน RKKY เท่ากับ 45.24 องศา เมื่อสนามฮาร์ดไดรฟ์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 เทสลาดังแสดงตามภาพประกอบ 6.15 (ค) ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการป้อนสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและทำให้อัตราส่วน MR หรือความสามารถในการแสดงความแตกต่างระหว่างสัญญาณบิต 0 และ 1 มีค่าลดลง

จากนั้นเมื่อทำการพิจารณามุมของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่กระทำกับสนามฮาร์ดไดรฟ์พบว่า ในกรณีที่ไมทำการป้อนสนามฮาร์ดไดรฟ์ แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจะมีการจัดเรียงตัวขนานกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงและทำมุมตั้งฉากกับระนาบของ ABS เมื่อทำการป้อนสนามฮาร์ดไดรฟ์เข้าสู่ชั้นอิสระ มุมของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่กระทำต่อสนามฮาร์ดไดรฟ์จะมีค่าแปรผกผันกับความแรงของค่าสนามฮาร์ดไดรฟ์ โดยทำมุมเท่ากับ 1.94 องศา เมื่อสนามฮาร์ดไดรฟ์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1 เทสลาดังแสดงตามภาพประกอบ 6.15 (ข) ซึ่งผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าสนามฮาร์ดไดรฟ์ทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้นพินและชั้นอ้างอิง ซึ่งทำให้การตอบสนองของการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูลหรือการแสดงเส้นโค้งทรานส์เฟอร์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและมีความสมมาตรระหว่างการแสดงค่าสัญญาณบิต 0 และ 1 อย่างไรก็ตามการเพิ่มสนามฮาร์ดไดรฟ์จะทำให้ความไวในการตรวจจับสัญญาณของหัวอ่านข้อมูลมีค่าที่ลดลง [242] นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณามุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอ้างอิง (ϕ_1) และชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ (ϕ_2) พบว่าผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์ทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามสแตย์ที่เกิดจากชั้นอิสระและไม่จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันของชั้นพินดังแสดงตามภาพประกอบ 6.15 (ค) เพื่อลดการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง การเพิ่มอันตรกิริยา RKKY จึงทำให้มุม ϕ_1 มีค่าน้อยลงและทำให้มุมของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระสามารถทำมุมตั้งฉากกับชั้นอ้างอิงได้ดีขึ้น



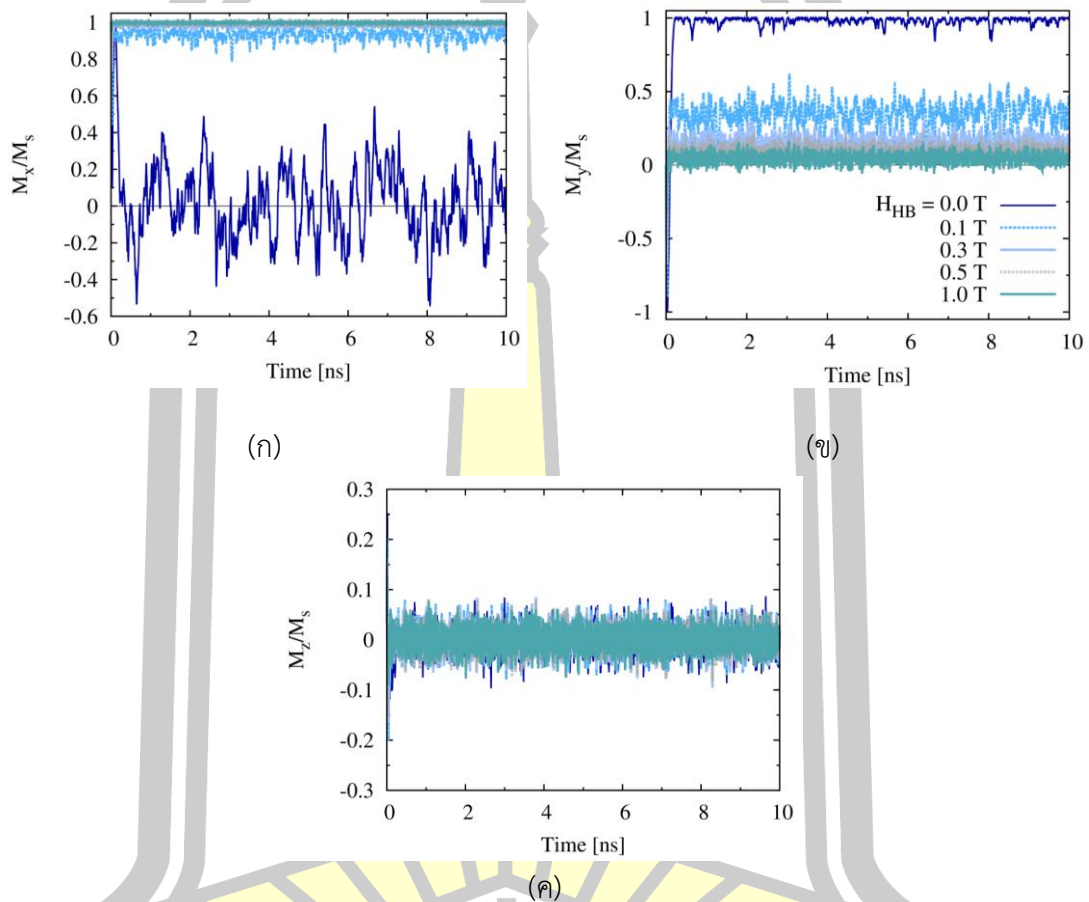
ภาพประกอบ 6.15 (ก) การจัดเรียงตัวแมกนีไทเซชันภายในชั้นพิน ชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระเทียบกับทิศทางของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและสนามฮาร์ดไบอัส ผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อการเบี่ยงเบนของ (ข) แมกนีไทเซชันภายในชั้นพินกับชั้นอ้างอิงจากแนวแกน y และชั้นอิสระจากแนวแกน x (ค) มุมระหว่างชั้นพินกับชั้นอ้างอิงและชั้นอ้างอิงกับชั้นอิสระ

จากการศึกษาผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอิสระ ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 50 เคลวินและคำนวณสเปคตัมของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในชั้นอิสระ โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.3.2 ผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน

ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าความผันผวนของแมกนีไทเซชัน

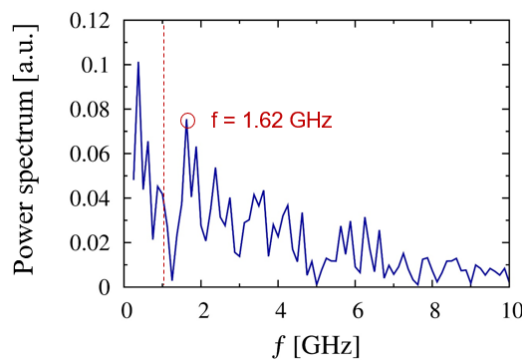
ในแนวแกน x จะมีค่าแปรผกผันกับค่าสนามฮาร์ดไดโอส เนื่องจากผลของสนามฮาร์ดไดโอสออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระพยายามเอาชนะผลของสนามความร้อน ซึ่งส่งผลให้ความผันผวนของแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบเดียวกับสนามฮาร์ดไดโอสมีค่าลดลง ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.16 (ก) ในขณะที่ความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในองค์ประกอบ y และ z จะมีค่าขึ้นอยู่กับผลของสนามความร้อนดังแสดงตามภาพประกอบ 6.16 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



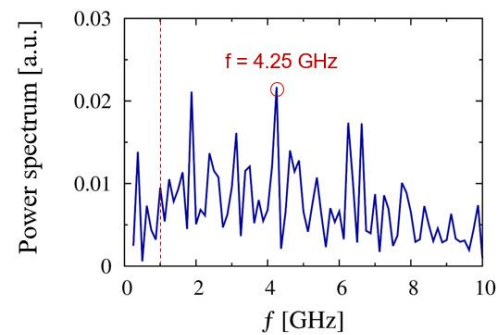
ภาพประกอบ 6.16 ผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ (ก) แกน x (ข) แกน y และ (ค) แกน z

จากการพิจารณาผลของสนามฮาร์ดไดโอสที่มีต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในชั้นอิสระ โดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (fast fourier transform, FFT) สำหรับแปลงพลวัตของแมกนีไทเซชันเพื่อแสดงค่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ จากการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในช่วง 2 – 10 นาโนวินาที ผลการคำนวณสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนจากการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ทำการป้อนสนามฮาร์ดไดโอส

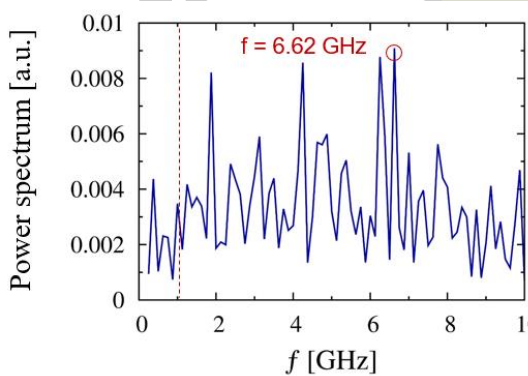
โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแสดงลักษณะของค่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำ $1/f$ ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 กิโลเฮิร์ต ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.17 (ก) เนื่องจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นจากสนามความร้อน โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ผ่านมา [242], [261] อย่างไรก็ตามเมื่อค่าสนามฮาร์ดไดรฟ์มีค่าเพิ่มขึ้นจะไม่มีลักษณะของค่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กฮาร์ดไดรฟ์พยายามเอาชนะผลของสนามความร้อนและทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น [241]–[243],[245] นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาพีคของสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนพบว่า ค่าความถี่ของพีคสเปกตรัมมีค่าแปรผันตรงกับควมแรงของสนามฮาร์ดไดรฟ์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.62 เป็น 6.62 กิโลเฮิร์ต เมื่อสนามฮาร์ดไดรฟ์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.5 เทสลา ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.17 (ก)–(ง) เนื่องจากผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์จะออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันและทำให้แมกนีไทเซชันมีมุมในการเคลื่อนที่รอบสนามประสิทธิผลมีค่าน้อยลง [188], [262]



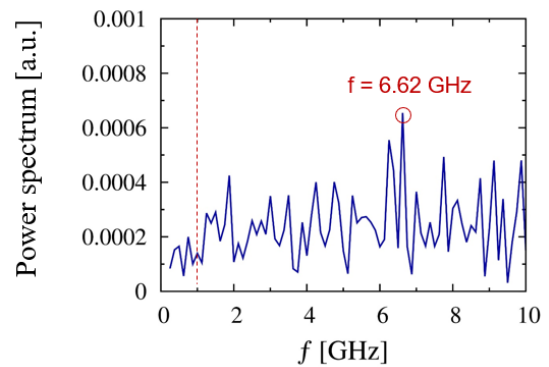
(ก)



(ข)



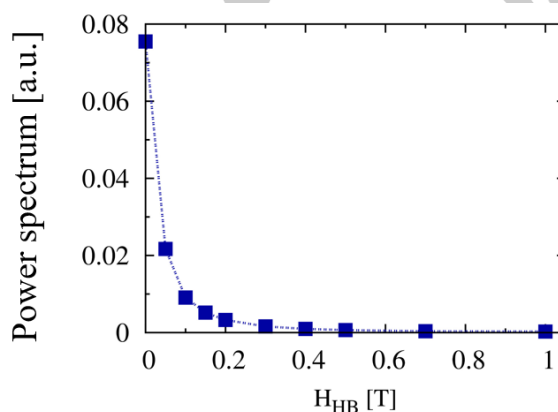
(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 6.17 สเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิต่ำ 50 เคลวินจากการป้อนสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.5 เทสลา

นอกจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลของสนามฮาร์ตไบอัสที่มีต่อพีคสเปคตัมของสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลพบว่า แอมพลิจูดของพีคของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงเมื่อค่าสนามฮาร์ตไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.18 เนื่องจากผลของสนามฮาร์ตไบอัสส่งผลให้ความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากสนามความร้อนมีค่าลดลง [245] โดยแอมพลิจูดของพีคของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงร้อยละ 99.7 เมื่อค่าสนามฮาร์ตไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 เทสลา



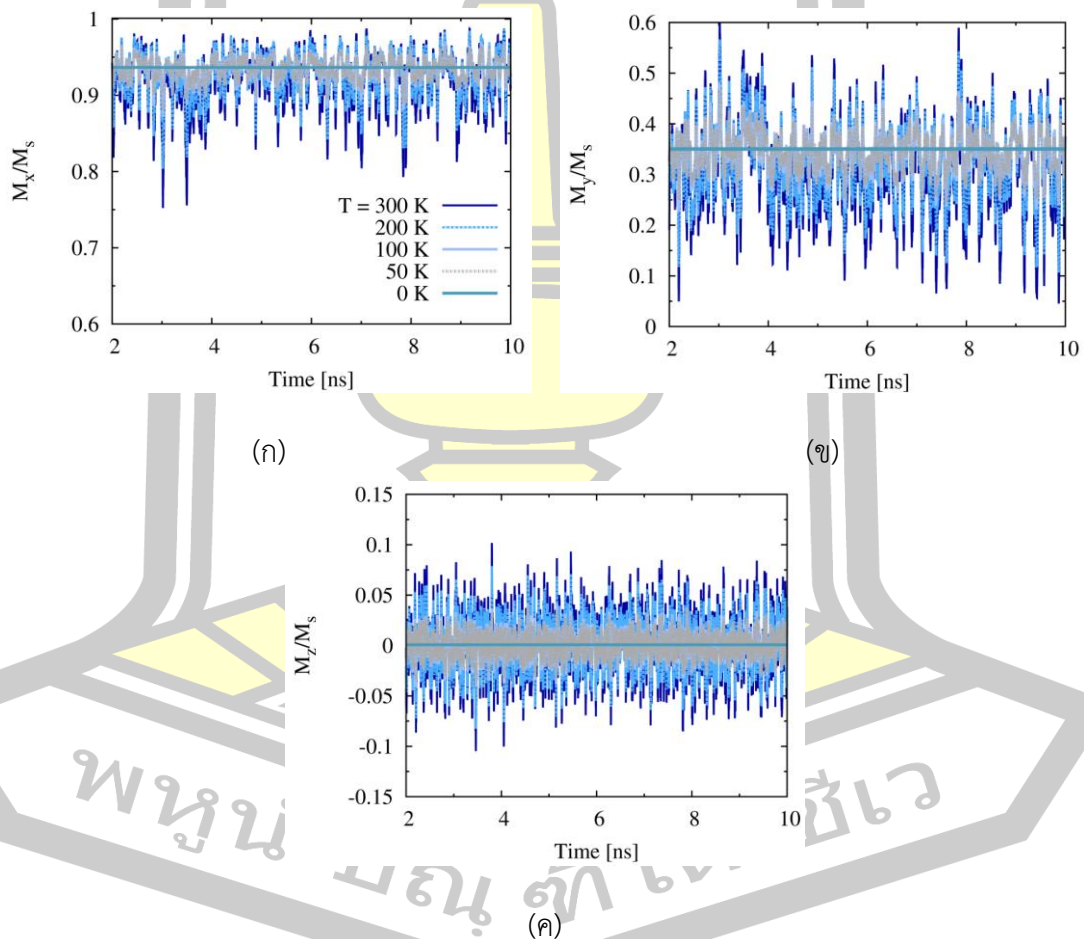
ภาพประกอบ 6.18 การเปลี่ยนแปลงของพีคสเปคตัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของสนามฮาร์ตไบอัส

จากผลการคำนวณข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัญญาณรบกวนภายในชั้นอิสระมีค่าขึ้นอยู่กับความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ โดยความถี่ของพีคสัญญาณรบกวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าแอมพลิจูดของค่าสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง เมื่อค่าสนามฮาร์ตไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของสนามฮาร์ตไบอัสออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันให้มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นและลดมุมมองของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความผันผวนของแมกนีไทเซชันส่งผลโดยตรงต่อค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของสนามความร้อนที่มีต่อสัญญาณรบกวนของหัวอ่านข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.4 การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อสัญญาณรบกวน

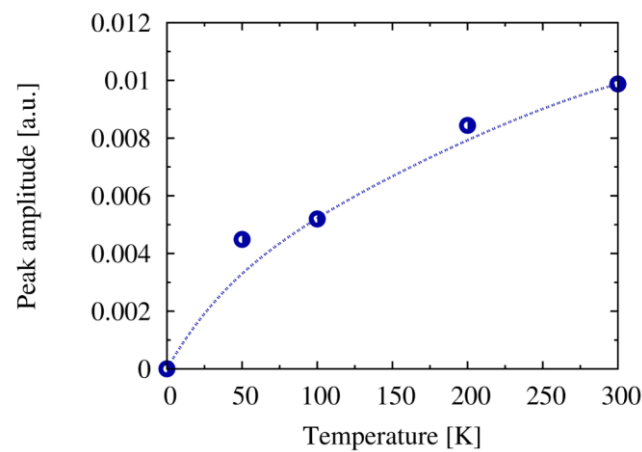
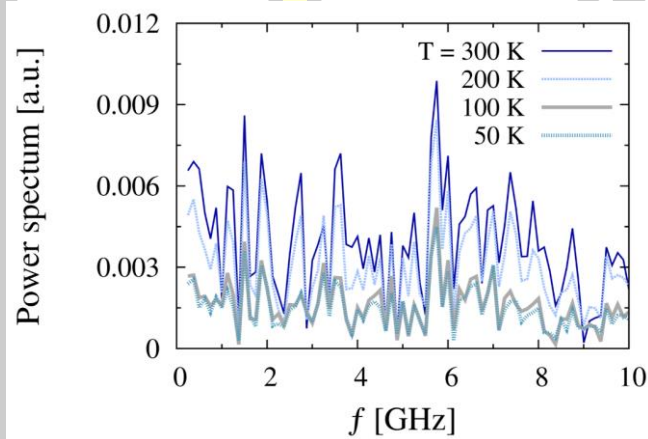
ความร้อนเป็นพลังงานพื้นฐานที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยผลของความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ สัญญาณการอ่านข้อมูลและการเพิ่มขึ้นของค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อสเปคตัมของค่าสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลง

พลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระของโครงสร้างสปินวาล์วที่พิจารณาผลของ SAF ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 0-300 เคลวิน จากการป้อนสนามฮาร์ดไดโอสเข้าสู่ชั้นอิสระเท่ากับ 0.1 เทสลาในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามฮาร์ดไดโอสดังแสดงตามภาพประกอบ 6.19 (ก) โดยที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน พลวัตของแมกนีไทเซชันจะมีค่าคงที่และจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามฮาร์ดไดโอส สนามสแตย์ สนามแลกเปลี่ยนและสนามแอนไอโซโทรปีที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความร้อนจะทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของแมกนีไทเซชันที่ออกนอกระนาบของสนามฮาร์ดไดโอสตามแนวแกน y และ z ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.19 (ข) - (ค) โดยความผันผวนของแมกนีไทเซชันจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิของระบบ



ภาพประกอบ 6.19 ผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ (ก) แกน x (ข) แกน y และ (ค) แกน z

จากการพิจารณาผลของความร้อนที่มีพลวัตของแมกนีไทเซชันของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูลที่เกิดจากผลของความร้อน ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.20 (ก) โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าพีคแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนมีเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิ ดังแสดงตามภาพประกอบ 6.20 (ข) เนื่องจากผลของสนามความร้อนทำให้ความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการศึกษาในเชิงการทดลองที่ผ่านมา [188]



ภาพประกอบ 6.20 (ก) ผลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนและ (ข) พีคสเปกตรัมของค่าสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

จากผลการศึกษาค่าสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสามารถสรุปได้ว่า ผลของความร้อนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันและค่าสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล โดยการเพิ่มค่าสนามฮาร์ดไดรฟ์จะทำให้ความผันผวนของแมกนีไทเซชันมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าสัญญาณรบกวนแมกนีไทม์มีค่าน้อยลงและความถี่ของฟลักแอมพลิจูดมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากผลของสนามฮาร์ดไดรฟ์จะออกแรงกระทำและเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล อย่างไรก็ตามการป้อนสนามฮาร์ดไดรฟ์ที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงออกจากแนวแกนของสนามไดรฟ์แลกเปลี่ยนและทำให้ความไวของการอ่านข้อมูลมีค่าลดลง



บทที่ 7

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและศึกษาคุณสมบัติภายในวัสดุ ปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR และประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทำการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลอง ในลำดับแรกได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลในเชิงทฤษฎี ด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ ผลของความร้อนและปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR และประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการศึกษาขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ผลของความร้อนและแรงดันไบอัสที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้ในเชิงอุตสาหกรรมและทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการศึกษาและอธิบายสาเหตุของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยผลการศึกษาดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญที่นำไปสู่การออกแบบและพัฒนาหัวอ่านข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลสูงในอนาคต ซึ่งผลการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

7.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปยังการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีจากการใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปิน เพื่ออธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของวัสดุและการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคู่สมมติภายในของวัสดุและปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลผ่านการพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR โดยในลำดับแรกจะทำการศึกษาคู่สมมติการส่งผ่านสปินของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของระยะสปินดีเฟสซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR เนื่องจากการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของค่าการสะสมสปินที่มีการเคลื่อนที่ออกจากระนาบของแมกนีไทเซชัน เมื่อทำการพิจารณาผลของสปินโพลาริเซชันของการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถของการเหนี่ยวนำทิศทางของกระแสสปินให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ พบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสปินโพลาริเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรฮอยเลอร์อัลลอยด์ซึ่งเป็น

วัสดุที่มีค่าสปินโพลาริเซชันที่สูงจะทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงกว่าการใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดอื่น นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาระยะเวลาการแพร่ของสปินของวัสดุ ซึ่งเป็นระยะที่สปินสามารถรักษาทิศทางก่อนการปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อจัดเรียงตัวที่สถานะสมดุลของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีระยะเวลาการแพร่ของสปินที่ต่ำจะทำให้กระแสสปินโพลาริเซชันจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางและมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุได้เร็วกว่าวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีระยะเวลาการแพร่ของสปินที่สูง ในขณะที่ค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแพร่ของสปินของชั้นสเปสเซอร์ เนื่องจกวัสดุนอนแมกเนตที่มีระยะเวลาการแพร่ของสปินที่สูงจะสามารถรักษาทิศทางของกระแสสปินโพลาริเซชันที่เคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสรระ

จากนั้นได้ศึกษาปัจจัยภายนอกต่างๆ ได้แก่ความหนาของบริเวณรอยต่อ ความหนาของชั้นอิสรระและชั้นสเปสเซอร์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่า RA และอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ผลการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันตรงกับความหนาของการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อ ถึงแม้ว่าการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วน MR โดยความหนาของบริเวณรอยต่อต้องมีค่าเหมาะสม เนื่องจากการผสมกันของอะตอมบริเวณรอยต่อที่มากเกินไปจะทำให้ชั้นสเปสเซอร์ไม่สามารถป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นพินและชั้นอิสรระได้ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลพบว่า ค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นอิสรระ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุ โดยค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าคงที่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามากกว่าระยะเวลาการแพร่ของสปินของวัสดุ เนื่องจกกระแสสปินทุกตัวจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางและมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ เมื่อทำการพิจารณาความหนาของชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผันกับกับความหนาของชั้นสเปสเซอร์ เนื่องจากการกลับทิศทางของกระแสโพลาริเซชันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นนอนแมกเนต ดังนั้นการออกแบบหัวอ่านข้อมูลที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีค่าสปินโพลาริเซชันที่สูงและระยะเวลาการแพร่ของสปินที่ต่ำจะทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำ ค่าอัตราส่วน MR ที่สูงและสามารถลดขนาดของชั้นฟิล์มที่ใช้ตรวจจับสัญญาณให้มีขนาดที่เล็กลง ในขณะที่วัสดุนอนแมกเนตที่ถูกใช้เป็นชั้นสเปสเซอร์จำเป็นต้องมีระยะเวลาการแพร่ของสปินที่สูง จะต้องมีความหนาที่บางพอที่จะทำให้กระแสสปินโพลาริเซชันสามารถรักษาทิศทางระหว่างการเคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสรระได้แต่ต้องสามารถป้องกันอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กได้

ในลำดับถัดมาเมื่อทำการพิจารณาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการแสดงค่าสัญญาณ การอ่านข้อมูลพบว่าค่า RA และค่า ΔRA มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของกระแสสปินมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการส่งผ่านสปินที่สูง ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านปรากฏการณ์สปินทอร์คจากกระแสสปินกระทำ กับแมกนีไทเซชัน ส่งผลให้แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระไม่สามารถจัดเรียงทิศทางขนาน และแบบตรงกันข้ามได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อพฤติกรรม การส่งผ่านสปินและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลแบบ CPP-GMR ผลการคำนวณพบว่าค่า ΔRA และค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้เกิด ความกวัดแกว่งของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้สปินจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัว เบี่ยงเบนออกจากแนวแกนง่ายของวัสดุและทำให้เกิดการลดลงของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน ของวัสดุ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่มีคุณสมบัติการส่งผ่านสปินและคุณสมบัติทาง แม่เหล็กที่มีเสถียรภาพทางความร้อนจะช่วยให้หัวอ่านข้อมูลยังคงมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่น่าเสนอ งานวิจัยนี้ได้ ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงการทดลองของหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้งาน ในภาคอุตสาหกรรม ผลการทดลองพบว่าขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลส่งผลให้ค่าความ ต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง เนื่องจากการลดลง ของพื้นที่การทะลุผ่านทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความหนาของ ชั้นสเปสเซอร์ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลพบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่าแปรผกผันกับ ความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้า โดยความหนาของชั้นสเปสเซอร์ควรมีค่ามากกว่า 0.5 นาโนเมตรเพื่อ ป้องกันอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการคำนวณ

จากนั้นทำการศึกษาผลของความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลที่มีต่อค่า อัตราส่วน MR พบว่าความร้อนทำให้ค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าลดลง เนื่องจากการแผ่ รังสีความร้อนจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูล ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดความ ผันผวน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน MR ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิมีแนวโน้มที่สอดคล้องเป็น อย่างดีกับผลการคำนวณ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อประสิทธิภาพการ ทำงานของหัวอ่านข้อมูล พบว่าค่าแรงดันไบอัสจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก และค่าอัตราส่วน MR เนื่องจากการส่งผ่านกระแสสปินที่สูงทำให้เกิดแรงบิดสปินจากกระแสสปิน โพลาริซกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กอิสระ ซึ่งทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระมี

แนวโน้มการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนออกจากทิศทางขนานและตรงกันข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าผลของแรงดันไบอัสทำให้เกิดการเลื่อนออกของค่าอัตราส่วน MR สูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นจากความไม่สมมาตรของกำแพงการทะลุผ่าน เนื่องจากการผสมกันของอะตอมในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเน็ต ในลำดับสุดท้ายได้ทำการศึกษาผลรวมของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลและแรงดันไบอัสที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าแปรผกผันกับผลของค่าแรงดันไบอัสและความร้อน โดยในกรณีที่ค่าแรงดันไบอัสมีค่าต่ำผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทำความร้อนของหัวอ่านข้อมูลจะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูล เมื่อทำการเพิ่มการป้อนแรงดันไบอัสเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล ผลของแรงดันไบอัสจะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของค่าอัตราส่วน MR

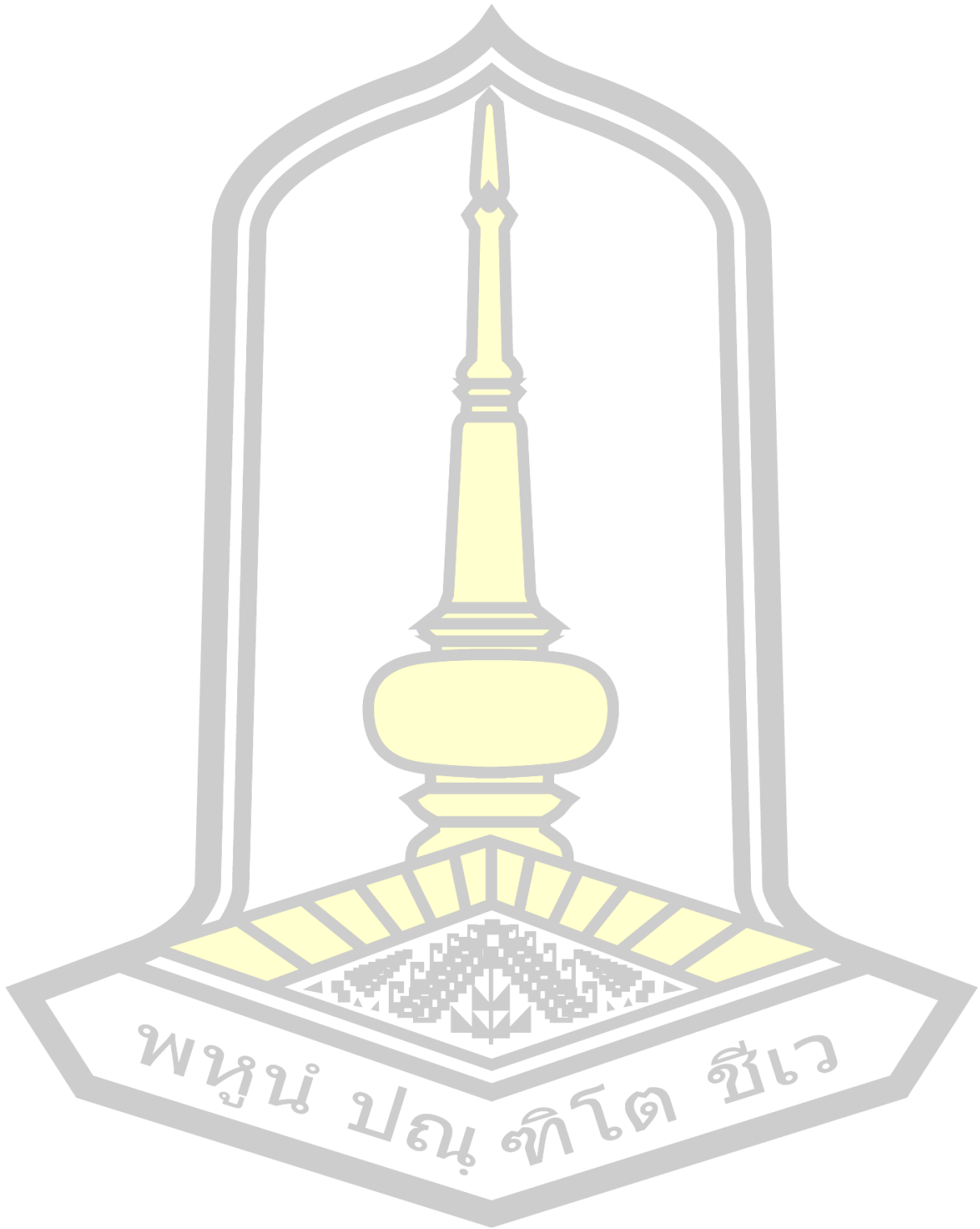
ในลำดับสุดท้ายได้ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับการพิจารณาสัญญาณรบกวนภายในหัวอ่านข้อมูล จากการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสนามคู่ขั้วภายในโครงสร้างสปีนวอลล์ส่งผลโดยตรงต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ซึ่งการอาศัยโครงสร้าง SAF จะช่วยลดผลกระทบจากสนามสแตย์จากชั้นอ้างอิงที่กระทำกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างฟลักซ์ปิดทำให้เกิดการหักล้างของสนาม-สเตรียร์ระหว่างชั้นอ้างอิงและชั้นพิน ซึ่งส่งผลให้สนามสเตรียร์ที่กระทำต่อชั้นอิสระมีค่าน้อยลง จากนั้นเมื่อทำการพิจารณาผลสนามฮาร์ดไบอัสที่มีต่อสัญญาณรบกวนพบว่า ในกรณีที่ไม่ทำการป้อนสนามฮาร์ดไบอัส จะเกิดค่าสัญญาณรบกวน $1/f$ ในหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากผลของสนามความร้อนที่ส่งผลต่อความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ แต่เมื่อเพิ่มค่าสนามฮาร์ดไบอัสที่ค่าสูงขึ้นไปจะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยลงและแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณรบกวนจะเกิดที่ความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งกรณีที่สนามฮาร์ดไบอัสมีค่าสูงพอจะทำให้สัญญาณรบกวน $1/f$ หายไป นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อค่าสัญญาณรบกวนพบว่าแอมพลิจูดของค่าสัญญาณรบกวนมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิ เนื่องจากสนามความร้อนทำให้เกิดความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ ซึ่งการอาศัยสนามฮาร์ดไบอัสเพื่อควบคุมทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางสำหรับการลดความผันผวนของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากความร้อน อย่างไรก็ตามการใช้สนามฮาร์ดไบอัสที่มีความแรงสูงจะทำให้เกิดข้อจำกัดของความไวในการอ่านข้อมูลและการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิง ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลเช่นกัน

จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุและปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและสัญญาณรบกวนของหัวอ่านข้อมูลให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลองและผลการคำนวณของงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวทำให้สามารถเข้าใจและอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลสูงในอนาคตได้

7.2 ข้อเสนอแนะและหัวข้อวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองในระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการส่งผ่านสปินสำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการพิจารณาขนาดพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างสปินวาล์ว (ความกว้างและความสูง) ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตจึงควรพิจารณาการคำนวณขนาดความกว้างและความสูงของโครงสร้างสปินวาล์ว เพื่อใช้ในการศึกษาการออกแบบหัวอ่านข้อมูลขนาดเล็กสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลที่สูงในอนาคต นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยชั้นพิน ชั้นสเปสเซอร์และชั้นอิสระ ซึ่งเป็นโครงสร้างอย่างง่ายของเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามการศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของหัวอ่านข้อมูลในอนาคตควรพิจารณาผลของชั้นแอนติเฟอร์โร โครงสร้าง SAF ความแรงของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอ้างอิงเพื่อความเสมือนจริงของแบบจำลองสำหรับการศึกษาค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล ในลำดับสุดท้ายคือการศึกษาสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยพื้นฐานได้แก่ ค่าสนามฮาร์ดไบอัสและความร้อนที่มีต่อค่าสัญญาณรบกวน ดังนั้นสำหรับการวิจัยในอนาคตควรทำการพิจารณาผลของสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน RKKY ที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและชั้นอ้างอิง ความหนาของชั้นฟิล์ม ความหนาแน่นของกระแสสปินที่ทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากปรากฏการณ์สปินทอร์ค สำหรับการพิจารณาและอธิบายสาเหตุของการเกิดค่าสัญญาณรบกวนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] S. M. Thompson, "The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 9, 2008.
- [2] P. A Grünberg, "Nobel Lecture: From spin waves to giant magnetoresistance and beyond," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 80, p. 1531, 2008.
- [3] S. Ikeda, *et al.*, "Magnetic tunnel junctions for spintronic memories and beyond," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 5, pp. 991–1002, 2007.
- [4] E. Chen, *et al.*, "Advances and future prospects of spin-transfer torque random access memory," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 1873–1878, 2010.
- [5] Z. Diao, *et al.*, "Spin-transfer torque switching in magnetic tunnel junctions and spin-transfer torque random access memory," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 19, no. 16, pp. 1–13, 2007.
- [6] S. Parkin and S. H. Yang, "Memory on the racetrack," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 3, pp. 195–198, 2015.
- [7] S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas, "Magnetic Domain-wall Racetrack Memory," *Science*, vol. 320, no. 5873, pp. 190–194, 2008.
- [8] C. Blaas, *et al.*, "Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves," *Phys. Rev. B*, vol. 65, p. 134427, 2002.
- [9] M. R. Sears and W. M. Saslow, "Spin accumulation at ferromagnet/nonmagnetic material interfaces," *Phys. Rev. B* vol. 85 no.1 p. 014404, 2012.
- [10] J. Chureemart, *et al.*, "Multiscale modeling of spin transport across a diffuse interface," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 443, pp. 287–292, 2017.
- [11] N. Saenphum, *et al.*, "Model of spin transport in noncollinear magnetic systems: Effect of diffuse interfaces," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 484, pp. 238–244, 2019.
- [12] A. Hirohata and K. Takanashi, "Future perspectives for spintronic devices," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 19, 2014.
- [13] K. Nikolaev, *et al.*, "'all-Heusler alloy' current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 22, pp. 108–111, 2009.
- [14] T. Nakatani, *et al.*, "Advanced CPP-GMR Spin-Valve Sensors for Narrow Reader Applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 2, 2018.
- [15] K. Vamsee, "Solid State Drive vs. Hard Disk Drive: Price and Performance Study," *Dell Power Vault Storage Syst.*, pp. 1–13, 2011.
- [16] "The Future of SSDs and HDDs in Data Centers." [Online]. Available: <https://www.backblaze.com/blog/hdd-vs-ssd-in-data-centers/?highlight=ssd>.

[Accessed: 11-Dec-2019].

- [17] Z. Liu, *et al.*, “Thermal switching probability distribution of $L_{10}FePt$ for heat assisted magnetic recording,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 18, 2017.
- [18] S. N. Piramanayagam, “Perpendicular recording media for hard disk drives,” *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 1, pp. 2, 2007.
- [19] M. Takagishi, *et al.*, “Magnetoresistance Ratio and Resistance Area Design of CPP-MR Film for 2–5 Tb/in² Read Sensors,” *Magn. IEEE Trans.*, vol. 46, no. 6, pp. 2086–2089, 2010.
- [20] T. R. Albrecht *et al.*, “Bit-patterned magnetic recording: Theory, media fabrication, and recording performance,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 5, pp. 1–42, 2015.
- [21] “Perpendicular Recording.” [Online]. Available: <https://www.aps.org/units/gmag/gallery/images/c5.jpg>.
- [22] M. Julliere, “Tunneling between ferromagnetic films,” *Phys. Lett. A*, vol. 54, no. 3, pp. 225–226, 1975.
- [23] G. Binasch, *et al.*, “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange,” *Phys. Rev. B*, vol. 39, p. 4828, 1989.
- [24] M. N. Baibich *et al.*, “Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 21, pp. 2472–2475, 1988.
- [25] P. M. Levy, *et al.*, “Theory of magnetic superlattices: Interlayer exchange coupling and magnetoresistance of transition metal structures (invited),” *J. Appl. Phys.*, vol. 67, no. 9, pp. 5914–5919, 1990.
- [26] A. Barthelemy and A. Fert, “Theory of the magnetoresistance in magnetic multilayer: Analytical expressions from a semiclassical approach,” *Phys. Rev. B*, vol. 43, no. 16, pp. 124–129, 1991.
- [27] P. M. Levy, S. Zhang, and A. Fert, “Electrical conductivity of magnetic multilayered structures,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 65, no. 13, pp. 1643–1646, 1990.
- [28] J. H. Wu, *et al.*, “Theory of giant magnetoresistance effects in Fe/Cr multilayers: Spin-dependent scattering from impurities,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 53, no. 14, pp. 9471–9472, 1996.
- [29] A. S. Edelstein, *et al.*, “Interlayer coupling in Co/Cu/permalloy/Cu multilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 9, pp. 4848–4854, 1998.
- [30] P. Baumgart, *et al.*, “The role of spin-dependent impurity scattering in Fe/Cr giant magnetoresistance multilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 69, no. 8, pp. 4792–4794, 1991.

- [31] W. P. Pratt, *et al.*, "Perpendicular giant magnetoresistances of Ag/Co multilayers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, no. 23, pp. 3060–3063, 1991.
- [32] S. S. P. Parkin, Z. G. Li, and D. J. Smith, "Giant magnetoresistance in antiferromagnetic Co/Cu multilayers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 23, pp. 2710–2712, Jun. 1991.
- [33] S. Maat and A.C. Marley, "Physics and Design of Hard Disk Drive Magnetic Recording Read Heads," *Handbook. Spintronics.*, pp. 977–1028, 2013.
- [34] D. Wang, *et al.*, "70% TMR at room temperature for SDT sandwich junctions with CoFeB as free and reference layers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 4, pp. 2269–2271, 2004.
- [35] J. Mathon and A. Umerski, "Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe (001) junction," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 63, no. 22, pp. 1–4, 2001.
- [36] W. H. Butler, *et al.*, "Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 63, no. 5, pp. 544161–5441612, 2001.
- [37] S. H. Parkin, *et al.*, "Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers," *Nat. Mater.*, vol. 3, no. 12, p. 862, 2004.
- [38] M. Yoshikawa, *et al.*, "Tunnel magnetoresistance over 100% in MgO-based magnetic tunnel junction films with perpendicular magnetic L1₀-FePt electrodes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 2573–2576, 2008.
- [39] T. Ishikawa, *et al.*, "Spin-dependent tunneling characteristics of fully epitaxial magnetic tunneling junctions with a full-Heusler alloy Co₂MnSi thin film and a MgO tunnel barrier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 19, pp. 192505, 2006.
- [40] S. Yuasa, *et al.*, "Giant tunneling magnetoresistance up to 410% at room temperature in fully epitaxial Co/MgO/Co magnetic tunnel junctions with bcc Co(001) electrodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 4, pp. 042505, 2006.
- [41] Y. M. Lee, *et al.*, "Effect of electrode composition on the tunnel magnetoresistance of pseudo-spin-valve magnetic tunnel junction with a MgO tunnel barrier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 21, pp. 212507, 2007.
- [42] J. Hayakawa, *et al.*, "Effect of high annealing temperature on giant tunnel magnetoresistance ratio of CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 23, pp. 232510, 2006.
- [43] D. D. Djayaprawira, *et al.*, "230 % room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions," vol. 86, no. 9, pp. 092502, 2005.

- [44] S. Ikeda, *et al.*, “Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 8, pp. 082508, 2008.
- [45] D. Weller, *et al.*, “Review Article: FePt heat assisted magnetic recording media,” *J. Vac. Sci. Technol. B, Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.*, vol. 34, no. 6, pp. 060801, 2016.
- [46] C. Vogler, *et al.*, “Heat-assisted magnetic recording of bit-patterned media beyond 10 Tb/in²,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 10, 2016.
- [47] D. Weller, *et al.*, “L₁₀FePt_{x-y} media for heat-assisted magnetic recording,” *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 210, no. 7, pp. 1245–1260, 2013.
- [48] J. Zhu and Y. Wang, “Torque oscillator with switchable perpendicular electrodes,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 751–757, 2010.
- [49] S. Okamoto, *et al.*, “Microwave assisted magnetic recording technologies and related physics,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 35, 2015.
- [50] Z. Liu, *et al.*, “Systematic evaluation of microwave-assisted magnetic recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018.
- [51] K. Nagasaka, “CPP-GMR technology for magnetic read heads of future high-density recording systems,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 6, pp. 508–511, 2009.
- [52] G. Han, *et al.*, “Perspectives of Read Head Technology for 10 Tb/in² Recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, 2010.
- [53] A. Hirohata, *et al.*, “Perpendicular magnetic anisotropy in Heusler alloy films and their magnetoresistive junctions,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2018.
- [54] T. Valet and A. Fert, “Classical theory of perpendicular giant magnetoresistance in magnetic multilayers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 121, no. 1–3, pp. 378–382, 1993.
- [55] S. Li, *et al.*, “Characteristics of reverse overwrite process in shingled recording scheme at ultra-high track density,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 3, pp. 252–259, 2012.
- [56] J. Bass, “CPP magnetoresistance of magnetic multilayers: A critical review,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 408, pp. 244–320, 2016.
- [57] M. Jergel, *et al.*, “Behavior of giant magnetoresistance in Co-Cu-Co pseudo spin-valves after magnetic annealing,” *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 1, pp. 667–673, 2011.
- [58] K. W. Cheng, *et al.*, “Compensation between magnetoresistance and switching

- current in Co/Cu/Co spin valve pillar structure,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 9, pp. 10–13, 2010.
- [59] W. E. Bailey, *et al.*, “Experimental separability of channeling giant magnetoresistance in Co/Cu/Co,” *Phys. Rev. B*, vol. 72, no. 1, p. 012409, 2005.
- [60] X. T. Tang, G. C. Wang, and M. Shima, “Layer thickness dependence of CPP giant magnetoresistance in individual CoNi/Cu multilayer nanowires grown by electrodeposition,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 75, no. 13, pp. 134404, 2007.
- [61] A. Tekgül, M. Alper, and H. Kockar, “Magnetoresistance behaviour in CoFe/Cu multilayers: thin Cu layer effect,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 27, no. 10, pp. 10059–10064, 2016.
- [62] H. Kuru, H. Kockar, and M. Alper, “Giant magnetoresistance (GMR) behavior of electrodeposited NiFe/Cu multilayers: Dependence of non-magnetic and magnetic layer thicknesses,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 444, pp. 132–139, 2017.
- [63] P. Shakya, B. Cox, and D. Davis, “Giant Magnetoresistance and Coercivity of electrodeposited multilayered FeCoNi/Cu and CrFeCoNi/Cu,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 4, pp. 453–459, 2012.
- [64] S. Li, *et al.*, “Enhanced current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance by improvement of atomic order of Co₂FeSi Heusler alloy film through Ag doping,” *AIP Adv.*, vol. 8, no. 7, pp. 075230, 2018.
- [65] T. Shiroyama, *et al.*, “High magnetic field sensitivity in anti-ferromagnetically coupled 001-epitaxial [Co₂Fe(Al_{0.5}Si_{0.5})/Ag]_N multilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 124, no. 16, pp. 163910, 2018.
- [66] Z. Wen, *et al.*, “Dual-spacer nanojunctions exhibiting large current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance for ultrahigh density magnetic recording,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 10, 2017.
- [67] T. Kubota, *et al.*, “Current perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using an L₁₂Ag₃Mg spacer and Co₂Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si Heusler alloy electrodes: Spacer thickness and annealing temperature dependence,” *Phys. Rev. Mater.*, vol. 1, no. 4, p. 044402, 2017.
- [68] S. Kasai *et al.*, “Large magnetoresistance in Heusler-alloy-based epitaxial magnetic junctions with semiconducting Cu(In_{0.8}Ga_{0.2})Se₂ spacer,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, no. 3, pp. 032409, 2016.
- [69] S. Li, *et al.*, “Enhancement of giant magnetoresistance by L₂₁ ordering in Co₂Fe(Ge_{0.5}Ga_{0.5}) Heusler alloy current-perpendicular-to-plane pseudo spin

- valves,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 4, pp. 42404–42405, 2013.
- [70] T. M. Nakatani, *et al.*, “Bulk and interfacial scatterings in current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance with $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})$ Heusler alloy layers and Ag spacer,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 21, pp. 94–97, 2010.
- [71] D. Tripathy and A. O. Adeyeye, “Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in half-metallic pseudo-spin-valve structures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, pp. 18–21, 2008.
- [72] Y. Sakuraba, *et al.*, “Mechanism of large magnetoresistance in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ devices with current perpendicular to the plane,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 82, no. 9, pp. 094444, 2010.
- [73] T. Furubayashi, *et al.*, “Temperature dependence of magnetoresistive output of pseudo spin valves with $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)$ Heusler alloys and a Ag spacer,” *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 12, 2013.
- [74] C. Abert, *et al.*, “A three-dimensional spin-diffusion model for micromagnetics,” *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–11, 2015.
- [75] T. Taniguchi, *et al.*, “Effect of the number of layers on determination of spin asymmetries in current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 4, pp. 042503, 2011.
- [76] P. Chureemart, *et al.*, “Modeling spin injection across diffuse interfaces,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 87, no. 19, pp. 195310, 2013.
- [77] P. Chureemart, “Models of Spin Torque using Self-Consistent Solutions of the Magnetisation and Spin Accumulation, The University of York, 2013.
- [78] S. G. Tan, *et al.*, “Theoretical modeling of half-metallic current-perpendicular-to-plane spin valves,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 9, pp. 09J502, 2007.
- [79] Z. Bai, *et al.*, “High-performance giant-magnetoresistance junctions based on the all-Heusler architecture with matched energy bands and Fermi surfaces,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 15, pp. 152403, 2013.
- [80] Z. Q. Bai, *et al.*, “Transport properties of high-performance all-Heusler $\text{Co}_2\text{CrSi}/\text{Cu}_2\text{CrAl}/\text{Co}_2\text{CrSi}$ giant magnetoresistance device,” *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 9, 2012.
- [81] P. Khunkitti, *et al.*, “Playback signal distortion in CPP-GMR read heads due to induced electromagnetic interference,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 465, pp. 14–18, 2018.
- [82] H. B. Huang, *et al.*, “Micromagnetic simulation of spin-transfer switching in a full-Heusler $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ alloy spin-valve nanopillar,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 3, pp. 033913, 2011.

- [83] J. W. Jung, *et al.*, “Investigations of interface spin asymmetry and interfacial resistance in $\text{Fe}_x\text{Co}_{100-x}/\text{Ag}$ interface,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 17, 2015.
- [84] N. Smith, *et al.*, “Angular dependence of spin torque critical currents for CPP-GMR read heads,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp. 2935–2940, 2005.
- [85] C. Wang, *et al.*, “A modified theoretical model on tunnelling giant magnetoresistance of granular films,” *Phys. Lett. A*, vol. 329, pp. 236–243, 2004.
- [86] P. Weinberger and L. Szunyogh, “Ab initio characterization of the giant magnetoresistance in realistic spin valves,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 66, no. 14, pp. 144427, 2002.
- [87] J. Grollier, *et al.*, “Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars,” *aip.scitation.org*, vol. 78, pp. 3663–3665, 2001.
- [88] I. Bakonyi, *et al.*, “Giant magnetoresistance in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers: Origin of the absence of oscillatory behavior,” *Phys. Rev. B*, vol. 79, pp. 174421, 2009.
- [89] M. Grünewald, *et al.*, “Tunneling anisotropic magnetoresistance in organic spin valves,” *Phys. Rev. B*, vol. 84, pp. 125208, 2011.
- [90] K. J. Dieny, *et al.*, *Introduction to magnetic random-access memory*. John Wiley & Sons, 2016.
- [91] S. Bandyopadhyay and M. Cahay, *Introduction to spintronics*. CRC press, 2015.
- [92] พรรณวดี จุรีมาศ, *แบบจำลองระดับอะตอมของวัสดุแม่เหล็ก Atomistic Modelling of Magnetic Materials*. 2017.
- [93] D. D. A. and J. N. Yongbing Xu, *Handbook of Spintronics*. Springer Netherlands, 2016.
- [94] K. Aruga, *et al.*, “A study on positioning error caused by flow induced vibration using helium-filled hard disk drives,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 9, pp. 3750–3755, 2007.
- [95] “BASIC STRUCTURES AND OPERATIONS OF A HARD DISK DRIVE | TOP GADGET INFO.” [Online]. Available: <https://www.topgadgetinfo.com/basic-structures-and-operations-of-a-hard-drive/>. [Accessed: 14-Jan-2020].
- [96] “Longitudinal Recording.” [Online]. Available: <https://www.aps.org/units/gmag/gallery/images/c4.jpg>.
- [97] R. Wu, *et al.*, “Temperature dependence of exchange bias and training effect in Co/CoO film with induced uniaxial anisotropy,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 48, no. 27, 2015.
- [98] B. Marchon, *et al.*, “The Head-Disk Interface Roadmap to an Areal Density of 4

- Tbit/in²,” *Adv. Tribol.*, vol. 2013, 2013.
- [99] E. E. Fullerton and J. R. Childress, “Spintronics, Magnetoresistive Heads, and the Emergence of the Digital World,” *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 10, pp. 1787–1795, 2016.
- [100] T. C. Chong, *et al.*, “Perspectives for 10 terabits/in² magnetic recording,” *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 11, no. 3, pp. 2704–2709, 2011.
- [101] G. C. Han, *et al.*, “Feasibility of differential dual spin valve for 10 Tb/in²,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 1432–1435, 2010.
- [102] N. F. Mott and H. H. Wills, “The Electrical Conductivity of the Transition Metals,” *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 167, no. 931, pp. 580–593, 1938.
- [103] N. F. Mott and H. H. Wills, “The Resistance and Thermoelectric Properties of the Transition Metals,” vol. 54, no. 1929, pp. 368–382, 1936.
- [104] E. Y. Tsymbal and D. G. Pettifor, “Perspectives of giant magnetoresistance,” *Solid State Phys. - Adv. Res. Appl.*, vol. 56, pp. 113–237, 2001.
- [105] T. Miyazaki and N. Tezuka, “Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 139, no. 3, pp. 94–97, 1995.
- [106] J. S. Moodera, *et al.*, “Large magnetoresistance at room temperature in ferromagnetic thin film tunnel junctions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, no. 16, pp. 3273–3276, 1995.
- [107] S. Yuasa and D. D. Djayaprawira, “Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline MgO(001) barrier,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 21, pp. 337–354, 2007.
- [108] J. W. Jung, *et al.*, “Enhancement of magnetoresistance by inserting thin NiAl layers at the interfaces in Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5}/Ag/Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5} current-perpendicular-to-plane pseudo spin valves,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 10, pp. 102408, 2016.
- [109] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, “ระบบการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล,” *การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม 3: การออกแบบวงจรภาครับขั้นสูง*, pp. 2–3, 2011.
- [110] H. M. Guchang Han, *et al.*, “Read Sensors for Greater than 1 Tb/in²,” in *Developments in Data Storage: Materials Perspective*, John Wiley & Sons, 2011, pp. 127–143.
- [111] N. Smith, *et al.*, “Thermal and spin-torque noise in CPP (TMR and/or GMR) read sensors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 2, pp. 114–119, 2006.
- [112] Y. K. Zheng, G. C. Han, and B. Liu, “Thermal magnetic noise control in the ultra-high-density read head,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 320, no. 22, pp.

- 2850–2853, 2008.
- [113] T. M. Nakatani, T. Furubayashi, and K. Hono, “Interfacial resistance and spin-dependent scattering in the current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})$ Heusler alloy and Ag,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, pp. 5–8, 2011.
- [114] Y. K. Takahashi *et al.*, “Large magnetoresistance in current-perpendicular-to-plane pseudospin valve using a $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ge}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})$ Heusler alloy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 15, pp. 152501, 2011.
- [115] H. S. Goripati, *et al.*, “Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ Heusler alloy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 4, pp. 043901, 2013.
- [116] E. S. Noh, *et al.*, “A theoretical study of a spin polarized transport and giant magnetoresistance: The effect of the number of layers in a magnetic multilayer,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 8, 2008.
- [117] A. G. Aronov, “Spin injection in metals and polarization of nuclei,” *Jetp Lett*, vol. 24, no. 1, pp. 32–34, 1976.
- [118] Y. Re, *et al.*, “Interfacial Charge-Spin Coupling: Injection and Detection of Spin Magnetization in Metals,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, no. 17, pp. 1790–1793, 1985.
- [119] F. A. T. and B. Jedema, F. J., “Electrical spin injection and accumulation at RT in an all-metal mesoscopic spin valve,” *Nature*, vol. 410, pp. 345–348, 2001.
- [120] T. Kimura, Y. Otani, and P. M. Levy, “Electrical control of the direction of spin accumulation,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, no. 16, pp. 166601, 2007.
- [121] K. R. Jeon *et al.*, “Electrical spin injection and accumulation in $\text{CoFe}/\text{MgO}/\text{Ge}$ contacts at room temperature,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 84, no. 16, pp. 165315, 2011.
- [122] N. Tombros, *et al.*, “Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature,” *Nature*, vol. 448, no. 7153, pp. 571–574, 2007.
- [123] M. Tran *et al.*, “Enhancement of the spin accumulation at the interface between a spin-polarized tunnel junction and a semiconductor,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 3, pp. 036601, 2009.
- [124] Y. Fukuma, *et al.*, “Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin precession in metallic lateral spin valves,” *Nat. Mater.*, vol. 10, no. 7, pp. 527–531, 2011.
- [125] G. van der Laan, “X Rays Expose Transient Spins,” *Physics (College. Park. Md.)*,

vol. 8, pp. 83, 2015.

- [126] F. J. Jedema, *et al.*, “Spin injection and spin accumulation in all-metal mesoscopic spin valves,” *Phys. Rev. B*, vol. 67, no. 8, pp. 085319, 2003.
- [127] S. Hershfield and H. L. Zhao, “Charge and spin transport through a metallic ferromagnetic-paramagnetic-ferromagnetic junction,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 56, no. 6, pp. 3296–3305, 1997.
- [128] S. Takahashi and S. Maekawa, “Spin current, spin accumulation and spin Hall effect,” *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 9, no. 1, pp. 014105, 2008.
- [129] A. Shpiro, P. M. Levy, and S. Zhang, “Self-consistent treatment of nonequilibrium spin torques in magnetic multilayers,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 67, no. 10, pp. 104430, 2003.
- [130] S. Zhang, P. M. Levy, and A. Fert, “Mechanisms of spin-polarized current-driven magnetization switching,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, no. 23, pp. 2366011–2366014, 2002.
- [131] P. M. Levy, “The role of spin accumulation in current-induced switching of magnetic layers, or the first 10-12s in a magnetic multilayer after the current is switched on,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 19, pp. 2448–2451, 2002.
- [132] P. Chureemart, I. D’Amico, and R. W. Chantrell, “Model of spin accumulation and spin torque in spatially varying magnetisation structures: limitations of the micromagnetic approach,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 27, no. 14, p. 146004, 2015.
- [133] C. A. Akosa, *et al.*, “Role of spin diffusion in current-induced domain wall motion for disordered ferromagnets,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 91, no. 9, pp. 094411, 2015.
- [134] C. Petitjean, D. Luc, and X. Waintal, “Unified Drift-Diffusion Theory for Transverse Spin Currents in Spin Valves, Domain Walls, and Other Textured Magnets,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 11, pp. 117204, 2012.
- [135] N. L. Chung, *et al.*, “Interfacial resistance and spin flip effects on the magnetoresistance of a current perpendicular to plane spin valve,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, pp. 07F308, 2008.
- [136] A. Fert and H. Jaffrès, “Conditions for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 64, no. 18, pp. 184420, 2001.
- [137] R. F. L. Evans, *et al.*, “Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials,” *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 26, no. 10, 2014.
- [138] V. S. Speriosu, *et al.*, “Role of interfacial mixing in giant magnetoresistance,”

- Phys. Rev. B*, vol. 47, no. 17, pp. 11579–11582, 1993.
- [139] L. Landau and E. Lifshitz, “On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies,” *Phys. Zeits. Sowjetunion*, vol. 8, no. 14, pp. 153–169, 1935.
- [140] T. L. Gilbert, “A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 6, pp. 3443–3449, 2004.
- [141] T. Nakatani, *et al.*, “Co-based Heusler alloys for CPP-GMR spin-valves with large magnetoresistive outputs,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, pp. 1751–1757, 2012.
- [142] T. Kimura, *et al.*, “Room-temperature generation of giant pure spin currents using epitaxial Co₂FeSi spin injectors,” *NPG Asia Mater.*, vol. 4, no. 3, pp. e13-5, 2012.
- [143] L. Berger, “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current,” *Phys. Rev. B*, vol. 54, no. 13, pp. 9353–9358, 1996.
- [144] J. C. Slonczewski, “Current-driven excitation of magnetic multilayers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 159, no. 1, pp. L1, 1996.
- [145] “Products.” [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/ISIProducts.htm>. [Accessed: 06-Jan-2020].
- [146] “QST-2002.” [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/QST-2002.htm>. [Accessed: 06-Jan-2020].
- [147] R. Wood, “Future hard disk drive systems,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 6, pp. 555–561, 2009.
- [148] Y. Tian and S. Yan, “Giant magnetoresistance: History, development and beyond,” *Sci. China Physics, Mech. Astron.*, vol. 56, no. 1, pp. 2–14, 2013.
- [149] P. Freitas, *et al.*, “Spin valve sensors,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 81, pp. 2–8, 2000.
- [150] A. Gupta, *et al.*, “Influence of nano-oxide layer on the giant magnetoresistance and exchange bias of NiMn/Co/Cu/Co spin valve sensors,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 9, pp. 093910, 2010.
- [151] N. Tezuka, *et al.*, “Perpendicular Magnetic Tunnel Junctions with Low Resistance-Area Product: High Output Voltage and Bias Dependence of Magnetoresistance,” *IEEE Magn. Lett.*, vol. 7, pp. 1–4, 2016.
- [152] S. S. P. Parkin, “Origin of enhanced magnetoresistance of magnetic multilayers: Spin-dependent scattering from magnetic interface states,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 10, pp. 1641–1644, 1993.
- [153] A. E. Berkowitz *et al.*, “Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co

- alloys,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 68, no. 25, pp. 3745–3748, 1992.
- [154] L. Wang, G. Han, and Y. Wu, “Thickness dependence of giant magnetoresistance in spin valves: Influence of interface and bulk scattering,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 2, pp. 506–509, 2007.
- [155] L. Wang, *et al.*, “Interface or bulk scattering in the semiclassical theory for spin valves,” *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 21, p. 214403, 2004.
- [156] X. Waintal, *et al.*, “Role of spin-dependent interface scattering in generating current-induced torques in magnetic multilayers,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 62, no. 18, pp. 12317–12327, 2000.
- [157] S. Zhang, P. M. Levy and A. Fert, “Mechanisms of spin-polarized current-driven magnetization switching,” *Phys. Rev. Lett.* vol. 88, no. 23, pp. 236601, 2002.
- [158] J. R. Childress, *et al.*, “Dual current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistive sensors for magnetic recording heads with reduced sensitivity to spin-torque-induced noise,” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8, pp. 8–11, 2006.
- [159] T. Qu and R. H. Victora, “Angular dependence of current perpendicular to plane giant magnetoresistance in multilayer nanowire,” *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 7, pp. 07C516, Apr. 2012.
- [160] F. Montaigne, C. Tiusan, and M. Hehn, “Angular dependence of tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions and specific aspects in spin-filtering devices,” *J. Appl. Phys.*, vol. 108, no. 6, pp. 063912, 2010.
- [161] S. Urazhdin, R. Loloee, and W. P. Pratt, “Spin transport at interfaces in magnetic multilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8, p. 08G504, 2006.
- [162] S. Urazhdin, R. Loloee, and W. P. Pratt, “Noncollinear spin transport in magnetic multilayers,” *Phys. Rev. B*, vol. 71, no. 10, pp. 100401, 2005.
- [163] J. Sato, *et al.*, “Large magnetoresistance effect in epitaxial $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ /Ag/ $\text{Co}_2\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Si}$ devices,” *Appl. Phys. Express*, vol. 4, no. 11, pp. 113005, 2011.
- [164] G. Zahnd, *et al.*, “Comparison of the use of NiFe and CoFe as electrodes for metallic lateral spin valves,” *Nanotechnology*, vol. 27, no. 3, pp. 035201, 2015.
- [165] A. Tekgül, M. Alper, and H. K. Magnetic, “Simple electrodepositing of CoFe/Cu multilayers: effect of ferromagnetic layer thicknesses,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 421, pp. 472–476, 2017.
- [166] B. Abderrahim, *et al.*, “Half-Metallic Magnetism of Quaternary Heusler Compounds $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$ ($x=0,0.5$, and 1.0): First-Principles Calculations,” *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 29, no. 2, pp. 277–283, 2016.
- [167] Y. Li, *et al.*, “High-performance giant-magnetoresistance junction with B2-disordered Heusler alloy based $\text{Co}_2\text{MnAl}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{MnAl}$ trilayer,” *J. Appl. Phys.*,

- vol. 118, no. 5, pp. 053902, 2015.
- [168] H. Yuasa, *et al.*, “Output enhancement of spin-valve giant magnetoresistance in current-perpendicular-to-plane geometry,” *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 5, pp. 2646–2650, 2002.
- [169] T. Abe, Y. Endo, and M. Yamaguchi, “Influence of resistance area product on the noise in a tunneling magnetoresistive read head,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 9, pp. 307, 2010.
- [170] Y. Endo, P. Fan, and M. Yamaguchi, “Effect of stripe height on the critical current density of spin-torque noise in a tunneling magnetoresistive read head with a low resistance area product below $1.0 \Omega\mu\text{m}^2$,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 17, pp. 17A922, 2015.
- [171] S. Kasai, *et al.*, “Large magnetoresistance in Heusler-alloy-based epitaxial magnetic junctions with semiconducting $\text{Cu}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Se}_2$ spacer,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, pp. 032409, 2016.
- [172] Y. Sakuraba, *et al.*, “Extensive study of giant magnetoresistance properties in half-metallic $\text{Co}_2(\text{Fe,Mn})\text{Si}$ -based devices,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 25, pp. 252408, 2012.
- [173] P. Klaer, *et al.*, “Element-specific magnetic moments and spin-resolved density of states in CoFeMnZ ($Z=\text{Al, Ga; Si, Ge}$),” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 84, no. 14, pp. 144413, 2011.
- [174] R. Shan, *et al.*, “Demonstration of half-metallicity in fermi-level-tuned heusler alloy $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ at room temperature,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 24, pp. 246601, 2009.
- [175] Ikhtiar, *et al.*, “Temperature dependence of magneto-transport properties in $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})/\text{Cu}$ lateral spin valves,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 6, pp. 062401, 2016.
- [176] T. Hamada, T. Ohno, and S. Maekawa, “First-principles study of electronic and magnetic structures of CoFeB|Ta and CoFe|TaB heterostructures,” *Mol. Phys.*, vol. 113, no. 3–4, pp. 314–318, 2015.
- [177] H. Sato, *et al.*, “Temperature-dependent properties of CoFeB/MgO thin films: Experiments versus simulations,” *Phys. Rev. B*, vol. 98, no. 21, pp. 214428, 2018.
- [178] H. L. Huang, J. C. Tung, and G. Y. Guo, “Anomalous Hall effect and current spin polarization in Co_2FeX Heusler compounds ($X= \text{Al, Ga, In, Si, Ge, and Sn}$): A systematic ab initio study,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 91, no. 13, pp. 134409, 2015.

- [179] Y. Shiokawa, *et al.*, “The dependence of nano-contact magnetoresistance on the bulk scattering spin asymmetry in CoFe alloys with oxidation impurities,” *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 053909, 2015.
- [180] G. Autès, J. Mathon, and A. Umerski, “Theory of tunneling magnetoresistance of Fe/GaAs/Fe(001) junctions,” *Phys. Rev. B*, vol. 82, no. 11, pp. 115212, 2010.
- [181] Y. Sakuraba, *et al.*, “CPP-GMR study of half-metallic full-Heusler compound $\text{Co}_2(\text{Fe,Mn})\text{Si}$,” *J. Magn. Soc. Japan*, vol. 38, no. 2–2, pp. 45–49, 2014.
- [182] C. Abert, *et al.*, “Field like and Damping like Spin-Transfer Torque in Magnetic Multilayers,” *Phys. Rev. Appl.*, vol. 7, no. 5, pp. 054007, 2017.
- [183] D. Tripathy and A. O. Adeyeye, “Giant magnetoresistance in half metallic Fe_3O_4 based spin valve structures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 9, pp. 10–13, 2007.
- [184] J. C. Read, *et al.*, “Current-perpendicular-to-the-plane giant magnetoresistance in spin-valves with AgSn alloy spacers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 4, pp. 043907, 2015.
- [185] H. Zhang, *et al.*, “Broadband mag-noise of patterned permalloy thin films,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2442–2445, 2010.
- [186] G. C. Han, *et al.*, “Self-biased differential dual spin valve readers for future magnetic recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 5, pp. 1770–1776, 2012.
- [187] J. G. Zhu, “Thermal magnetic noise and spectra in spin valve heads,” *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10, pp. 7273–7275, 2002.
- [188] N. Stutzke, S. L. Burkett, and S. E. Russek, “Temperature and field dependence of high-frequency magnetic noise in spin valve devices,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 1, pp. 91–93, 2003.
- [189] Z. Jin, H. N. Bertram, and V. Safonov, “Quasi-analytical calculation of thermal magnetization fluctuation noise in giant magnetoresistive sensors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 3, pp. 1712–1722, 2004.
- [190] N. Smith, P. Arnett, and S. Member, “Thermal Magnetization Noise in Spin Valves,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 1, pp. 32–37, 2002.
- [191] Y. K. Takahashi, *et al.*, “Structure and magnetoresistance of current-perpendicular-to-plane pseudo spin valves using $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ga}_{0.25}\text{Ge}_{0.75})$ Heusler alloy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 22, pp. 223901, 2013.
- [192] S. Krause, *et al.*, “Joule Heating and Spin-Transfer Torque Investigated on the Atomic Scale Using a Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscope,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, no. 18, pp. 186601, 2011.
- [193] M. B. A. Jalil, *et al.*, “Spin drift diffusion studies of magnetoresistance effects in current-perpendicular-to-plane spin valves with half-metallic insertions,” *Phys.*

- Rev. B*, vol. 73, no. 13, pp. 134417, 2006.
- [194] Y. Li, H. Chen, G. Wang, and H. Yuan, "Interface characteristics in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ trilayer," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 371, pp. 296–300, 2016.
- [195] T. M. Nakatani, *et al.*, "Structure, magnetic property, and spin polarization of $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ Heusler alloys," *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 3, pp. 033916, 2007.
- [196] "DOS of Co." [Online]. Available: <http://lamp.tu-graz.ac.at/~hadley/ss1/materials/dos/cobalt.html>.
- [197] "DOS of Cu." [Online]. Available: <http://lamp.tu-graz.ac.at/~hadley/ss1/problems/copper/Q.php>.
- [198] M. Zhu, C. L. Dennis, and R. D. McMichael, "Temperature dependence of magnetization drift velocity and current polarization in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ by spin-wave Doppler measurements," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 81, no. 14, pp. 140407, 2010.
- [199] E. Villamor, *et al.*, "Temperature dependence of spin polarization in ferromagnetic metals using lateral spin valves," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 88, no. 18, pp. 184411, 2013.
- [200] A. Fert, J. L. Duvail, and T. Valet, "Spin relaxation effects in the perpendicular magnetoresistance of magnetic multilayers," *Phys. Rev. B*, vol. 52, no. 9, pp. 6513–6521, 1995.
- [201] Y. F. and K. I. M. Isshiki, "Temperature dependence of the electrical resistivity of pure cobalt at low temperatures," *J. Phys. F Met. Phys.*, vol. 14, pp. 3007–3013, 1984.
- [202] T. Kimura, T. Sato, and Y. Otani, "Temperature evolution of spin relaxation in a NiFe/Cu lateral spin valve," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 6, pp. 066602, 2008.
- [203] J. T. Batley, *et al.*, "Spin relaxation through Kondo scattering in Cu/Py lateral spin valves," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 92, no. 22, pp. 220420, 2015.
- [204] H. Zou and Y. Ji, "The origin of high surface spin-flip rate in metallic nonlocal spin valves," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 8, 2012.
- [205] E. Villamor, *et al.*, "Contribution of defects to the spin relaxation in copper nanowires," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 87, no. 9, pp. 094417, 2013.
- [206] R. J. Elliott, "Theory of the effect of spin-Orbit coupling on magnetic resonance in some semiconductors," *Phys. Rev.*, vol. 96, no. 2, pp. 266–279, 1954.
- [207] Y. Yafet, "Spin-Orbit Induced Spin-Flip Scattering by a Local Moment," *J. Appl.*

- Phys.*, vol. 42, no. 4, pp. 1564–1565, 1971.
- [208] J. Bass and W. P. Pratt, “Spin-diffusion lengths in metals and alloys, and spin-flipping at metal/metal interfaces: An experimentalist’s critical review,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 19, no. 18, 2007.
- [209] V. Popescu, *et al.*, “Spin caloric transport from density-functional theory,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 7, 2019.
- [210] A. L. Wysocki, *et al.*, “First-principles analysis of spin-disorder resistivity of Fe and Ni,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 80, no. 22, pp. 224423, 2009.
- [211] R. Kováčik, *et al.*, “Spin-caloric transport properties of cobalt nanostructures: Spin disorder effects from first principles,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 89, no. 13, pp. 134417, 2014.
- [212] L. Ritchie, *et al.*, “Magnetic, structural, and transport properties of the Heusler alloys Co_2MnSi and NiMnSb ,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 68, no. 10, pp. 1–6, 2003.
- [213] R. F. L. Evans, U. Atxitia, and R. W. Chantrell, “Quantitative simulation of temperature-dependent magnetization dynamics and equilibrium properties of elemental ferromagnets,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 91, no. 14, pp. 144425, 2015.
- [214] C. N. T. Yu, *et al.*, “Exchange bias induced at a $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Cr}$ interface,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 12, 2017.
- [215] K. Kobayashi, *et al.*, “Phase separation and magnetic properties of half-metal-type $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ alloys,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 20, pp. 4684–4686, 2004.
- [216] Z. Wen, *et al.*, “Fully epitaxial C1 b -type NiMnSb half-Heusler alloy films for current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices with a Ag spacer,” *Sci. Rep.*, vol. 5, no. September, pp. 1–10, 2015.
- [217] B. Kwon, *et al.*, “Anisotropic magnetoresistance and current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in epitaxial NiMnSb -based multilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 2, 2016.
- [218] T. Furubayashi, *et al.*, “Structure and transport properties of current-perpendicular-to-plane spin valves using $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ and Co_2MnSi Heusler alloy electrodes,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 11, pp. 113917, 2010.
- [219] M. Gubbins *et al.*, “In situ electron holography of the dynamic magnetic field emanating from a hard-disk drive writer,” *Nano Res.*, vol. 8, pp. 1241–1249, 2015.

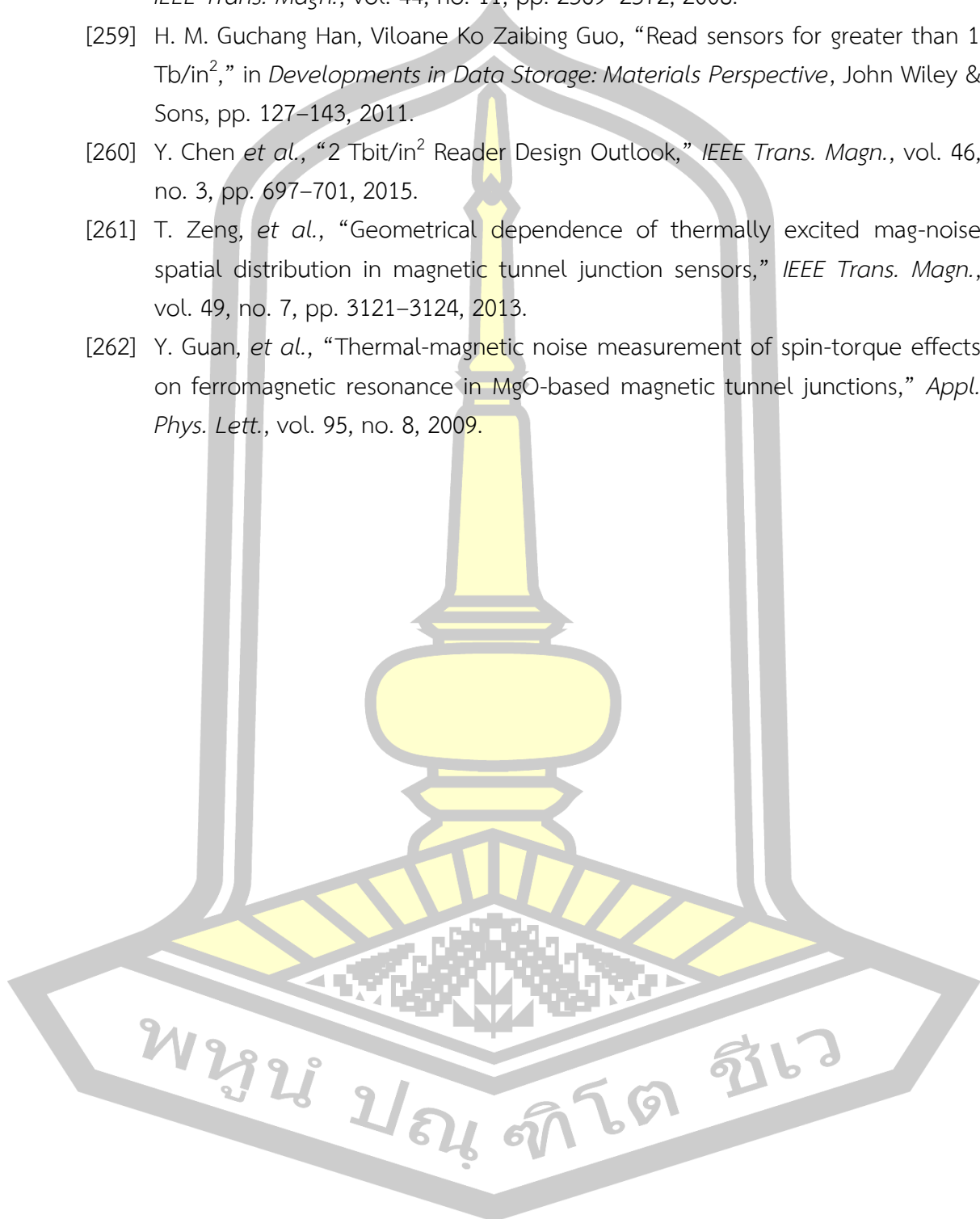
- [220] U. Boettcher, *et al.*, “Suppression of cross-track vibrations using a self-sensing micro-actuator in hard disk drives,” *Microsyst. Technol.*, vol. 18, no. 9–10, pp. 1309–1317, 2012.
- [221] “Faulty Hard Drive Read Write Heads.” [Online]. Available: <https://www.datlabsdatarecovery.co.uk/faulty-hard-drive-read-write-heads/>. [Accessed: 09-Jan-2020].
- [222] S. Mao *et al.*, “Commercial TMR heads for hard disk drives: Characterization and extendibility at 300 Gbit/in²,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 2, pp. 97–102, 2006.
- [223] J. R. Childress and R. E. Fontana, “Magnetic recording read head sensor technology,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 6, no. 9, pp. 997–1012, 2005.
- [224] C. L. Ong, *et al.*, “Additional reader noise in TDMR reader for ITI cancelation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, 2014.
- [225] Z. H. Zhang *et al.*, “The tunneling magnetoresistance current dependence on cross sectional area, angle and temperature,” *AIP Adv.*, vol. 5, no. 3, 2015.
- [226] W. Wang, H. Sukegawa, and K. Inomata, “Temperature dependence of tunneling magnetoresistance in epitaxial magnetic tunnel junctions using a Co₂FeAl Heusler alloy electrode,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 82, no. 9, pp. 80–83, 2010.
- [227] T. Marukame, *et al.*, “Giant oscillations in spin-dependent tunneling resistances as a function of barrier thickness in fully epitaxial magnetic tunnel junctions with a MgO barrier,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 81, no. 13, pp. 134432, 2010.
- [228] K. Tsunekawa, *et al.*, “Giant tunneling magnetoresistance effect in low-resistance CoFeB/MgO(001)/CoFeB magnetic tunnel junctions for read-head applications,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, no. 7, pp. 072503, 2005.
- [229] J. Hayakawa, *et al.*, “Dependence of giant tunnel magnetoresistance of sputtered CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions on MgO barrier thickness and annealing temperature,” *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 44, no. 16–19, 2005.
- [230] วรุฒิ บุญฤศิริ, “การส่งผ่านของสปินที่พิจารณาผลของอุณหภูมิในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแบบหลายชั้น,” มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2562.
- [231] Z. P. Niu, *et al.*, “Tunneling magnetoresistance of double-barrier magnetic tunnel junctions in sequential and coherent regimes,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 73, no. 1, pp. 014432, 2006.
- [232] B. Liu, *et al.*, “Low flying-height slider with high thermal actuation efficiency

- and small flying-height modulation caused by disk waviness,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 145–150, 2008.
- [233] U. Boettcher, *et al.*, “Dynamic flying height adjustment in hard disk drives through feedforward control,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 7, pp. 1823–1829, 2011.
- [234] T. Shiramatsu, *et al.*, “Drive Integration of Active Flying-Height Control Slider with Micro Thermal Actuator,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2513–2515, 2006.
- [235] A. Kalitsov, *et al.*, “Bias dependence of tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with asymmetric barriers,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 25, no. 49, 2013.
- [236] J. Okabayashi, *et al.*, “Temperature and bias-voltage dependences of tunneling magnetoresistance in (Ga,Mn)As-based double-barrier magnetic tunnel junctions,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, 2008.
- [237] M. Sato, H. Kikuchi, and K. Kobayashi, “Effects of interface oxidization in ferromagnetic tunnel junctions,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 2946–2948, 1999.
- [238] W. Oepts, *et al.*, “Asymmetric bias voltage dependence of the magnetoresistance of Co/Al₂O₃/Co magnetic tunnel junctions: Variation with the barrier oxidation time,” *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 12, pp. 8038–8045, 2001.
- [239] G. Feng, *et al.*, “Annealing of CoFeB/MgO based single and double barrier magnetic tunnel junctions: Tunnel magnetoresistance, bias dependence, and output voltage,” *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 3, 2009.
- [240] T. Nozaki, *et al.*, “Bias voltage effect on tunnel magnetoresistance in fully epitaxial MgO double-barrier magnetic tunnel junctions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 8, pp. 082501, 2005.
- [241] T. Zeng, *et al.*, “Edge effect on thermally excited mag-noise in magnetic tunnel junction sensors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 2831–2834, 2012.
- [242] Y. Zhou, “Thermally excited low frequency magnetic noise in CPP structure MR heads,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2187–2192, 2007.
- [243] Y. Zhou, “Thermally excited magnetic noise from pinned and reference layers in current perpendicular-to-plane structure magnetoresistive heads,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, 2008.
- [244] K. B. Klaassen, J. C. L. Van Peppen, and X. Xing, “Noise in magnetic tunnel junction devices,” *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 10 3, pp. 8573–8575, 2003.

- [245] G. C. Han, *et al.*, “Hard bias effect on magnetic noise in different types of tunnel magnetoresistive heads,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 3597–3600, 2008.
- [246] Z. Q. Lei, *et al.*, “Review of noise sources in magnetic tunnel junction sensors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 3, pp. 602–612, 2011.
- [247] J. Scola, *et al.*, “Noise in MgO barrier magnetic tunnel junctions with CoFeB electrodes: Influence of annealing temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 25, pp. 2007–2009, 2007.
- [248] S. H. Liou, *et al.*, “Dependence of noise in magnetic tunnel junction sensors on annealing field and temperature,” *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, pp. 07E902, 2008.
- [249] G. C. Han, *et al.*, “Magnetic field dependence of low frequency noise in tunnel magnetoresistance heads,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 9, p. 108, 2010.
- [250] L. Jiang *et al.*, “Low-frequency magnetic and resistance noise in magnetic tunnel junctions,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 69, no. 5, pp. 1–9, 2004.
- [251] A. Gokce, *et al.*, “ $1/f$ noise in magnetic tunnel junctions with MgO tunnel barriers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 8, 2006.
- [252] Z. Diao, *et al.*, “Reduced low frequency noise in electron beam evaporated MgO magnetic tunnel junctions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 20, pp. 202506, 2010.
- [253] W. F. Egelhoff, *et al.*, “Critical challenges for pico Tesla magnetic-tunnel-junction sensors,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 155, no. 2, pp. 217–225, 2009.
- [254] X. Liu, C. Ren, and G. Xiao, “Magnetic tunnel junction field sensors with hard-axis bias field,” *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 8, pp. 4722–4725, 2002.
- [255] T. Arakawa, *et al.*, “Low-frequency and shot noises in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunneling junctions,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 86, no. 22, pp. 1–9, 2012.
- [256] Z. H. Yuan, *et al.*, “Low frequency noise in magnetic tunneling junctions with Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Co_{70.5}Fe_{4.5}Si₁₅B₁₀ composite free layer,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 398, no. May, pp. 215–219, 2016.
- [257] E. R. Nowak, M. B. Weissman, and S. S. P. Parkin, “Electrical noise in hysteretic ferromagnet-insulator-ferromagnet tunnel junctions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 4, pp. 600–602, 1999.
- [258] J. M. Almeida, P. Wisniowski, and P. P. Freitas, “Low-frequency noise in MgO

magnetic tunnel junctions: Hooge's parameter dependence on bias voltage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 2569–2572, 2008.

- [259] H. M. Guchang Han, Viloane Ko Zaibing Guo, "Read sensors for greater than 1 Tb/in²," in *Developments in Data Storage: Materials Perspective*, John Wiley & Sons, pp. 127–143, 2011.
- [260] Y. Chen *et al.*, "2 Tbit/in² Reader Design Outlook," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 697–701, 2015.
- [261] T. Zeng, *et al.*, "Geometrical dependence of thermally excited mag-noise spatial distribution in magnetic tunnel junction sensors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 3121–3124, 2013.
- [262] Y. Guan, *et al.*, "Thermal-magnetic noise measurement of spin-torque effects on ferromagnetic resonance in MgO-based magnetic tunnel junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 8, 2009.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนาตยา แสนภูมิ
วันเกิด	วันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ.2534
สถานที่เกิด	ชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	376 หมู่ 2 บ้านโนนแดง ตำบลโนนแดง อำเภอบ้านเขว้า จังหวัดชัยภูมิ 36170
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านเขว้าวิทยายน อำเภอบ้านเขว้า จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบ้านเขว้าวิทยายน อำเภอบ้านเขว้า จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2563 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม
ทุนวิจัย	1. PhD studentship supported by Seagate Technology (Thailand) Ltd. (2014 - 2017) 2. Supported funding from The Industry-Academia Partnership Programme (IAPP) for exchange student programme MSU-UoY (York, UK) (2017) 3. Student travel grant from The IEEE Magnetic Society for attending Magnetic Summer School 2018 (Quito, Ecuador) 4. Best group presentation and best poster presentation awards in The Winter school at Seagate Thailand (2018) 5. Best oral presentation award in The Undergraduate and Graduate Students Presentation, Faculty of Science, Mahasarakham University (2019)

6. Best poster presentation award in Thailand Magnetic Conference (2019)

7. ทุนภูมิพล ระดับบัณฑิตศึกษาโดยประกอบพิธีมอบทุนการศึกษาในงานพระราชทานปริญญาบัตร ประจำปีการศึกษา 2562 จากกองทุนพัฒนามหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลงานวิจัย

1. Saenphum, N., Chureemart, J., Chantrell, R. W., & Chureemart, P. (2019). Model of spin transport in noncollinear magnetic systems: Effect of diffuse interfaces. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 484, 238-244.

2. Saenphum, N., Chureemart, J., & Chureemart, P. (2018). CPP-Giant Magnetoresistance Calculation in Spin Valve Structure. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว (Srinakharinwirot Science Journal)*, 34(2), 65-78.

