



แบบจำลองโครงสร้างแบบแกนกลางสำหรับการออกแบบองค์ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

วิทยานิพนธ์
ของ
วาสนา แดงอ่ำ

พหุ ภัณฑิโต สีเว

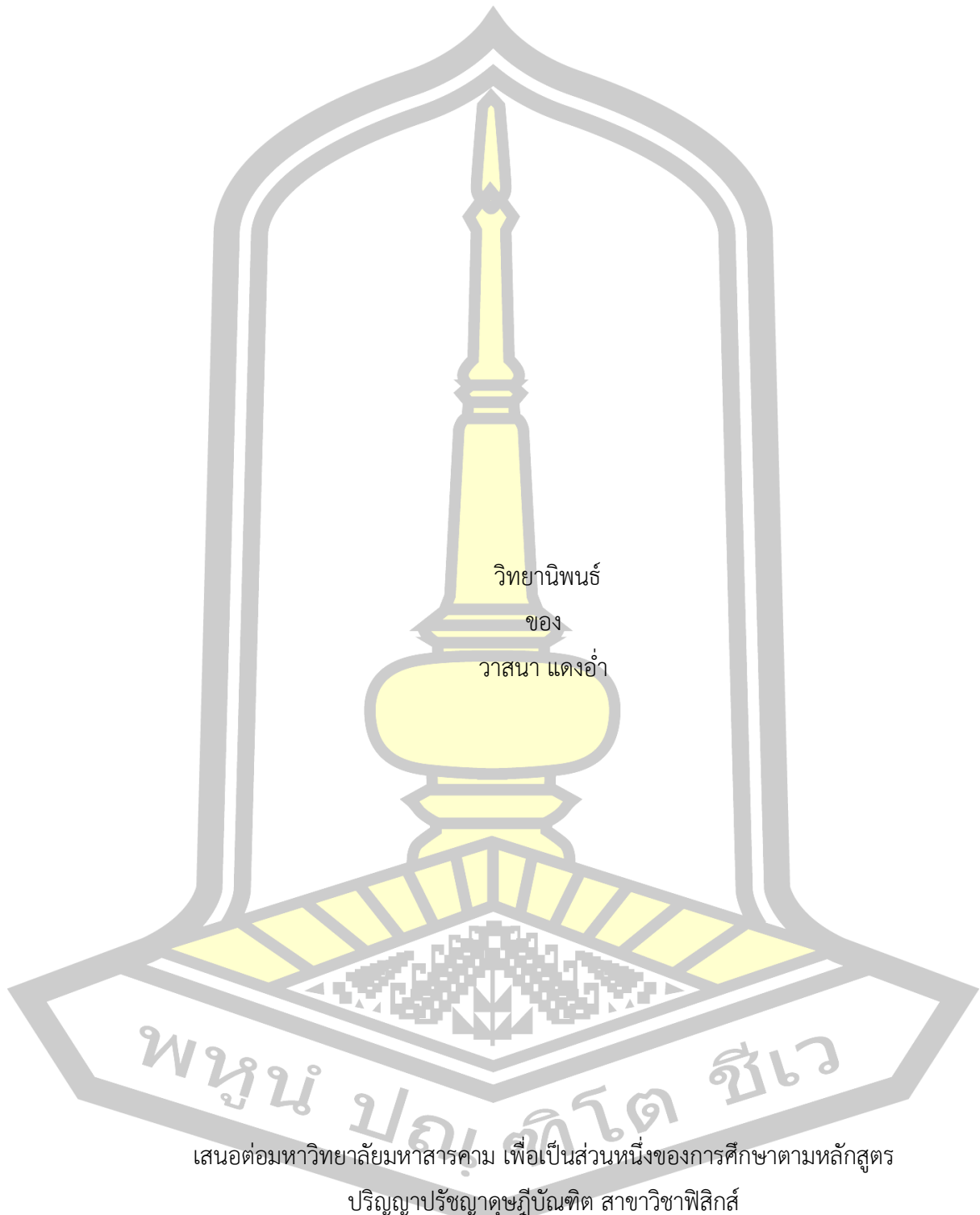
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มีนาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

แบบจำลองโครงสร้างแบบแกนกลางสำหรับการออกแบบองค์ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

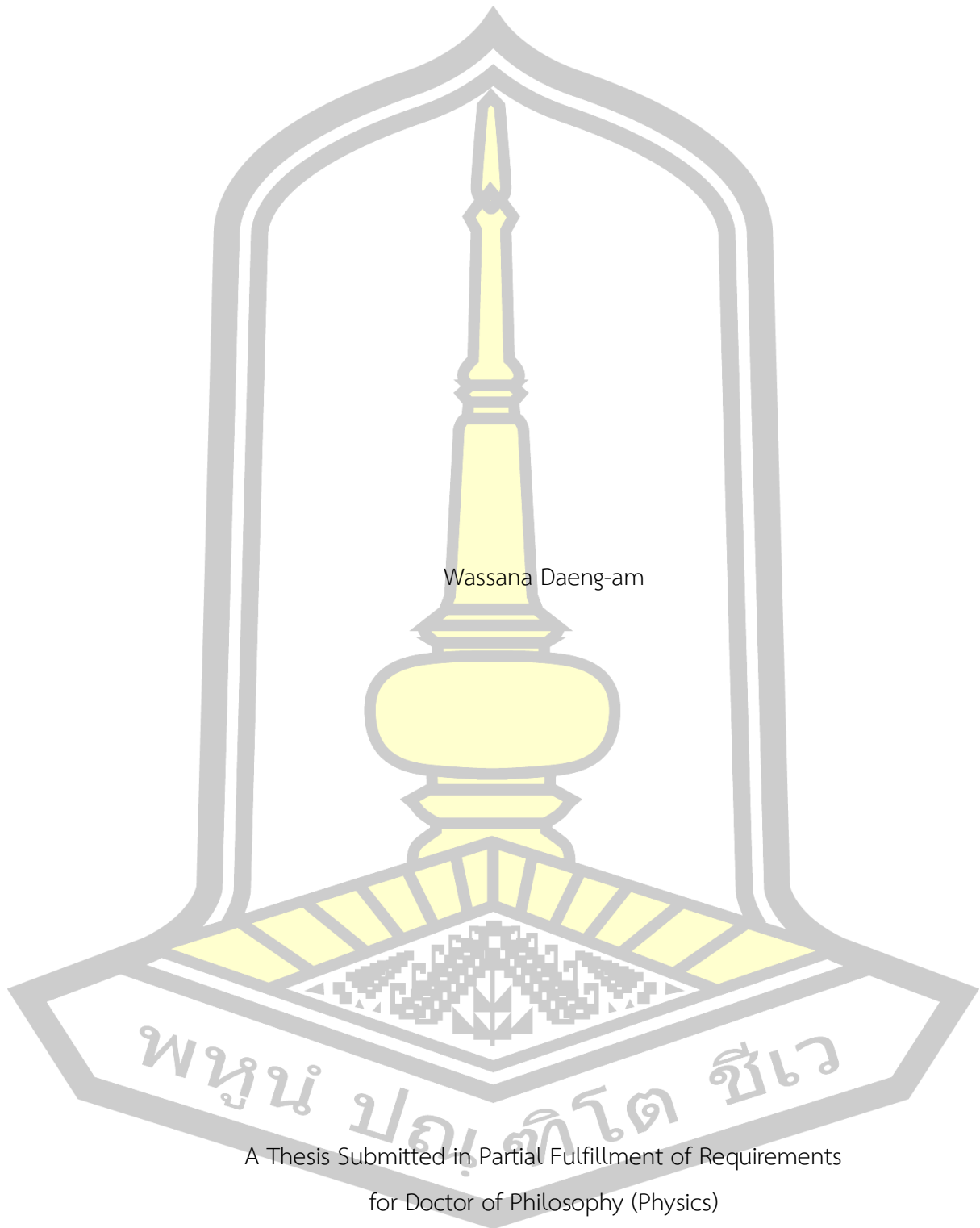


วิทยานิพนธ์
ของ
วาสนา แดงอ่ำ

พหุบัณฑิต โศก ชีวะ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มีนาคม 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Granular Model for Hard Disk Drive Components Design



Wassana Daeng-am

พญัน ปอญโท ชีเว

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

March 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาววาสนา แดงอ่ำ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. สุธี บุญช่วย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เจษฎา จูรีมาศ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. พรรณวดี จูรีมาศ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ประธาน ศรีวิไล)

กรรมการ

(ดร. กฤษณพงศ์ ลิ้มตระกูล)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนปัญญาชีวะ

(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

| | | | |
|------------------|--|------------|---------|
| ชื่อเรื่อง | แบบจำลองโครงสร้างแบบแกรนูลาร์สำหรับการออกแบบองค์ประกอบฮาร์ดดิสก์ ไดรฟ์ | | |
| ผู้วิจัย | วาสนา แดงอ่ำ | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา จุรีมาศ รองศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี จุรีมาศ | | |
| ปริญญา | ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต | สาขาวิชา | ฟิสิกส์ |
| มหาวิทยาลัย | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม | ปีที่พิมพ์ | 2563 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างทางแม่เหล็กระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์เพื่อใช้ในการศึกษาคูสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและหัวอ่านข้อมูลเนื่องจากผลของการออกแบบโครงสร้างและวัสดุแม่เหล็ก สำหรับโครงสร้างเสมือนจริงของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและหัวอ่านข้อมูลจะถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรมไวโรนอยที่สามารถกำหนดขนาดของระบบ ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก และค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ติดกันได้ ในลำดับแรกแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากจะถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยระเบียบวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt จากการศึกษาพบว่าขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เล็กที่สุดสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก CoPt ซึ่งยังคงรักษาเสถียรภาพทางความร้อนไว้ได้จะมีขนาดเท่ากับ 6 นาโนเมตร การลดขนาดของชั้นฟิล์มแม่เหล็กจะส่งผลทำให้เกิดพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันแบบไม่พร้อมเพรียงกัน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าเคอเออร์-ชีวิตต่อเวลายังได้ถูกศึกษา โดยพบว่าค่าเคอเออร์ชีวิตสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของชารอคได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบตั้งฉากแบบใหม่ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์วัสดุแม่เหล็กสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบใหม่ได้

ในลำดับต่อมาแบบจำลองแกรนูลาร์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุสองชั้น (IrMn/CoFe) ที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic layer, AF) เชื่อมติดกับชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic

layer, FM) ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการแลนดอว์ – ลิฟท์ชิต – กิลเบิร์ต (Landau – Liftshitz – Gilbert equation, LLG) สำหรับชั้น AF และชั้น FM ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (H_{EB}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์ม AF เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าแปรผกผันกับชั้นฟิล์ม FM ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองและทฤษฎี ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้น IrMn เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของค่า H_{EB} และส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น CoFe มีการกลับทิศทางอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน ในลำดับสุดท้ายได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol เพื่อใช้สำหรับการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้าง IrMn/CoFe ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์ม IrMn เป็นปัจจัยหลักที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้าง IrMn/CoFe อย่างไรก็ตามระบบที่มีปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมากจนเกินไปจะส่งผลทำให้ความสามารถในการทนต่อความร้อนของโครงสร้างวัสดุสองชั้นมีแนวโน้มลดต่ำลง

ในลำดับสุดท้ายแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนจะถูกนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินเพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล IrMn/CoFe/Cu/CoFe ที่มีต่อพฤติกรรมกระแสผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) จากการศึกษาพบว่าค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลทำให้คุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า MR จะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามฟังก์ชันไซน์ที่ถูกใช้สำหรับการอธิบายค่า MR ในเชิงการทดลองและทฤษฎี

คำสำคัญ : แบบจำลองโครงสร้างทางแม่เหล็กระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์, แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก, ปฏิกิริยาไบอัสแลกเปลี่ยน, พฤติกรรมกระแสผ่านสปิน

TITLE Granular Model for Hard Disk Drive Components Design
AUTHOR Wassana Daeng-am
ADVISORS Assistant Professor Jessada Chureemart , Ph.D.
 Associate Professor Phanwadee Chureemart , Ph.D.
DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Physics
UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2020
 University

ABSTRACT

This research aims to propose the granular micromagnetic model for the study of the magnetic properties in magnetic recording medium and read sensor due to the effect of structural designs and magnetic materials. The microstructure of both recording medium and read sensor will be performed by Voronoi construction allowing to control the system dimension, magnetic grain size and its distribution, as well as exchange interaction between neighbor grains. The granular model for advanced perpendicular recording medium (PRM) based on kinetic Monte Carlo (kMC) approach is developed to investigate and characterize the magnetic properties of CoPt media. The result shows that the smallest grain diameter presenting the thermally stable state for CoPt-alloys is 6 nm. The reduction of film thickness can cause the incoherent reversal behavior of the media. Moreover, the variation of coercivity as a function of measuring time is studied. We found that the predicted coercivity is perfect fitted to the Sharrock's equation. The study of magnetic properties of the novel PRM by using our proposed model can be applied to be the fundamental of magnetic material characterization for the promising recording technology.

Subsequently, the granular model is used to study the exchange bias phenomenon in the bilayer structure (IrMn/CoFe) consisting of antiferromagnetic

(AF) and ferromagnetic (FM) layers. The kMC and the stochastic-Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) approaches are used to describe the magnetization dynamics of AF and FM layers, respectively. The result shows that the value of exchange bias field (H_{EB}) is drastically increased and kept constant with increasing magnetic grain size and AF film thickness. While it is decreased with the increasing of FM thickness in good agreement with experimental and theoretical works. We further found that the easy axis dispersion of IrMn layer is one of the significant factors that causes the reduction of H_{EB} and it leads to the incoherent magnetization reversal of CoFe layer. The realistic granular model of exchange bias layer with York protocol is then implemented in order to study the thermal stability of IrMn/CoFe structure. The results indicate that increasing grain size and AF film thickness give larger fraction of the thermal stability of IrMn/CoFe structure. However, the system with large interlayer exchange field strength can reduce its thermal stability.

Finally, the realistic exchange bias model will be used with generalized spin accumulation model in order to investigate the effect of current density and magnetization angle between CoFe layers on the spin transport behavior and MR value of IrMn/CoFe/Cu/CoFe structure. The study shows that the MR value is inversely proportional to the injected current density because the enhancement of injected current density increases the spin transport properties of magnetic materials. We further found that the variation of MR value is dependent on the magnetization angle between magnetic layers in accordance with sine function that is generally used to describe MR value in experimental and theoretical studies.

Keyword : granular micromagnetic model, perpendicular recording medium, exchange bias phenomenon, spin transport behavior

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจษฎา จูริมาศ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รองศาสตราจารย์พรณวดี จูริมาศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ซึ่งไม่เพียงแต่ให้ความรู้และคำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ แต่ยังให้โอกาสที่สำคัญในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา โอกาสในการเดินทางไปฝึกประสบการณ์การทำงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศแก่ข้าพเจ้า อนึ่งยังให้คำปรึกษาและพร่ำสอนให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีความกตัญญูต่อผู้มีพระคุณ มีความอ่อนน้อมถ่อมตน มีความรับผิดชอบต่อนหน้าที่ของตนเอง และมีจิตสาธารณะซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเรียนต่อในระดับบัณฑิตศึกษา การทำงานร่วมกับผู้อื่น ตลอดจนการดำเนินชีวิต เปรียบเสมือนข้าพเจ้าเป็นบุตรสาวผู้หนึ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านอย่างสูงยิ่งที่คอยเมตตา ดูแลเอาใจใส่ ส่งเสริม และมอบโอกาสอันมีค่าให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ Professor Roy Chantrell ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในระหว่างการฝึกประสบการณ์การทำงานวิจัย ณ มหาวิทยาลัยยอร์ก พร้อมทั้งให้คำชี้แนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังให้โอกาสข้าพเจ้าในหลายๆ ด้านเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษาในระดับปริญญาเอกและโอกาสในการฝึกประสบการณ์การทำงานแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้มอบทุนสนับสนุนโครงการ Industry-Academia Partnership Programme (IAPP) 2016 ให้ข้าพเจ้าได้เดินทางไปฝึกประสบการณ์การทำงานวิจัย ณ มหาวิทยาลัยยอร์ก ประเทศอังกฤษ

ขอขอบพระคุณสมาคม IEEE Magnetic Society ที่ได้มอบทุน Student Travel Grant ให้ข้าพเจ้าได้เดินทางไปร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ MMM Conference 2017 ณ เมืองฟิตส์เบิร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา และเข้าร่วมค่าย IEEE Magnetic Summer School 2018 ณ เมืองกีโต ประเทศเอกวาดอร์

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้มอบทุนอุดหนุนในการพัฒนานิสิตระดับบัณฑิตศึกษาแก่ข้าพเจ้าเพื่อเดินทางไปนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ INTERMAG 2018 ณ ประเทศสิงคโปร์

ขอขอบคุณเน็ต ตึก ผน ชิง เพชร วุฒิ Mara Sarah Andrea Sergiu Lewis และกัลยาณมิตรทุกคนที่คอยให้กำลังใจในการเรียน การจัดทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนสนับสนุนความช่วยเหลือในทุกด้านอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณแม่ ตา ยาย หน่อม และทุกคนในบ้าน ที่เข้าใจและเคารพการตัดสินใจของข้าพเจ้า
คอยสนับสนุนอย่างเต็มที่ในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ประโยชน์และคุณค่าจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา ตา ยาย ครู
อาจารย์ ผู้ซึ่งให้ชีวิตและปัญญาแก่ผู้วิจัย

วาสนา แดงอ่ำ



สารบัญ

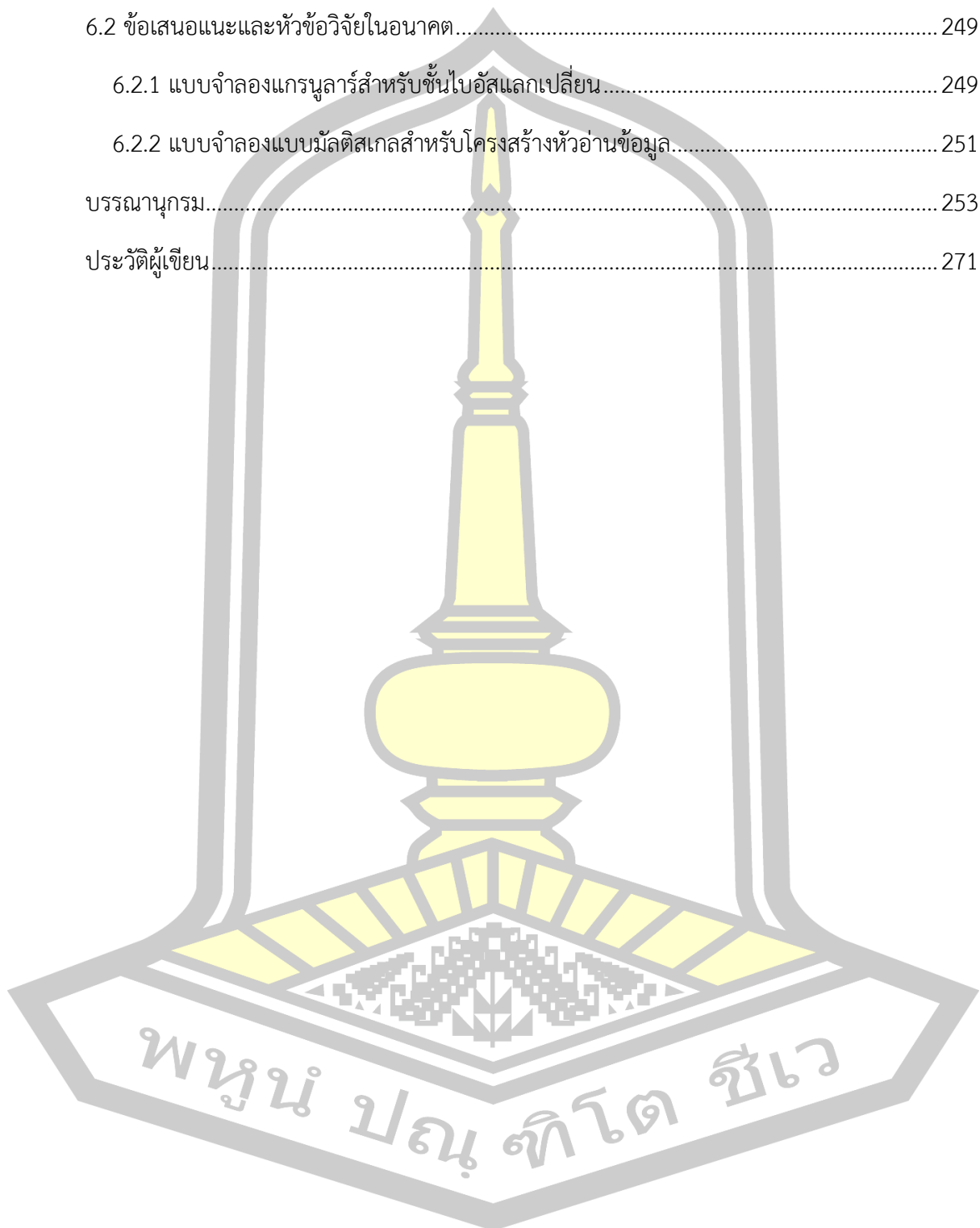
| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ..... | ญ |
| สารบัญภาพประกอบ..... | ฒ |
| สารบัญตาราง..... | ฬ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 10 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... | 10 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 11 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 12 |
| 2.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 12 |
| 2.1.1 แผ่นบันทึกข้อมูล..... | 13 |
| 2.1.2 หัวเขียนข้อมูล..... | 19 |
| 2.1.3 หัวอ่านข้อมูล..... | 23 |
| 2.2 ประเภทของวัสดุแม่เหล็ก..... | 29 |
| 2.2.1 วัสดุไดอะแมกเนติก..... | 29 |
| 2.2.2 วัสดุพาราแมกเนติก..... | 32 |
| 2.2.3 วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก..... | 33 |
| 2.2.4 วัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก..... | 35 |

| | |
|--|----|
| 2.3 สมบัติพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็ก | 36 |
| 2.3.1 แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก | 37 |
| 2.3.1.1 แอนไอโซโทรปีผลึก | 37 |
| 2.3.1.2 แอนไอโซโทรปีรูปร่าง | 40 |
| 2.3.1.3 แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน | 41 |
| 2.3.2 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน | 43 |
| 2.3.2.1 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางตรง | 43 |
| 2.3.2.2 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อมและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบพิเศษ | 45 |
| 2.4 การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน | 47 |
| 2.4.1 พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก | 48 |
| 2.4.2 ความไม่อิสระของเวลาและอุณหภูมิ (time dependent measurement)..... | 50 |
| บทที่ 3 แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล | 54 |
| 3.1 วิวัฒนาการของแผ่นบันทึกข้อมูล | 54 |
| 3.2 โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย | 60 |
| 3.2.1 แผนภาพไวโรนอย | 61 |
| 3.2.2 การกำหนดโครงสร้างแบบแกรนูลาร์ | 63 |
| 3.2.3 การกำหนดลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก | 65 |
| 3.2.4 การคำนวณค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน | 68 |
| 3.3 ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โล | 69 |
| 3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่สภาวะสมดุล | 79 |
| 3.4.1 ผลกระทบจากการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล | 82 |
| 3.4.2 ปัจจัยของมุมต่อค่าสนามวิกฤต | 86 |
| 3.4.3 ปัจจัยของการกระจายตัวของทิศแกนง่าย | 89 |
| 3.4.4 ปัจจัยของเวลาต่อค่าสนามกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน | 91 |

| | |
|---|-----|
| บทที่ 4 แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 96 |
| 4.1 ปรากฎการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน | 96 |
| 4.1.1 จุดกำเนิดของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน | 96 |
| 4.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน | 103 |
| 4.1.2.1 ความหนาชั้นฟิล์มแม่เหล็ก | 104 |
| 4.1.2.2 รอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็ก | 107 |
| 4.1.2.3 อุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 108 |
| 4.2 แบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 112 |
| 4.2.1 แบบจำลองเบื้องต้นของไมเคิลเจอร์นและบิน..... | 112 |
| 4.2.2 แบบจำลองแกรนูลาร์ของฟิลคัมเมอร์และชาราป | 114 |
| 4.2.3 แบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างง่ายของเฟอร์นันเดซ..... | 116 |
| 4.2.4 แบบจำลองแกรนูลาร์ของชูและเคิร์ก | 118 |
| 4.3 แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 120 |
| 4.3.1 การกำหนดโครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 121 |
| 4.3.2 การคำนวณพลวัตของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ | 124 |
| 4.3.3 การคำนวณพลวัตของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโดยอาศัยสมการ LLG..... | 129 |
| 4.3.4 ผลการศึกษา..... | 138 |
| 4.3.4.1 ผลกระทบของปัจจัยภายในและการออกแบบโครงสร้าง | 141 |
| 4.3.4.2 ผลกระทบของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้น AF | 147 |
| 4.4 แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 155 |
| 4.4.1 กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF | 155 |
| 4.4.2 การจำลองกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF | 157 |
| 4.4.3 ผลการศึกษา..... | 160 |
| 4.4.3.1 ผลกระทบของปัจจัยภายในและการออกแบบโครงสร้าง | 161 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ..... | 168 |
| 4.5 แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol..... | 173 |
| 4.5.1 York protocol | 174 |
| 4.5.2 การจำลองวิธีการวัดลูปวงปิดฮีสเตอร์รีซีตาม York protocol..... | 175 |
| 4.5.3 ผลการศึกษา..... | 179 |
| บทที่ 5 แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล | 185 |
| 5.1 ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปิน..... | 186 |
| 5.1.1 ปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่..... | 187 |
| 5.1.2 การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ | 190 |
| 5.2 แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน..... | 192 |
| 5.3 แบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกล..... | 195 |
| 5.4 ผลการศึกษา..... | 201 |
| 5.4.1 การเปรียบเทียบค่าการคำนวณการสะสมสปิน กระแสสปิน และความต้านทานที่ได้จาก แบบจำลองในระดับอะตอมกับแบบจำลองมัลติสเกล..... | 201 |
| 5.4.2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลการส่งผ่านสปินในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล | 214 |
| 5.4.2.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR | 214 |
| 5.4.2.2 ผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL ต่อปริมาณการส่งผ่าน สปินและค่า MR..... | 219 |
| 5.4.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า MR ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเชิงการทดลอง | 225 |
| 5.4.3.1 การจำแนกระดับของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรม เครื่องมือวัด และกลุ่มตัวอย่างที่ ใช้ในการทดลอง..... | 225 |
| 5.4.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอก | 234 |
| 5.4.3.3 ผลการป้อนแรงดันไบอัส..... | 239 |
| 5.4.3.4 ผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL | 242 |
| บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ | 246 |

| | |
|---|-----|
| 6.1 สรุปผลการศึกษา..... | 246 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะและหัวข้อวิจัยในอนาคต..... | 249 |
| 6.2.1 แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 249 |
| 6.2.2 แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล..... | 251 |
| บรรณานุกรม..... | 253 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 271 |



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

| | | |
|---------------|---|----|
| ภาพประกอบ 1.1 | องค์ประกอบหลักและลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 2 |
| ภาพประกอบ 1.2 | ภาพถ่ายบนระนาบ (in-plane) ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้านที่รับกับแผ่นบันทึกข้อมูล (air-bearing surface, ABS) โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) [20] และแผนภาพโครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้าน ABS..... | 4 |
| ภาพประกอบ 1.3 | ลักษณะการทำงานของหัวอ่านข้อมูลเมื่อแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการ (ก) จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและ (ข) จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม | 5 |
| ภาพประกอบ 1.4 | โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้านที่รับกับแผ่นบันทึกข้อมูล และลักษณะความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AF และชั้น FM.... | 6 |
| ภาพประกอบ 1.5 | โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นที่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 7 |
| ภาพประกอบ 1.6 | โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/FM ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน | 8 |
| ภาพประกอบ 1.7 | โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล..... | 9 |
| ภาพประกอบ 2.1 | (ก) ภาพถ่ายระนาบของชั้นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [44] และ (ข) แผนภาพอย่างง่ายและตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล | 14 |
| ภาพประกอบ 2.2 | แผนภาพอย่างง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลายชั้นที่มีคุณสมบัติและหน้าที่แตกต่างกัน..... | 15 |
| ภาพประกอบ 2.3 | แผนภาพอย่างง่ายของชั้นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวที่พิจารณาผลของปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุใน (ก) ระบบที่ไม่มีการแบ่งบิต | |

| | | |
|----------------|---|----|
| | ข้อมูล (ข) ระบบที่มีความหนาแน่นของบิตข้อมูลต่ำและ (ค) ระบบที่มีความหนาแน่นของบิตข้อมูลสูง [5] | 16 |
| ภาพประกอบ 2.4 | แผนภาพอย่างง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลายชั้นที่มีคุณสมบัติและหน้าที่แตกต่างกัน..... | 17 |
| ภาพประกอบ 2.5 | วิวัฒนาการของแผ่นบันทึกข้อมูลและอัตราการขยายตัวของพื้นที่จัดเก็บข้อมูลนับตั้งแต่ยุคแรกเริ่มที่มีการใช้งานหน่วยความจำฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ [60] | 18 |
| ภาพประกอบ 2.6 | ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ (ก) หัวเขียนข้อมูลแบบวงแหวนบนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวและ (ข) หัวเขียนข้อมูลแบบขั้วเดี่ยวบนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก | 20 |
| ภาพประกอบ 2.7 | ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของแผ่นบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วย | 21 |
| ภาพประกอบ 2.8 | ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย..... | 22 |
| ภาพประกอบ 2.9 | โครงสร้างสปินวาล์วแบบดั้งเดิมที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL บนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก | 24 |
| ภาพประกอบ 2.10 | โครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์หน้าทีรับกับแผ่นบันทึกข้อมูล (air-bearing surface, ABS) และลักษณะการแบ่งบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 26 |
| ภาพประกอบ 2.11 | โครงสร้างสปินวาล์วแบบสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยชั้น AF/SAF/SL/FL บนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก | 27 |
| ภาพประกอบ 2.12 | โครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลที่มีเกราะป้องกันด้านข้างเป็น (ก) วัสดุแม่เหล็กแบบถาวร และ (ข) วัสดุแม่เหล็กแบบไม่ถาวร หน้าทีรับกับแผ่นบันทึกข้อมูลในขณะที่ไม่เกิดกระบวนการอ่านข้อมูล | 28 |
| ภาพประกอบ 2.13 | (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุไดอะแมกเนติกและ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 25,000 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุไดอะแมกเนติก [66] | 30 |
| ภาพประกอบ 2.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับไว้ได้แม่เหล็กแต่ละชนิดกับอุณหภูมิโดยที่ (1) – (4) แทนวัสดุไดอะแมกเนติก วัสดุพาราแมกเนติก วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกตามลำดับ [90] | 31 |

| | | |
|----------------|---|----|
| ภาพประกอบ 2.15 | (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุพาราแมกเนติกและ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อน สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 25,000 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุ พาราแมกเนติก [66]..... | 32 |
| ภาพประกอบ 2.16 | (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อน สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 100 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุเฟอร์โร- แมกเนติก [66] | 34 |
| ภาพประกอบ 2.17 | (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อ มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบ (ข) ลักษณะโครงสร้างอย่าง ง่ายของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในธาตุแมงกานีส [90] | 35 |
| ภาพประกอบ 2.18 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็น (ก) ลูกบาศก์ แบบกลางตัวและ (ข) ลูกบาศก์แบบกลางหน้า เมื่อมีการป้อนสนามแม่- เหล็กภายนอกในทิศทางที่ยากและง่ายต่อการแมกนีไทซ์ [66] | 39 |
| ภาพประกอบ 2.19 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหก ด้านแบบปิด เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางที่ยากและ ง่ายต่อการแมกนีไทซ์ [66]..... | 39 |
| ภาพประกอบ 2.20 | ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กหักล้างด้วยตนเองภายในแท่งแม่เหล็ก [48] | 40 |
| ภาพประกอบ 2.21 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุโคบอลต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฟอร์โร- แมกเนติกที่เชื่อมติดกับวัสดุโคบอลต์ออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอน- ติเฟอร์โรแมกเนติกภายหลังจากกระบวนการให้สนามความเย็น [17]..... | 42 |
| ภาพประกอบ 2.22 | ลักษณะการจัดเรียงตัวของสปิน (ก) ในทิศทางเดียวกันและ (ข) ในทิศทาง ตรงกันข้าม [98] | 44 |
| ภาพประกอบ 2.23 | กราฟเบธส์-สเลเตอร์ (Bethe-Slater) ที่แสดงค่าคงที่การแลกเปลี่ยนของ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [48]..... | 45 |
| ภาพประกอบ 2.24 | ลักษณะการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินแบ่งออกเป็น (ก) การ แลกเปลี่ยนทางอ้อมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการซ้อนทับกันของระดับพลังงาน ระหว่างอะตอมของวัสดุโลหะหายากที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก [97] และ (ข) การแลกเปลี่ยนแบบพิเศษซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการซ้อนทับกันของระดับ พลังงานระหว่างอะตอมของวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กและอะตอมของ ออกไซด์ [97]..... | 46 |

| | | |
|----------------|---|----|
| ภาพประกอบ 2.25 | โครงสร้างผลึกแบบ rocksalt structure ในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [48] เมื่อวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินแทนอะตอมวัสดุแม่เหล็กและวงกลมสีเทาแทนอะตอมของออกไซด์..... | 47 |
| ภาพประกอบ 2.26 | การพิจารณามุมระหว่างแมกนีไทเซชัน \vec{M} และสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H} ที่กระทำต่อทิศแกนง่ายของวัสดุ [100]..... | 49 |
| ภาพประกอบ 2.27 | ผลของพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับมุมของแมกนีไทเซชัน [48]..... | 50 |
| ภาพประกอบ 3.1 | แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]..... | 56 |
| ภาพประกอบ 3.2 | แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ CGC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [57]..... | 57 |
| ภาพประกอบ 3.3 | แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]..... | 58 |
| ภาพประกอบ 3.4 | แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]..... | 59 |
| ภาพประกอบ 3.5 | การเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นบันทึกข้อมูลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 K และตัวอย่างของเส้นความชันที่ผ่านจุด H_c [62]..... | 60 |
| ภาพประกอบ 3.6 | แผนภาพไวโรนอยที่เกิดจากการสร้างเส้นเชื่อมไวโรนอยระหว่างนิวเคลียสของเซลล์ไวโรนอยภายในระบบ [41], [108]..... | 61 |
| ภาพประกอบ 3.7 | แผนภาพไวโรนอยที่มีการจัดเรียงนิวเคลียสของเซลล์ไวโรนอยอย่างเป็นระเบียบ..... | 62 |
| ภาพประกอบ 3.8 | แผนภาพไวโรนอยที่มีการจัดเรียงนิวเคลียสของเซลล์ไวโรนอยเป็นแบบสุ่ม..... | 62 |
| ภาพประกอบ 3.9 | การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดและปริมาตรของเซลล์ไวโรนอยหรือเกรนแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย..... | 64 |
| ภาพประกอบ 3.10 | ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรมไวโรนอยสำหรับระบบที่มีขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ (ก) 4 nm และ (ข) 10 nm ตามลำดับ..... | 64 |

| | | |
|----------------|--|----|
| ภาพประกอบ 3.11 | ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรมไวโรนอยในกรณีที่ σ_{IND} มีค่าเท่ากับ (ก) 0.05 (ข) 0.15 และ (ค) 0.25 ตามลำดับ และ (ง) ผลการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กทั้งสามกรณี..... | 66 |
| ภาพประกอบ 3.12 | การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยกับภาพถ่าย TEM ของเกรนแม่เหล็กภายใน (ก) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม และ (ข) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบเกรนเดี่ยว [40], [48]..... | 67 |
| ภาพประกอบ 3.13 | การพิจารณาเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j ในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอย..... | 68 |
| ภาพประกอบ 3.14 | การพิจารณาผลต่างระหว่างสองสถานะพลังงานของอนุภาคที่จำเป็นต้องเอาชนะเพื่อทำให้เกิดโอกาสในการเปลี่ยนแปลงทิศทางจากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 [115]..... | 70 |
| ภาพประกอบ 3.15 | ระบบพิกัดของแมกนีไทเซชันที่มีการกระจายตัวออกจากทิศแกนง่ายในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบ [116]..... | 73 |
| ภาพประกอบ 3.16 | สถานะพลังงานต่ำที่สุดสองสถานะซึ่งถูกใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในเกรนแม่เหล็ก [115]..... | 79 |
| ภาพประกอบ 3.17 | โครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลขนาด $200 \times 200 \text{ nm}^2$ และกราฟการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ σ_{IND} มีค่าเท่ากับ (ก) 0.05 (ข) 0.15 และ (ค) 0.25 ตามลำดับ..... | 81 |
| ภาพประกอบ 3.18 | ลู่วงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กในระบบมีค่าแตกต่างกันเมื่อความแรงสนามแลกเปลี่ยน H_{exch} มีค่าเท่ากับ (ก) 2,000 Oe และ (ข) 8,000 Oe [40]..... | 83 |
| ภาพประกอบ 3.19 | ลู่วงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่เปรียบเทียบกับกันในกรณีที่ระบบมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกัน [40]..... | 85 |
| ภาพประกอบ 3.20 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_C กับค่า H_{exch} เปรียบเทียบกันในกรณีที่แผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่มีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกัน [40]..... | 86 |
| ภาพประกอบ 3.21 | ผลการนอมอลไลซ์ค่า H_{cr} ที่มุม θ ต่างๆ ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Stoner - | |

| | | |
|----------------|--|-----|
| | Wohlfarth (ก) เมื่อไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ($\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$) (ข) เมื่อมีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ($\sigma_{\phi} = 3^{\circ}$) [40]..... | 88 |
| ภาพประกอบ 3.22 | (ก) ผลการคำนวณค่า H_C ที่เป็นฟังก์ชันของค่า K_U โดยภาพด้านในแสดงรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า σ_{ϕ} และ (ข) ผลการคำนวณค่า H_C ที่เป็นฟังก์ชันของค่า σ_{ϕ} ที่ค่า K_U ต่างๆ [40] | 90 |
| ภาพประกอบ 3.23 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งที่ถูกคำนวณด้วยระยะเวลาในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 0.1 s ถึง 10^9 s | 93 |
| ภาพประกอบ 3.24 | การเปลี่ยนแปลงของค่า H_C ที่เป็นฟังก์ชันของระยะเวลาในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบลือกการที่มเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากสมการของซารอคและแบบจำลองแกรนูลาร์ [40]..... | 94 |
| ภาพประกอบ 4.1 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ซึ่งถูกหุ้มด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ออกไซด์ที่เคลือบที่ออกจากแกนสมมาตรเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [16] | 97 |
| ภาพประกอบ 4.2 | กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM [17], [18]..... | 98 |
| ภาพประกอบ 4.3 | การเปรียบเทียบคุณสมบัติภายในของระบบวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF และชั้น FM เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าอยู่ในช่วง $T_N < T < T_C$ และ $T < T_N < T_C$ [16]..... | 100 |
| ภาพประกอบ 4.4 | การวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วย York protocol [25] | 103 |
| ภาพประกอบ 4.5 | ลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ภายหลังจากกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในช่วง (ก) $V < V_C$ (ข) $V_C < V < V_{SET}$ และ (ค) $V > V_{SET}$ ตามลำดับ [25]..... | 106 |
| ภาพประกอบ 4.6 | ผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาของชั้นฟิล์ม AF เปรียบเทียบกับสมการ (4.5) [135]..... | 107 |
| ภาพประกอบ 4.7 | การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อใน (ก) ระบบสปินที่ชดเชยกันได้และ (ข) ระบบสปินที่ชดเชยกันไม่ได้ | 108 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| ภาพประกอบ 4.8 | (ก) ผลการวัดค่า T_B ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม [25] และ (ข) พฤติกรรมของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในขณะที่ $T_{MS} = T_B$ | 109 |
| ภาพประกอบ 4.9 | (ก) ผลการวัดค่า T_B ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ด้วย York protocol [25] และ (ข) พฤติกรรมของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในขณะที่ $T_{ACT} = T_B$ | 110 |
| ภาพประกอบ 4.10 | การพิจารณาทิศทางของแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กภายนอกภายในระบบที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนของไมเคิลเจอร์นและบิน [94]..... | 114 |
| ภาพประกอบ 4.11 | แผนภาพเกรนแม่เหล็กของชั้น AF ที่เชื่อมติดกันกับชั้นฟิล์ม FM ต่อเนื่องที่ถูกศึกษาในแบบจำลองของฟิล์มเมอร์และซาราป [34]..... | 115 |
| ภาพประกอบ 4.12 | ผลการคำนวณค่า H_{EB} และค่า H_C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยอาศัยแบบจำลองทางทฤษฎีของฟิล์มเมอร์และซาราปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [34]..... | 116 |
| ภาพประกอบ 4.13 | การกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [38]..... | 117 |
| ภาพประกอบ 4.14 | ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นของวัสดุ AF (ด้านล่าง) และวัสดุ FM (ด้านบน) ขนาด $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ที่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมโวโรนอย..... | 122 |
| ภาพประกอบ 4.15 | ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF แบบสองมิติในกรณี (ก) $\sigma_\phi = 0^\circ$ (ข) $\sigma_\phi = 15^\circ$ และ (ค) $\sigma_\phi = 45^\circ$.. | 123 |
| ภาพประกอบ 4.16 | ระบบพิกัดสองมิติของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่มีการกระจายตัวออกจากทิศแกนง่าย..... | 127 |
| ภาพประกอบ 4.17 | แนวโน้มการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็ก (ก) แบบหมุนวน รอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและ (ข) แบบห้วงเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล [95]..... | 130 |
| ภาพประกอบ 4.18 | แนวโน้มการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กแบบหมุนวนเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (ก) ภาพด้านข้างและ (ข) ภาพด้านบน [95]..... | 130 |
| ภาพประกอบ 4.19 | เทคนิคการคำนวณข้อมูลเชิงตัวเลขแบบ (ก) ออยเลอร์ (predictor) และ (ข) ฮอยน์สกีม (corrector) [95]..... | 136 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| ภาพประกอบ 4.20 | แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 138 |
| ภาพประกอบ 4.21 | โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ CoFe (ชั้นบน) และชั้นวัสดุ IrMn (ชั้นล่าง) ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรมไวโรนอย | 140 |
| ภาพประกอบ 4.22 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe เปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า K_{AF} [139] | 142 |
| ภาพประกอบ 4.23 | การเปลี่ยนแปลงขนาดของค่า H_{EB} ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของค่า K_{AF} เปรียบเทียบกันในกรณีที่ $H_{int}^t = 250$ Oe และ 500 Oe [139]..... | 143 |
| ภาพประกอบ 4.24 | (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาชั้นฟิล์ม FM และความหนาของชั้นฟิล์ม AF [139] และ (ข) ผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาชั้นฟิล์ม FM [29] และความหนาของชั้นฟิล์ม AF [135] แสดงตั้งเส้นกราฟสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ | 145 |
| ภาพประกอบ 4.25 | ผลการคำนวณค่า H_{EB} ที่เป็นฟังก์ชันของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $t_{IrMn} = 4, 6$ และ 8 nm [139] และภาพด้านในแสดงผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ที่เป็นฟังก์ชันของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $t_{IrMn} = 4$ และ 6 nm [135]..... | 146 |
| ภาพประกอบ 4.26 | ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF แบบสองมิติในกรณีที่มิตีค่ามุมการกระจายตัวเท่ากับ (ก) $\sigma_\phi = 0^\circ$ (ข) $\sigma_\phi = 15^\circ$ และ (ค) $\sigma_\phi = 45^\circ$ | 148 |
| ภาพประกอบ 4.27 | ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe เปรียบเทียบกันในกรณีที่ σ_ϕ มีค่าแตกต่างกันเป็น $0^\circ, 15^\circ, 45^\circ$ และ 90° ตามลำดับ..... | 150 |
| ภาพประกอบ 4.28 | ผลการคำนวณขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเท่ากับ $\sigma_\phi = 0^\circ - 90^\circ$ [139] | 151 |
| ภาพประกอบ 4.29 | ลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่แต่ละสถานะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเปรียบเทียบกับ 4 จุด ได้แก่ (ก) จุดที่สนามแม่เหล็กอ้อมตัวทางด้านบวก (ข) จุดที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ค) จุดที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กในทางด้าน | |

ลบเท่ากับ 450 Oe และ (ง) จุดที่สนามแม่เหล็กอ้อมตัวทางด้านลบ โดยระบบที่นำมาพิจารณาจะมีขนาดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF แตกต่างกันไปเท่ากับ $\sigma_p = 0^\circ$ 15° และ 45° ตามลำดับ [139]..... 153

ภาพประกอบ 4.30 กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสามช่วงเวลาได้แก่ (ก) ช่วงเวลาการให้ความร้อน (ข) ช่วงเวลาการลดอุณหภูมิ และ (ค) ช่วงเวลาการกำหนดทิศทาง ตามลำดับ 157

ภาพประกอบ 4.31 แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ร่วมด้วย..... 159

ภาพประกอบ 4.32 ผลการคำนวณค่า H_{EB} ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของค่า K_{AF} เปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF แสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ 163

ภาพประกอบ 4.33 ผลกระทบของปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีต่อการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ค่า f_{SET} และ (ข) ปริมาณ H_{EB} เปรียบเทียบกันในกรณีที่อุณหภูมิ T_{SET} มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 400 K ถึง 600 K..... 165

ภาพประกอบ 4.34 (ก) ผลกระทบของขนาดของเกรนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่า H_{EB} เปรียบเทียบกับผลการทดลอง [135] และ (ข) ผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} ซึ่งถูกทำการนอร์มอลไลซ์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [135] 167

ภาพประกอบ 4.35 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} ในกรณีที่ D_m มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 6 nm ถึง 10 nm และ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มี D_m แตกต่างกันไป..... 169

ภาพประกอบ 4.36 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ H_{EB} ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF แตกต่างกันไป 170

ภาพประกอบ 4.37 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ H_{EB} ในกรณีที่ปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มีปริมาณ H_{ex}^{int} แตกต่างกันไป..... 172

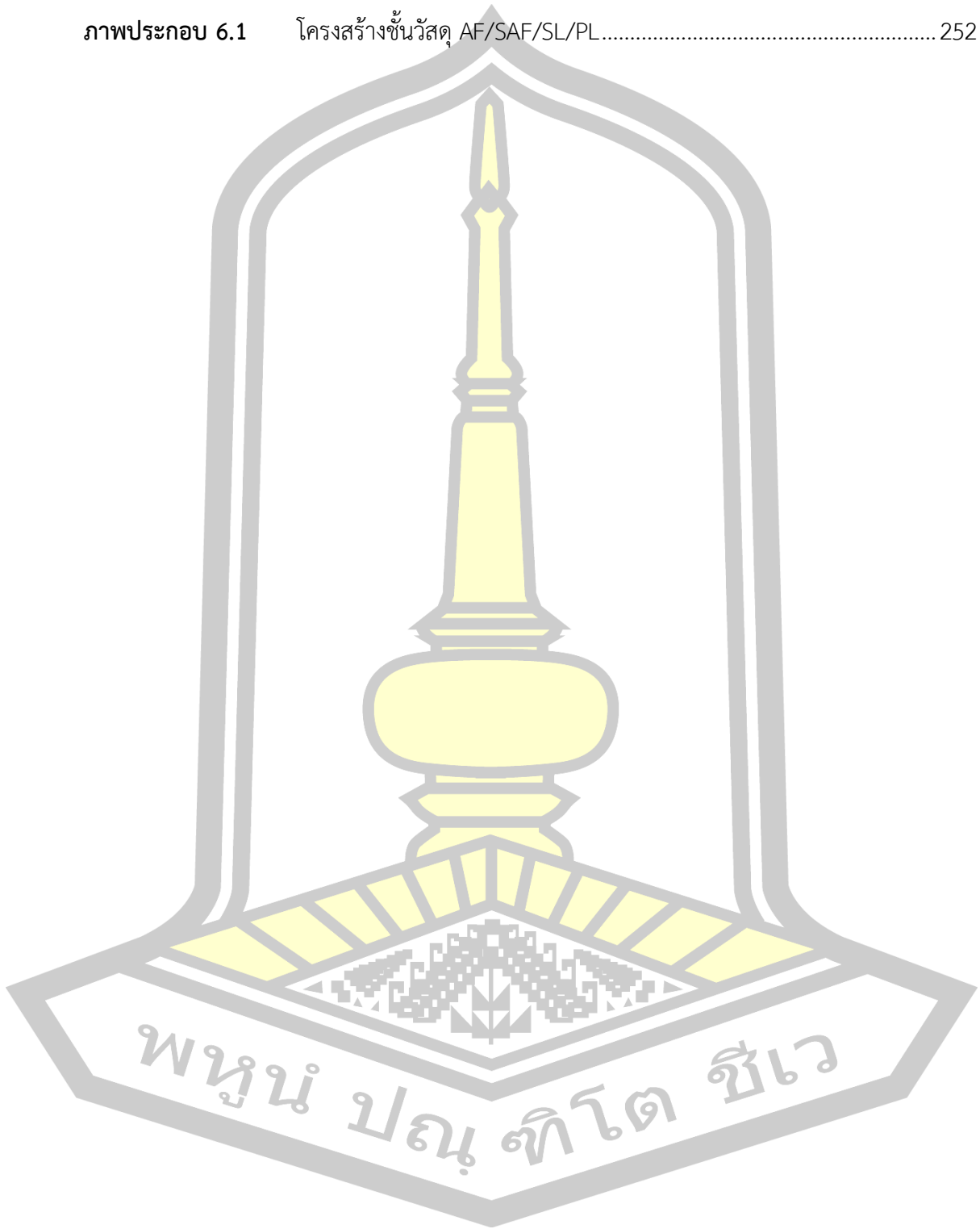
| | | |
|----------------|--|-----|
| ภาพประกอบ 4.38 | แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตามวิธี York protocol..... | 176 |
| ภาพประกอบ 4.39 | ผลการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้าง IrMn/ CoFe สองลูปที่ซ้อนทับกัน ณ อุณหภูมิที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเท่ากับ $T_{MS} = 100$ K..... | 177 |
| ภาพประกอบ 4.40 | ผลการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้าง IrMn(8nm)/ CoFe(4nm) ที่ทำการวัดลูปด้วยอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ที่แตกต่างกัน..... | 178 |
| ภาพประกอบ 4.41 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า H_{EB} ตาม York protocol กับผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} [133], [135] ... | 179 |
| ภาพประกอบ 4.42 | (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนแม่เหล็ก..... | 180 |
| ภาพประกอบ 4.43 | (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชั้นฟิล์ม AF | 181 |
| ภาพประกอบ 4.44 | (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ H_{ex}^{int} | 183 |
| ภาพประกอบ 5.1 | (ก) โครงสร้างอย่างง่ายของวัสดุ Fe/Cr แบบหลายชั้น $(Fe/Cr)_n$ (ข) ผลการวัดค่า GMR โดยกลุ่มวิจัยของเฟิร์ต [21]..... | 187 |
| ภาพประกอบ 5.2 | ลักษณะการกระเจิงของสปินขึ้นและสปินลงเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าในแนวตั้งฉากผ่านโครงสร้างวัสดุและแบบจำลองวงจรค่าต้านทานอย่างง่าย (simple resistor network model) ของโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและ (ข) ทิศทางตรงกันข้าม [152], [155], [156] | 189 |
| ภาพประกอบ 5.3 | ปรากฏการณ์สปินทอร์คที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินโพลารไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุและแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL | 191 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| ภาพประกอบ 5.4 | โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ในแบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกล..... | 196 |
| ภาพประกอบ 5.5 | โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อยจำนวน n ชั้นเพื่อใช้สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน..... | 197 |
| ภาพประกอบ 5.6 | แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล..... | 200 |
| ภาพประกอบ 5.7 | โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกล..... | 202 |
| ภาพประกอบ 5.8 | ลักษณะโครงสร้างแบบ 2 มิติด้านบน (top view) ที่แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันแต่ละชั้นในโครงสร้าง IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 สำหรับกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 205 |
| ภาพประกอบ 5.9 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันในแนวแกน x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 206 |
| ภาพประกอบ 5.10 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 208 |
| ภาพประกอบ 5.11 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 209 |
| ภาพประกอบ 5.12 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ระหว่างแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 210 |
| ภาพประกอบ 5.13 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/jm$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ..... | 211 |

| | |
|----------------|--|
| ภาพประกอบ 5.14 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ 212 |
| ภาพประกอบ 5.15 | ผลการคำนวณค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกรณี (ก) (ค) P state และ (ข) (ง) AP state ตามลำดับ..... 216 |
| ภาพประกอบ 5.16 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/jm$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ 217 |
| ภาพประกอบ 5.17 | ผลการคำนวณ (ก) ค่า MR รวม และ (ข) ส่วนต่างระหว่างค่า MR ในกรณี P state และ AP state ของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า..... 218 |
| ภาพประกอบ 5.18 | ผลการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า..... 219 |
| ภาพประกอบ 5.19 | ลักษณะโครงสร้างแบบ 2 มิติด้านบน (top view) ที่แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe2 ที่กระทำมุม θ ต่อทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น CoFe1 ด้วยขนาดของมุมเท่ากับ (ก) 0° (ข) 30° (ค) 60° (ง) 90° (จ) 120° และ (ฉ) 150° ตามลำดับ 221 |
| ภาพประกอบ 5.20 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ 222 |
| ภาพประกอบ 5.21 | การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ 223 |
| ภาพประกอบ 5.22 | ผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/jm$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ 224 |
| ภาพประกอบ 5.23 | ผลการคำนวณค่า MR รวมของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ เทียบกับฟังก์ชัน $a + b\sin^2(\theta/2)$ 225 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| ภาพประกอบ 5.24 | การจำแนกลักษณะของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมในระดับ (ก) เวเฟอร์ (ข) บาร์ (ค) สไลเดอร์ [185] (ง) HGA [186] (จ) HSA [187] และ (ฉ) HDA [188]..... | 227 |
| ภาพประกอบ 5.25 | (ก) แผนภาพวงจรค่าต้านทานอย่างง่ายในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอก (ข) เครื่องมือวัด QST รุ่น tabletop QST-2002 สำหรับการทดสอบหัวอ่านข้อมูลในระดับ HGA [169] | 229 |
| ภาพประกอบ 5.26 | (ก) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กเดี่ยว และ (ข) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว [170]..... | 230 |
| ภาพประกอบ 5.27 | (ก) เครื่องมือวัด QST รุ่น BLAZER-X5 สำหรับหัวอ่านข้อมูลในระดับบาร์ [171] (ข) เครื่องมือวัด QST รุ่น WLA-3000 สำหรับหัวอ่านข้อมูลในระดับเวเฟอร์ [172] | 231 |
| ภาพประกอบ 5.28 | (ก) การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับและ (ข) การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรง [173]..... | 233 |
| ภาพประกอบ 5.29 | ตัวอย่างการวัดค่า MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 26 nm | 235 |
| ภาพประกอบ 5.30 | ผลการวัด (ก) ค่า MR และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW | 236 |
| ภาพประกอบ 5.31 | ผลการวัด (ก) ค่า MR และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA | 239 |
| ภาพประกอบ 5.32 | ผลการวัดค่า (ก) R_P (ข) R_{AP} และ (ค) อัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW..... | 240 |
| ภาพประกอบ 5.33 | ผลการวัดค่า (ก) R_P (ข) R_{AP} และ (ค) อัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA..... | 241 |
| ภาพประกอบ 5.35 | ผลการวัดค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW..... | 243 |
| ภาพประกอบ 5.36 | ผลการวัดค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA..... | 244 |

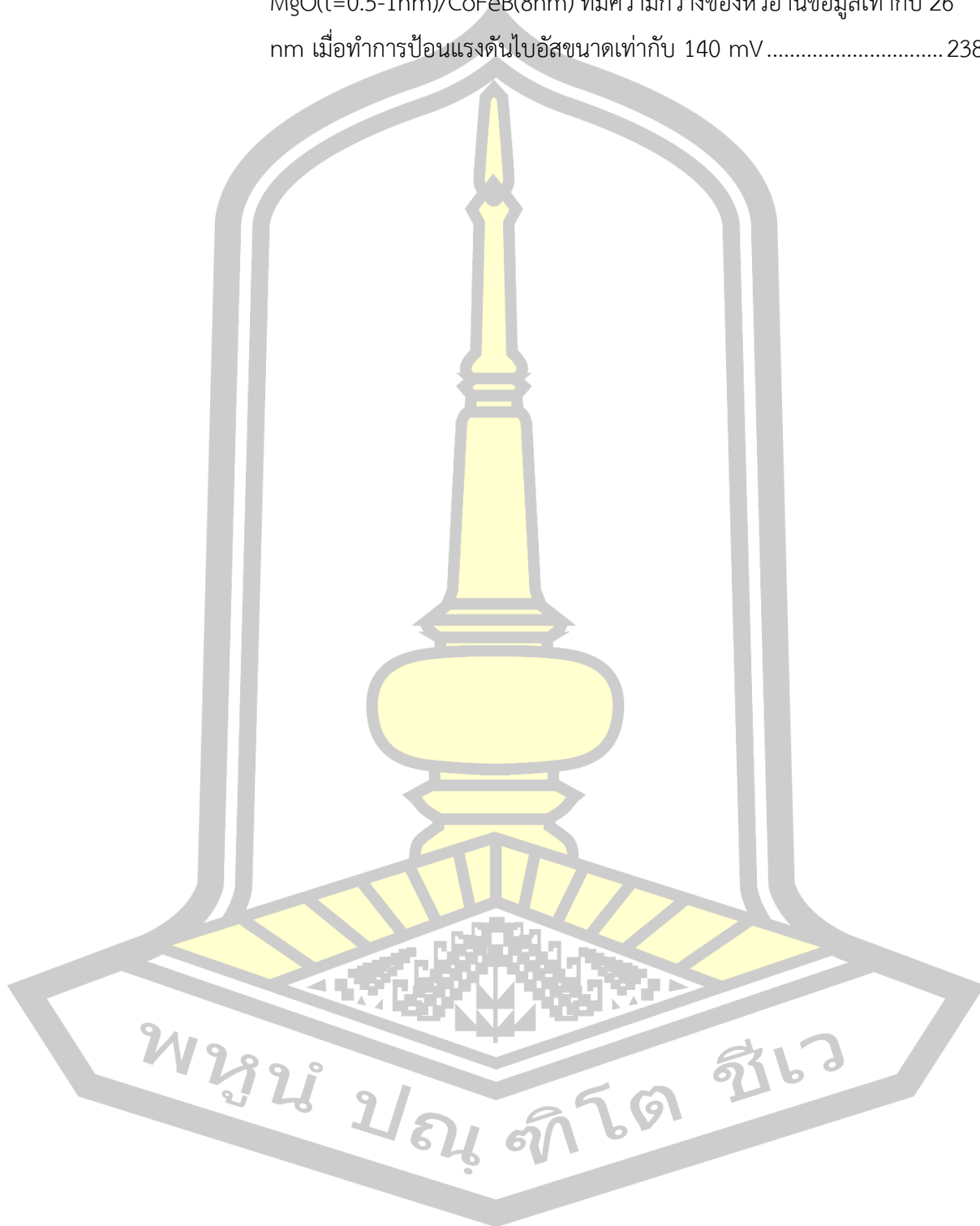
ภาพประกอบ 6.1 โครงสร้างชั้นวัสดุ AF/SAF/SL/PL..... 252



สารบัญตาราง

| | | |
|-----------|--|-----|
| ตาราง 4.1 | ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 139 |
| ตาราง 4.2 | ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 140 |
| ตาราง 4.3 | ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 160 |
| ตาราง 4.4 | ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 161 |
| ตาราง 5.1 | ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL | 202 |
| ตาราง 5.2 | ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองสำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน..... | 203 |
| ตาราง 5.3 | ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ CoFe และวัสดุ Cu | 204 |
| ตาราง 5.4 | ผลการเปรียบเทียบค่า MR ระหว่างแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอม..... | 213 |
| ตาราง 5.5 | RW CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า $RA = 0.4 \Omega \cdot \mu m^2$ | 232 |
| ตาราง 5.6 | RA CoFeB(3nm)/MgO(t=0.5-1nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า RW = 26 nm | 232 |
| ตาราง 5.7 | ผลการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าเฉลี่ยของโครงสร้าง CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า $RA = 0.4 \Omega \cdot \mu m^2$ เมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสขนาดเท่ากับ 140 mV..... | 235 |

ตาราง 5.8 ผลการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าเฉลี่ยของโครงสร้าง CoFeB(3nm)/MgO(t=0.5-1nm)/CoFeB(8nm) ที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 26 nm เมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสขนาดเท่ากับ 140 mV 238



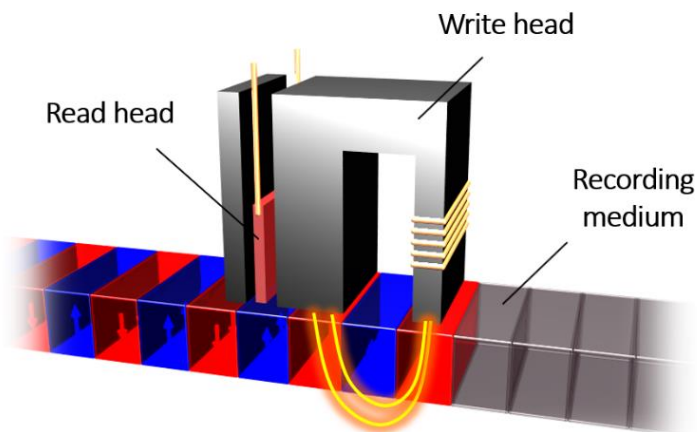
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล (data storage technologies) เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD) ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำหลักสำหรับคอมพิวเตอร์ แต่เนื่องด้วยการสร้างสื่อและข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำได้โดยง่ายในปัจจุบันส่งผลทำให้ความต้องการใช้งานพื้นที่จัดเก็บข้อมูล (areal density, AD) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นสาเหตุทำให้การจัดเก็บข้อมูลภายในหน่วยความจำหลักของคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานของผู้บริโภค ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีคลาวด์ (cloud technology) หรือการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (cloud computing) ที่เปรียบเสมือนศูนย์ข้อมูลคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ (data center) เพื่อรองรับการใช้งาน การประมวลผล ตลอดจนการจัดเก็บข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตซึ่งช่วยให้ผู้บริโภคสามารถจัดเก็บข้อมูลได้อย่างถาวรและไม่เกิดการสูญหาย อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีคลาวด์ยังคงมีความจำเป็นจะต้องใช้แหล่งจัดเก็บข้อมูลหรือเซิร์ฟเวอร์ (servers) ขนาดใหญ่ที่ใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหน่วยความจำหลักในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อให้สามารถรองรับข้อมูลจำนวนมากมหาศาลที่จะถูกนำเข้าสู่ระบบได้ เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีราคาต่อหน่วยพื้นที่ที่ค่อนข้างต่ำ ไม่มีขีดจำกัดในการเขียนข้อมูลซ้ำ และมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างยาวนาน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลรูปแบบอื่น เช่น โซลิดสเตทไดรฟ์ (solid state drives, SSD) [1], [2] และหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปินทอร์ก (spin-transfer torque magnetoresistive access memory, STT-MRAM) [3], [4] เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีพื้นที่จัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่อุปกรณ์ถูกจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลงและมีราคาต่อหน่วยพื้นที่ลดลงจะช่วยให้สามารถตอบโจทย์ความต้องการใช้งานอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตได้

สำหรับองค์ประกอบหลักที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประกอบด้วย แผ่นบันทึกข้อมูล (recording medium) ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บข้อมูล หัวเขียนข้อมูล (write head) ซึ่งทำหน้าที่เขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล และหัวอ่านข้อมูล (read head) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณจากแผ่นบันทึกข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 1.1 องค์ประกอบหลักทั้งสามส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กในการเขียน อ่าน และจัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบถาวร



ภาพประกอบ 1.1 องค์ประกอบหลักและลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือการพัฒนาในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูลเนื่องจากค่าความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะขึ้นอยู่กับขนาดของบิตข้อมูล (data bits, a_0) ซึ่งแสดงถึงกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grains) ที่มีการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันไปในทิศทางเดียวกันตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกจากหัวเขียนข้อมูลเรียกว่า โดเมนเดี่ยว (single domain) ถ้าบิตข้อมูลมีขนาดเล็กลงจะทำให้สามารถเพิ่มค่าความจุข้อมูลได้สูงขึ้นเนื่องจากความกว้างของบิตข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ดังสมการ [5]

$$a_0 \cong \sqrt{0.35a_{wc}^2 + \left(\frac{D_{av}}{2}\right)^2} \quad (1.1)$$

เมื่อ a_{wc} คือ ค่าคงที่ William-Comstock transition [5]

D_{av} คือ ขนาดของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ย (average magnetic grain diameter)

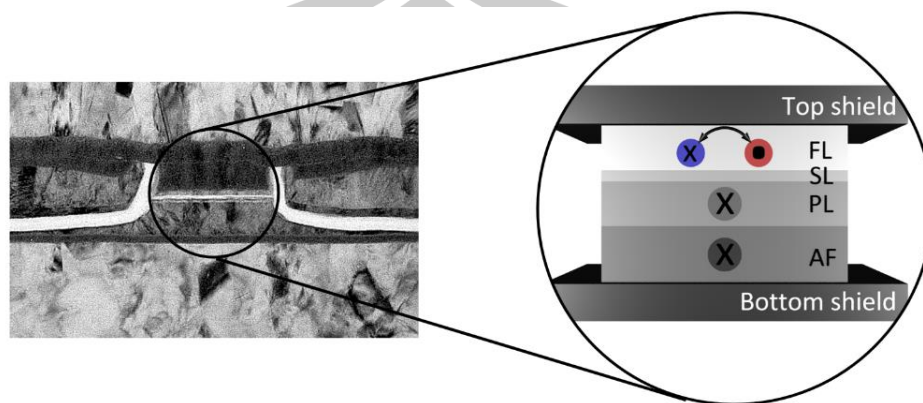
ดังนั้นการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กหรือขนาดของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มค่าความจุฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากหรือแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (perpendicular recording media) [6], [7] ที่มีลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยการเพิ่มพื้นที่ความจุข้อมูลให้มีค่ามากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbits/in²) จำเป็นจะต้องจำกัดขนาดของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยภายในแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีค่าน้อยกว่า 7 นาโนเมตร (nanometer, nm) [7], [8] ซึ่งนำไปสู่ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้าน (trilemma problem) ได้แก่ ความเสถียร

ทางความร้อน (thermal stability) ความสามารถในการเขียน (writability) และอัตราของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) [7], [9] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการนำเสนอเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ยังคงมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการใช้งานอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบบิต (bit-patterned recording media) [10], [11] เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วย (heat assisted magnetic recording media, HAMR) [12] และเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย (microwave assisted magnetic recording media, MAMR) [13] เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก เช่น การลดขนาดของเกรนแม่เหล็ก การลดความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็ก และลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก เป็นต้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลในขณะที่แผ่นบันทึกข้อมูลยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพทางความร้อนไว้ได้นั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

สำหรับโครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือโครงสร้างสปินวาล์ว (spin-valve geometry) จะประกอบด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้นแบ่งออกเป็นชั้นพิน (pinned layer, PL) และชั้นฟรี (free layer, FL) ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (non-magnetic material) หรือชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer, SL) โดยแมกนีไทเซชันในชั้น PL จะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ออกจากบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 1.2 เมื่อเกราะด้านบน (top shield) และเกราะด้านล่าง (bottom shield) ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลข้างเคียง (stray field) [14] กระทบต่อหัวอ่านข้อมูลในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล [15] การกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ให้มีทิศทางที่แน่นอนสามารถทำได้โดยการนำเอาชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) มาเชื่อมติดกับชั้น PL ซึ่งถูกเรียกรวมกันว่า ชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias layer) เพื่ออาศัยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุหรือ ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [16]–[19] ในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นในชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop displacement) ออกจากแกนสมมาตรโดยความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนสามารถอธิบายได้จากปริมาณที่ถูกระบุว่า ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias field, H_{EB})

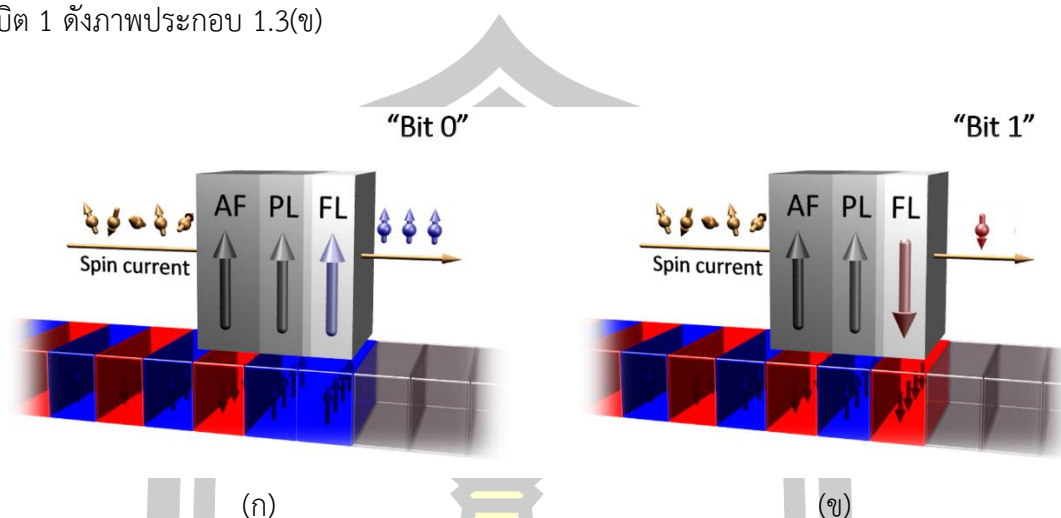
ซึ่งนิยามจากค่าสนามแม่เหล็กภายนอก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของลู่วางปิดฮิสเทอรีซิสที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตร



ภาพประกอบ 1.2 ภาพถ่ายบนระนาบ (in-plane) ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้านที่รับกับแผ่นบันทึกข้อมูล (air-bearing surface, ABS) โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) [20] และแผนภาพโครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้าน ABS

กระบวนการอ่านข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านข้อมูลและบิตข้อมูลที่ต้องการอ่านเคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งตรงกันทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FL มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางการเหนี่ยวนำของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ที่ออกจากบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน ในขณะเดียวกันจะต้องทำการจ่ายแรงดันไบอัส (bias voltage) เข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า (electrical current) ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งนำไปสู่การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) โดยอาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance) [21] และปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กจากการทะลุผ่าน (tunneling magnetoresistance) [22] โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าแปรผันตามลักษณะการจัดเรียงทิศทางการเหนี่ยวนำในชั้น PL และชั้น FL [15], [23], [24] จากนั้นค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะถูกทำการขยายสัญญาณและอ่านข้อมูลออกมาในลักษณะไบนารีบิต (binary bits) หรือบิต 0 และบิต 1 ยกตัวอย่างในกรณีที่ทิศทางการเหนี่ยวนำในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (parallel orientation) จะให้ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้าที่มีค่าต่ำและแสดงบิต 0 ดังภาพประกอบ 1.3(ก) แต่ในกรณีที่ทิศทางการเหนี่ยวนำในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวใน

ทิศทางตรงกันข้าม (antiparallel orientation) จะให้ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้าที่มีค่าสูงและแสดง บิต 1 ดังภาพประกอบ 1.3(ข)

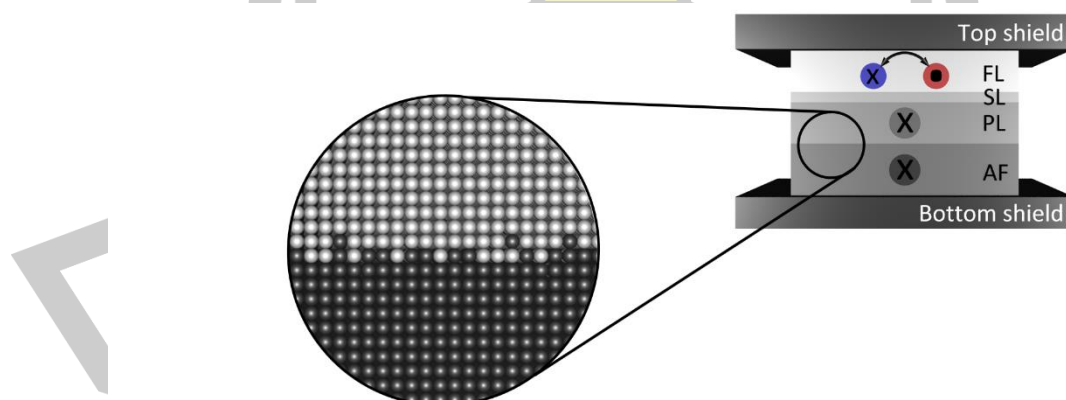


ภาพประกอบ 1.3 ลักษณะการทำงานของหัวอ่านข้อมูลเมื่อแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการ (ก) จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและ (ข) จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ให้มีทิศทางที่แน่นอนมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น PL ทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล อย่างไรก็ตามเมื่อเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลถูกจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลงส่งผลทำให้มีความจำเป็นต้องลดขนาดขององค์ประกอบทุกส่วนภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งรวมไปถึงขนาดของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ที่ถูกใช้สำหรับการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ภายในหัวอ่านข้อมูล การลดขนาดของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF เป็นการลดค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ใช้ในการรักษาทิศทางของตนเองและยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL โดยทั่วไปแล้วค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในชั้น AF จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_{AF}) และปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF (grain volume, V_{AF}) [25] กล่าวคือ $E_{AF} = K_{AF}V_{AF}$ ดังนั้นเมื่อ V_{AF} มีค่าลดลงจะทำให้เกิดโอกาสที่พลังงานความร้อนของระบบสามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ได้และนำไปสู่การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันเนื่องจากเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ขาดเสถียรภาพทางความร้อน (thermal instability) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยของเฟอร์นันเดซและคณะ (L. E. Fernandez-Outon *et al.*) [26] ที่ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนภายในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe และ FeMn/NiFe ที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อขนาดของระบบเล็กลงจะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF ขาดความสามารถในการยึดทิศทางของ

แมกนีไทเซชันในชั้น PL และทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น PL มีทิศทางที่ไม่แน่นอนซึ่งนำไปสู่การเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านการทดลอง [27]–[32] และด้านทฤษฎี [33]–[38] โดยเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีอย่างง่าย (simple theoretical model) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบจำลองในระดับจุลภาค (micromagnetic model) ที่พิจารณาให้จำนวนของแมกนีไทเซชันแทนด้วยจำนวนเกรนทั้งหมดภายในระบบ เพื่อใช้สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF และชั้น FM [35], [36], [38] อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยละเลยผลการพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก (intergranular exchange field) สนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing field) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้พิจารณาให้ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีการจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกันทั้งหมดมีลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่าลักษณะพื้นผิวบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุจะมีความไม่ราบเรียบ (roughed interface) แสดงดังภาพประกอบ 1.4 เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอริง (sputtering process) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน (easy axis distribution) ภายในชั้น AF และชั้น FM [39]

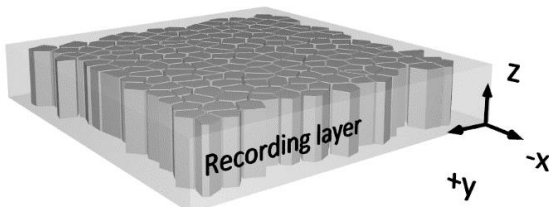


ภาพประกอบ 1.4 โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ด้านที่รับกับแผ่นบันทึกข้อมูลและลักษณะความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AF และชั้น FM

แม้ว่าแบบจำลองโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกนำเสนอขึ้น [33]–[38] สามารถอธิบายผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้สอดคล้องผลการทดลองและทฤษฎีพื้นฐานของ

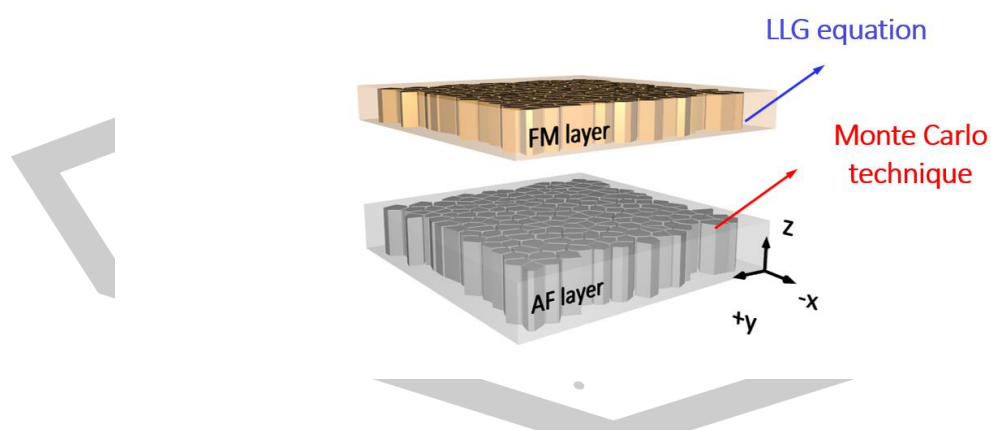
ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้โดยเฉพาอย่างยิ่งในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในระดับจุลภาค (microscale) อย่างไรก็ตามเมื่อระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นถูกจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโน (nanoscale) พบว่าแบบจำลองในระดับจุลภาคทั่วไปขาดความแม่นยำในการคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้ไม่สามารถพิจารณาผลของปริมาณสนามแม่เหล็กที่สำคัญและผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลได้

งานวิจัยนี้จะได้ทำการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นหรือแบบจำลองแกรนูลาร์ (granular micromagnetic model) สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแสดงดังภาพประกอบ 1.5 เพื่อใช้สำหรับการออกแบบและศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetic properties) และลักษณะเฉพาะของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ (media characterisation) [40] โดยโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากจะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมโวโรนอย (Voronoi construction) [41] แบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นนี้จะได้อาศัยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo approach) [42], [43] ที่สามารถพิจารณาให้ช่วงเวลา (timescale) ในการคำนวณมีความสอดคล้องกับระยะเวลาจริงที่ใช้วัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กและลักษณะเฉพาะของแผ่นบันทึกข้อมูลในเชิงการทดลองได้ นอกจากนี้ยังได้รวมผลของปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก ได้แก่ สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กหักล้าง การกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก (grain size distribution) และการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน เป็นต้น เพื่อให้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความเสมือนจริงมากที่สุด จากนั้นจะทำการกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กและออกแบบลักษณะเฉพาะของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากเพื่อใช้สำหรับการอธิบายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลผ่านการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสหรือเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (magnetization curve) และค่าสนามหมุนกลับ (switching field, H_{sw}) ตามลำดับ



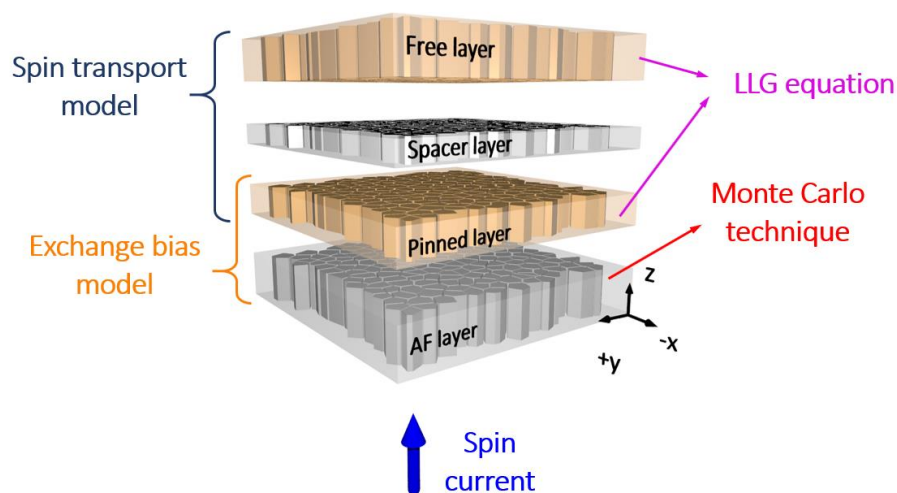
ภาพประกอบ 1.5 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นที่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล

อย่างไรก็ตามแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้ทำการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นหรือแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนเพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ โดยในลำดับแรกจะได้ทำการประยุกต์ใช้โปรแกรมไวโรนอยในการจำลองโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในลักษณะแผ่นฟิล์มบางสองชั้นที่ประกอบไปด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากซึ่งถูกจัดวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกันแบบคอลัมน์นาร์ (columnar stack) แสดงดังภาพประกอบ 1.6 สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM จะได้เลือกใช้วิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการแลนดอว์ – ลิฟท์ชิต – กิลเบิร์ต (Landau – Lifshitz – Gilbert equation, LLG) ตามลำดับ [35], [36] เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังได้รวมผลของปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเพื่อให้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความเสมือนจริงมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กหักล้าง สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field) การกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก และการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน เป็นต้น จากนั้นจะได้ทำการกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กและออกแบบลักษณะเฉพาะของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเพื่อใช้ในการอธิบายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนและศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB}



ภาพประกอบ 1.6 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/FM ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

นอกจากนี้ยังจะได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกล (multiscale model) สำหรับหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL โดยการเชื่อมโยงแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ร่วมกับแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalized spin accumulation model) ซึ่งถูกนำเสนอขึ้นโดยจูริมาศและคณะ (P. Chureemart et al.) [44], [45] เพื่อจำลองลักษณะการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในขณะที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยพิจารณาผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนร่วมด้วยแสดงดังภาพประกอบ 1.7 เนื่องจากในแบบจำลองอื่นๆ ที่ใช้โดยทั่วไปจะพิจารณาเพียงองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเพียงสามชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ PL/SL/FL เท่านั้น [45]



ภาพประกอบ 1.7 โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

สำหรับแบบจำลองแบบมัลติสเกลที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน (spin transport behavior) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการคำนวณค่าการสะสมสปิน (spin accumulation) ค่ากระแสสปิน (spin current) ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) และค่าอัตราส่วนความต้านทานทางแม่เหล็ก (MR ratio) ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความเสมือนจริงเนื่องจากผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เช่น ผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ผลของการป้อนกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูล และผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL เป็นต้น ในลำดับสุดท้ายผลการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเสมือนจริงโดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอม

(atomistic model) [46] และผลการทดลองวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบมัลติสเกลที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยผลการศึกษานี้จะนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพขององค์ประกอบฮาร์ดดิสก์-ไดรฟ์ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นหรือแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก
2. สร้างแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นหรือแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
3. สร้างแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นหรือแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. จำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นและโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยโดยมีพื้นฐานตามแบบจำลองแกรนูลาร์ซึ่งเป็นวิธีการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในระดับจุลภาคแบบมาตรฐาน (standard micromagnetic model) ที่พิจารณาให้จำนวนของแมกนีไทเซชันแทนด้วยจำนวนเกรนทั้งหมดภายในระบบ
2. ศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุโคบอลต์แพลตทินัม (cobalt platinum, CoPt) โดยใช้วิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ และประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt และผลการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt เช่น ผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ขนาดและความหนาของเกรนแม่เหล็ก รวมทั้งลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนภายในระบบ เป็นต้น

3. พิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF โดยใช้วิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM โดยใช้สมการ LLG เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่แตกต่างกัน และประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน ได้แก่ ผลของปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีในชั้น AF ผลของอุณหภูมิ ขนาดและความหนาของชั้น AF และชั้น FM เป็นต้น

4. ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ได้นำเอาแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนมาใช้ร่วมกับแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เช่น ค่าการสะสมสปิน ค่ากระแสสปิน และค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก เป็นต้น เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถสร้างแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลและทำนายคุณสมบัติพื้นฐานรวมทั้งข้อจำกัดของพารามิเตอร์แต่ละชนิดสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากได้

2. สามารถสร้างแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนและประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและผลการออกแบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน รวมไปถึงเสถียรภาพทางความร้อนของชั้น AF ภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3. สามารถสร้างแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้และนำไปเป็นต้นแบบของการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในปัจจุบันอุปกรณ์การจัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็ก เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD) และหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistive random access memory, MRAM) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เมื่อความต้องการในการใช้งานอุปกรณ์การจัดเก็บข้อมูลเพิ่มสูงขึ้นทำให้การเพิ่มขนาดพื้นที่จัดเก็บข้อมูลและการลดขนาดของอุปกรณ์ได้รับการพัฒนาในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามการพัฒนาความสามารถของอุปกรณ์เหล่านี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยความเข้าใจกลไกทางฟิสิกส์และคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความเป็นมาของเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและองค์ประกอบที่สำคัญภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนข้อมูล และหัวอ่านข้อมูล นอกจากนี้จะได้อธิบายถึงสมบัติพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ ประเภทของวัสดุแม่เหล็ก ค่าพลังงานพื้นฐานเชิงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาภายในวัสดุและปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาคูสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลและปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนรวมถึงพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในบทถัดไป

2.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของคอมพิวเตอร์เนื่องจากมีหน้าที่หลักในการจัดเก็บข้อมูลภายในคอมพิวเตอร์ ในปัจจุบันพบว่าการพัฒนาอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีพื้นที่จัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่มีราคาต่อหน่วยพื้นที่ลดลงสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เพิ่มสูงขึ้นของผู้บริโภคได้เป็นอย่างมาก ในการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องลดขนาดขององค์ประกอบทุกส่วนลง โดยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประกอบด้วยสามองค์ประกอบสำคัญคือ แผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนข้อมูล และหัวอ่านข้อมูล แผ่นบันทึกข้อมูลมีหน้าที่จัดเก็บข้อมูลให้มีอายุการใช้งานยาวนานโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ถูกเรียกว่า แมกนีไทเซชัน (magnetization, M) สำหรับหัวเขียนข้อมูลมีหน้าที่ในการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลโดยการสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกและอาศัยคุณสมบัติการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กเพื่อเปลี่ยนแปลงการจัดเรียง

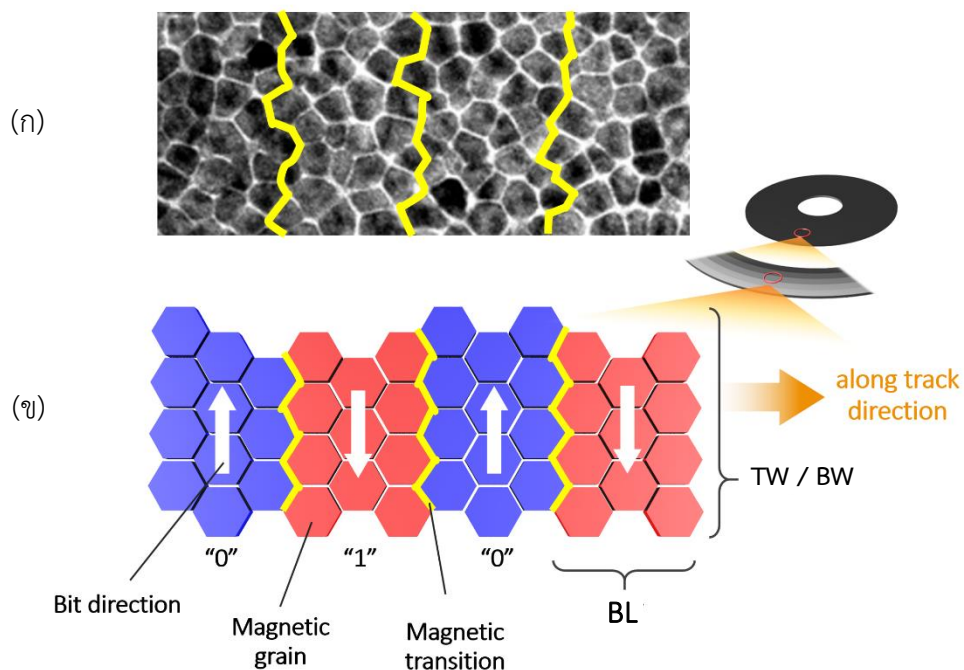
ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล หัวอ่านข้อมูลมีหน้าที่ในการอ่านค่าสัญญาณที่วัดได้จากแผ่นบันทึกข้อมูลโดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงลักษณะโครงสร้าง กระบวนการทำงาน และวิวัฒนาการขององค์ประกอบทั้งสามส่วนภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 แผ่นบันทึกข้อมูล

แผ่นบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีลักษณะเป็นแผ่นจานหมุน (platter disk) ซึ่งทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็ก แผ่นบันทึกข้อมูลประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางหลายชั้นซึ่งถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการปลูกฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง (sputtering film growth process) [47] สำหรับชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลนั้นจะถูกเรียกว่า ชั้นบันทึกข้อมูล (recording layer) โดยทั่วไปแล้วชั้นบันทึกข้อมูลจะมีลักษณะเป็นสารประกอบโลหะเจือ (alloy compound) ที่มีวัสดุโคบอลต์ (cobalt, Co) ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เป็นสารประกอบหลัก เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้มีค่าความเป็นแม่เหล็กหรือค่าแอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_U) ที่สูงประมาณ $K_U \sim 10^5 - 10^6$ เอิร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (erg/cm^3) ทำให้ชั้นบันทึกข้อมูลสามารถคงสภาพความเป็นแม่เหล็กและจัดเก็บข้อมูลได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน [9] ยกตัวอย่าง เช่น โคบอลต์โครเมียม (cobalt chromium, CoCr) โคบอลต์โครมแพลตทินัม (cobalt chromium platinum, CoCrPt) และโคบอลต์แพลตทินัม (cobalt platinum, CoPt) เป็นต้น

ลักษณะโครงสร้างภายในชั้นบันทึกข้อมูลจะประกอบด้วยเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) จำนวนมากที่ถูกคั่นกลางด้วยสารประกอบออกไซด์ (oxide compound) เช่น ซิลิกอนออกไซด์ (silicon oxides, SiO_2) แสดงดังภาพประกอบ 2.1(ก) เกรนแม่เหล็กเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นแทร็คข้อมูล (data tracks) จำนวนมากด้วยขนาดเท่ากับความกว้างของแทร็ค (track width, TW) ล้อมรอบแผ่นบันทึกข้อมูลโดยที่แต่ละแทร็คจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นบิตข้อมูล (data bits) ด้วยระยะห่างระหว่างบิตหรือรอยต่อแม่เหล็ก (magnetic transition) บิตข้อมูลที่ถูกแบ่งออกจะมีขนาดความกว้างของบิต (bit width, BW) และความยาวของบิต (bit length, BL) สัมพันธ์กับความกว้างของแทร็คข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 2.1(ข) โดยทั่วไปแล้วการพิจารณาความหนาแน่นของข้อมูล (areal density, AD) ภายในแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกแสดงในหน่วยของจำนวนบิตข้อมูลต่อตารางนิ้ว (bits/in^2) เนื่องจากผลคูณของจำนวนแทร็คต่อนิ้ว (track per inch, TPI) และจำนวนบิตข้อมูลต่อนิ้ว (bit per inch, BPI) [15] สำหรับบิตข้อมูลแต่ละบิตที่ถูกแบ่งออกจะถูกใช้สำหรับกระบวนการจัดเก็บข้อมูลในลักษณะบิต 0 และ 1 โดยลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน

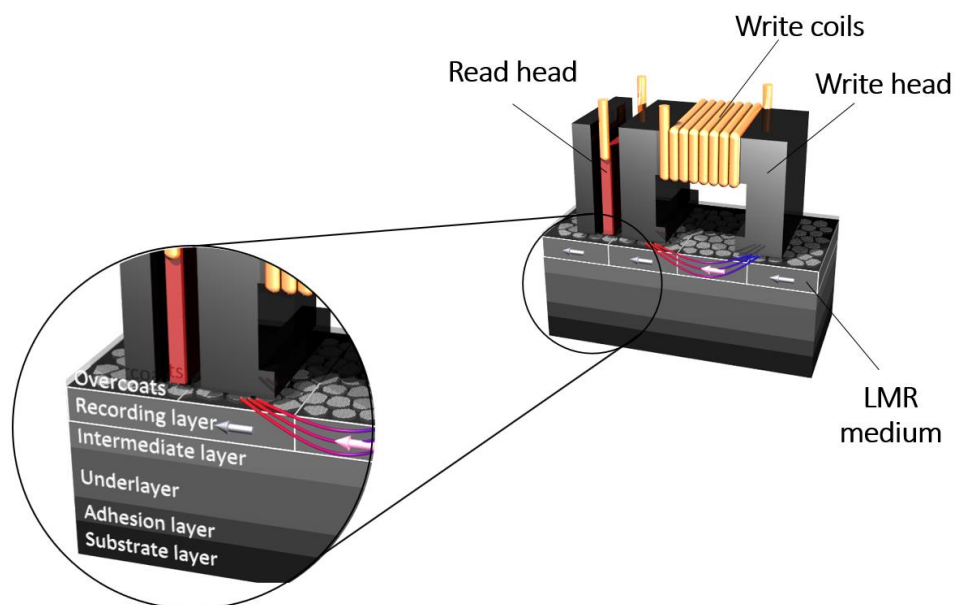
ภายในบิตข้อมูลหรือทิศทางของบิตข้อมูล (bit direction) ถูกนำมาใช้ในการจำแนกประเภทของแผ่นบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบคือ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาว (longitudinal magnetic recording media, LMR) [6] และแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording media, PMR) [9]



ภาพประกอบ 2.1 (ก) ภาพถ่ายระนาบของชั้นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [48] และ (ข) แผนภาพอย่างง่ายและตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล

แผ่นบันทึกข้อมูลในยุคแรกถูกเรียกว่า แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาว เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางในแนวตามยาวและขนานกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 2.2 แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวถูกประกอบขึ้นด้วยชั้นฟิล์มบางจำนวนหลายชั้นแบ่งออกได้เป็น ชั้นแผ่นฐาน (substrate layer) ชั้นยึดเกาะ (adhesion layer) ชั้นอินเตอร์เลเยอร์ (underlayer) ชั้นกึ่งกลาง (intermediate layer) ชั้นบันทึกข้อมูล (recording layer) และชั้นป้องกัน (overcoat layer) แสดงดังภาพประกอบ 2.2 โดยชั้นฟิล์มบางแต่ละชั้นจะมีลำดับการสร้างและมีหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังนี้ [49], [50]

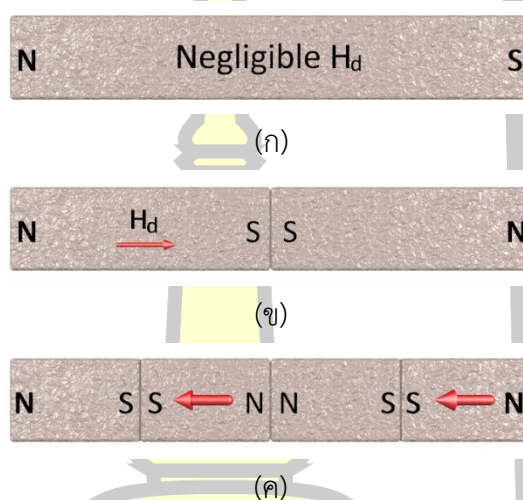
แผ่นฐานจะถูกสร้างขึ้นเป็นลำดับแรกเพื่อลดการปนเปื้อนของสารชนิดอื่นภายในระบบ ก่อนทำการปลูกฟิล์มบางชั้นอื่นๆ ในลำดับต่อมาชั้นยึดเกาะจะถูกสร้างขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางชั้นอื่นๆ ให้เข้ากับแผ่นฐานได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นชั้นแอนเดอร์เลเยอร์จะถูกสร้างขึ้นเพื่อช่วยในการควบคุมขนาดของเกรนแม่เหล็กในชั้นบันทึกข้อมูล ภายหลังจากนั้นชั้นกึ่งกลางจะถูกสร้างขึ้นสำหรับการจัดเตรียมรอยต่อ (buffer interface) เพื่อช่วยให้สามารถปลูกฟิล์มของชั้นบันทึกข้อมูลที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหกด้านแบบปิด (hexagonal closed pack, hcp) ในแนวระนาบกับแผ่นฟิล์มได้ ต่อมาชั้นบันทึกข้อมูลจะถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ในการเก็บรักษาข้อมูล ในลำดับสุดท้ายชั้นป้องกันจะถูกสร้างขึ้นจากสารจำพวกคาร์บอนเพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อชั้นบันทึกข้อมูลเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reactions) และผลกระทบเชิงกลเนื่องจากกระบวนการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



ภาพประกอบ 2.2 แผนภาพอย่างง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลายชั้นที่มีคุณสมบัติและหน้าที่แตกต่างกัน

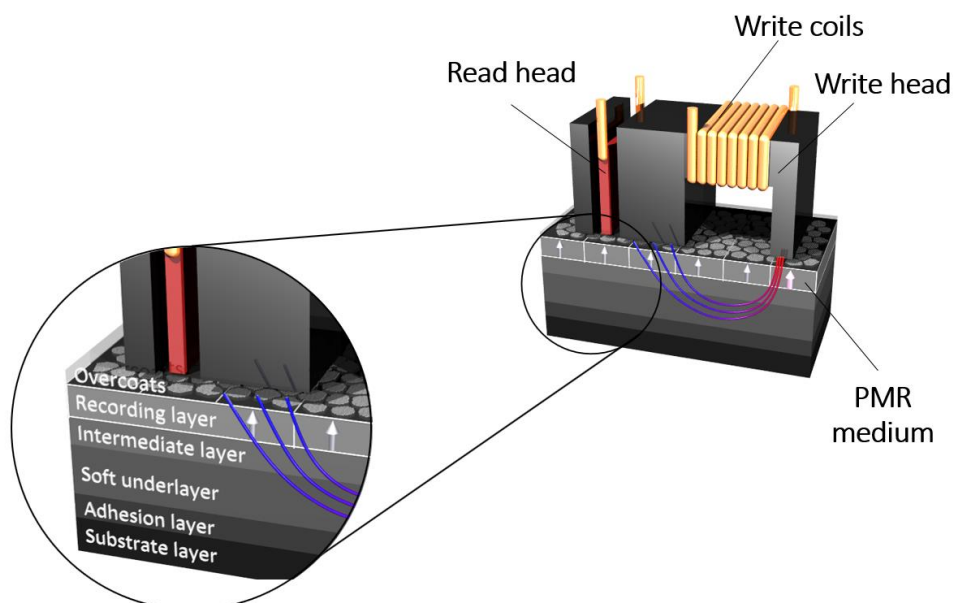
ในช่วงแรกของการประยุกต์ใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวที่มีค่าความกว้างของบิตข้อมูลสูงพบว่าไม่มีผลของปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุ (self-demagnetizing field) เกิดขึ้นภายในระบบเนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กมีค่ามากแสดงดังภาพประกอบ 2.3(ก) แต่เมื่อต้องการเพิ่มพื้นที่ความจุข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่งผลทำให้มีความจำเป็นจะต้องลดขนาดของบิตข้อมูลหรือขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลลง แม้ว่าการลดขนาดของบิตข้อมูลจะช่วยในการเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่กลับพบว่าระยะห่างระหว่าง

ขั้วแม่เหล็กภายในบิตข้อมูลที่อยู่ใกล้กันมากจนเกินไปส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของบิตข้อมูลแสดงดังลูกศรสีแดงในภาพประกอบ 2.3(ข) และ (ค) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่สูงในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูลและทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในกระบวนการอ่านข้อมูล ข้อจำกัดทางกายภาพ (physical limits) ของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวนำไปสู่การพัฒนาโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลให้กลายเป็นแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากในภายหลังซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดต่อไป



ภาพประกอบ 2.3 แผนภาพอย่างง่ายของชั้นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวที่พิจารณาผลของปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุใน (ก) ระบบที่ไม่มีการแบ่งบิตข้อมูล (ข) ระบบที่มีความหนาแน่นของบิตข้อมูลต่ำและ (ค) ระบบที่มีความหนาแน่นของบิตข้อมูลสูง [9]

แผ่นบันทึกข้อมูลในปัจจุบันถูกเรียกว่า แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก เนื่องจากมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยอิวาซากิและคณะ (S. Iwasaki *et al.*) ในปี ค.ศ. 1975 [51]–[53] แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากถูกประกอบขึ้นด้วยชั้นฟิล์มบางจำนวนหลายชั้น คล้ายคลึงกับชั้นบันทึกข้อมูลแบบตามยาว แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นบันทึกข้อมูลให้มีทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฟิล์มส่งผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นฟิล์มบางที่ถูกเรียกว่า ชั้นซอฟต์แวร์อันเดอร์เลย์ (soft underlayer) ไว้ระหว่างชั้นยึดเกาะและชั้นกึ่งกลางแสดงดังภาพประกอบ 2.4 เพื่อช่วยเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้สำหรับการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลเนื่องจากชั้นซอฟต์แวร์อันเดอร์เลย์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำได้ง่าย (soft magnetic material) ยกตัวอย่างเช่น นิกเกิลเหล็ก (nickel iron, NiFe) [9] โคบอลต์เหล็กโบรอน (cobalt iron boron, CoFeB) [54] เป็นต้น

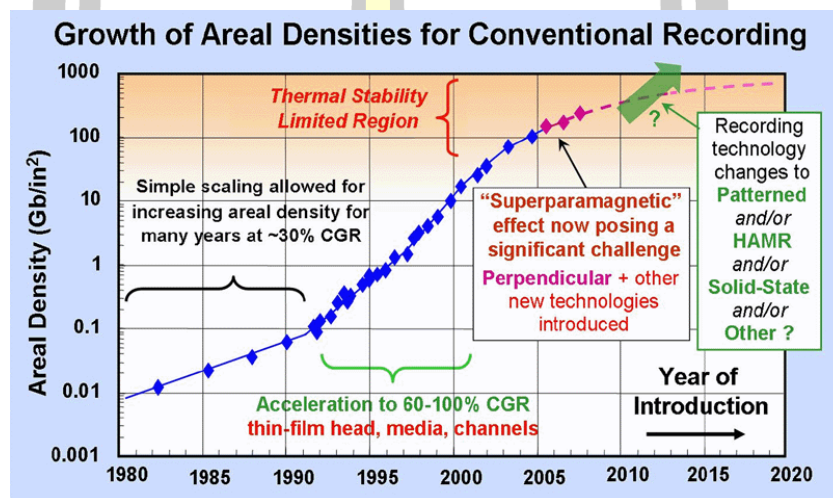


ภาพประกอบ 2.4 แผนภาพอย่างง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลายชั้นที่มีคุณสมบัติและหน้าที่แตกต่างกัน

การปรับลดขนาดของเกรนแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กมากจนเกินไปเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาการแปรสภาพของวัสดุแม่เหล็กจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกลายเป็นวัสดุพาราแมกเนติกซึ่งถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic effect) เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนภายนอกที่ส่งผลทำให้เกรนแม่เหล็กขาดเสถียรภาพทางความร้อนและไม่สามารถคงสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้ ทำให้มีการเพิ่มค่าพลังงานในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันโดยการเจือสารแพลตตินัม (platinum, Pt) เข้าสู่โครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลนำไปสู่ปัญหาในการเขียนข้อมูล (writability) ที่ต้องใช้สนามเขียน (writing field) ที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูล ส่งผลทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูลนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราของบิตผิดพลาด (bit error rate, BER) ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งส่งผลให้อัตราของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) มีค่าลดลง ปัญหาทั้งหมดดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ถูกเรียกรวมกันว่า ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้าน (trilemma problem) ได้แก่ ความเสถียรทางความร้อน ความสามารถในการเขียน และอัตราของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน [6], [7], [9]

จากปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้านทำให้มีการออกแบบและพัฒนา ลักษณะโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลจากแบบชั้นเดียวกลายเป็นลักษณะโครงสร้างแบบหลายชั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น ชั้นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องควบคู่ (coupled granular

continuous layer, CGC) [55]–[57] ชั้นบันทึกข้อมูลแบบควบคู่แลกเปลี่ยน (exchange coupled composite layer, ECC) [58], [59] และชั้นบันทึกข้อมูลแบบผสม (ECC/CGC layer) [60]–[63] เป็นต้น โดยในปัจจุบันพบว่าชั้นบันทึกข้อมูลแบบผสมถูกใช้เป็นตัวแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากเนื่องจากสามารถลดปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้านได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นบันทึกข้อมูลรูปแบบอื่นๆ [60] สำหรับรายละเอียดของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแต่ละประเภทที่ได้กล่าวมานี้จะถูกอธิบายไว้ในบทถัดไป



ภาพประกอบ 2.5 วิวัฒนาการของแผ่นบันทึกข้อมูลและอัตราการขยายตัวของพื้นที่จัดเก็บข้อมูลนับตั้งแต่ยุคแรกเริ่มที่มีการใช้งานหน่วยความจำฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จนถึงปัจจุบัน [64]

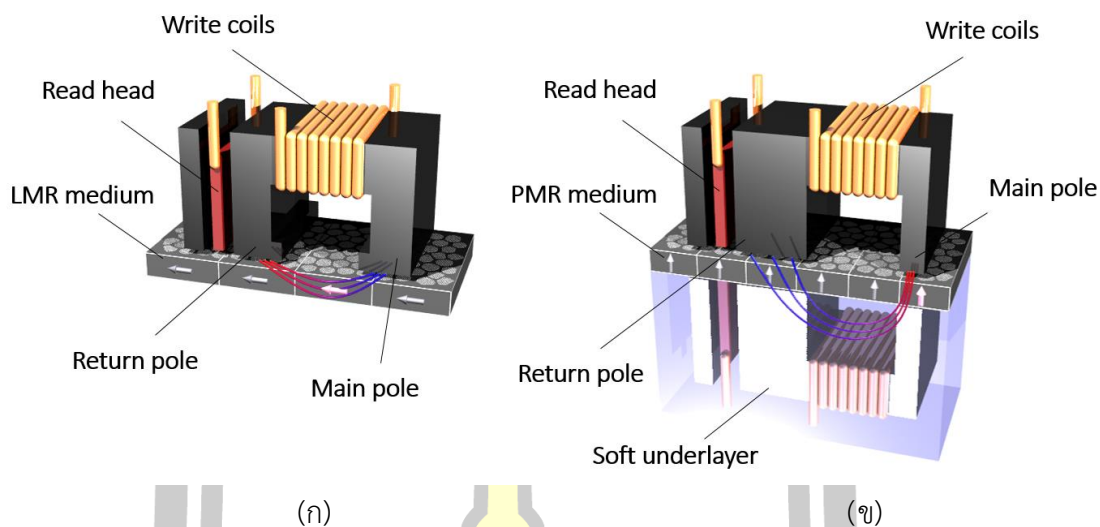
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวให้กลายเป็นแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากไม่เพียงแต่ช่วยแก้ไขปัญหาคอขวดในการเขียนและการอ่านข้อมูลแต่ยังช่วยในการพัฒนาความสามารถในการจุข้อมูลได้เพิ่มมากขึ้นอีกเป็นหลายเท่าตัว ภาพประกอบ 2.5 แสดงให้เห็นถึงอัตราการขยายตัวของพื้นที่จัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่แผ่นบันทึกข้อมูลแบบฟิล์มบางได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในปี ค.ศ.1980 ในรูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวและถูกปรับเปลี่ยนเป็นรูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากในภายหลัง โดยในปัจจุบันพบว่าอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งหมดยังคงมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก นอกจากนี้ยังได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อรองรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในอนาคตที่มุ่งเน้นการพัฒนาไปในส่วนของหัวเขียนข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วย (heat assisted magnetic recording media, HAMR) [12] และเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่น

ไมโครเวฟช่วย (microwave assisted magnetic recording media, MAMR) [13] เป็นต้น ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.1.2 หัวเขียนข้อมูล

หัวเขียนข้อมูลเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งทำหน้าที่เขียนข้อมูลลงบนบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนข้อมูลจะถูกเชื่อมติดอยู่กับหัวอ่านข้อมูลและเคลื่อนที่อยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูลด้วยระยะความสูงค่าหนึ่งที่ถูกเรียกว่า ระยะการบิน (flying height) ซึ่งในปัจจุบันถูกกำหนดให้มีความน้อยกว่า 5 nm [65] ในขณะเดียวกันนั้นแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกทำให้หมุนรอบแกนหมุน (spindle) ด้วยมอเตอร์เพื่อเคลื่อนบิตข้อมูลที่ต้องการบันทึกข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับหัวเขียนข้อมูล การเขียนข้อมูลลงบนบิตข้อมูลสามารถทำได้โดยการให้แรงดันไบอัสหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด (write coils) ที่พันล้อมรอบบริเวณหัวเขียนข้อมูลและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) [66] ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) จะมีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากขั้วหลัก (main pole หรือ trailing pole) ขึ้นอยู่กับทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดพันล้อมรอบบริเวณหัวเขียนข้อมูล เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเขียนข้อมูลจากบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน แผ่นบันทึกข้อมูลจะหมุนและเคลื่อนบิตข้อมูลต่อไปยังตำแหน่งของหัวเขียนข้อมูลเพื่อทำการเขียนข้อมูลจนครบทุกตำแหน่งเพื่อให้การบันทึกข้อมูลเป็นไปอย่างสมบูรณ์ หัวเขียนข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ หัวเขียนแบบวงแหวน (ring head) และหัวเขียนแบบขั้วเดี่ยว (monopole head) [65], [67]

หัวเขียนแบบวงแหวนเป็นหัวเขียนแบบดั้งเดิมที่ถูกใช้ในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบชั้นเดียวหรือแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวแสดงดังภาพประกอบ 2.6(ก) ซึ่งขั้วหลักและขั้วย้อนกลับจะถูกออกแบบให้มีขนาดที่เท่ากันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอสำหรับการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลแบบตามยาว แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลจากแบบตามยาวเป็นแบบตั้งฉากส่งผลทำให้มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของหัวเขียนข้อมูลตามไปด้วย เนื่องจากหัวเขียนแบบวงแหวนสามารถสร้างสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากได้ในปริมาณน้อยซึ่งไม่เพียงพอต่อการเหนี่ยวนำทิศทางของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก [65], [68] ในภายหลังจึงได้มีการพัฒนาหัวเขียนแบบขั้วเดี่ยวขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว



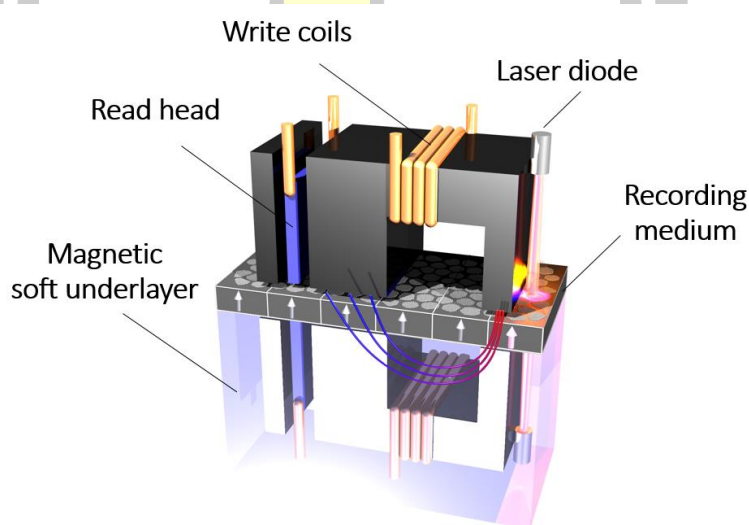
ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ (ก) หัวเขียนข้อมูลแบบวงแหวนบนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวและ (ข) หัวเขียนข้อมูลแบบขั้วเดียวบนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก

สำหรับหัวเขียนแบบขั้วเดียวจะมีลักษณะที่แตกต่างจากหัวเขียนแบบวงแหวนเนื่องจากขนาดของขั้วหัวเขียนถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าขั้วย้อนกลับและมีลักษณะคล้ายวงช้างแสดงดังภาพประกอบ 2.6(ข) เพื่อให้หัวเขียนข้อมูลสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงภายในวงจำกัดของบิตข้อมูลแบบตั้งฉากได้และเพื่อให้ขั้วย้อนกลับช่วยลดขนาดสนามแม่เหล็กภายหลังจากกระบวนการเขียนข้อมูลได้ สำหรับหัวเขียนแบบขั้วเดียวนี้ได้ถูกออกแบบให้ทำงานควบคู่กับชั้นสะท้อนกลับหรือชั้นซอฟต์แวร์อันเดอร์เลเยอร์ (soft underlayer) ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเขียนข้อมูล [9], [65], [67], [68]

การพัฒนาความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลโดยการเพิ่มปริมาณพลังงานที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันบิตนำไปสู่ปัญหาในการเขียนข้อมูลเนื่องจากขีดจำกัดของวัสดุแม่เหล็ก ทำให้มีการนำเสนอเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่มุ่งเน้นการพัฒนาไปในส่วนของการปรับเปลี่ยนรูปแบบของหัวเขียนข้อมูล ได้แก่ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วย [12] และการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย [13] ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วยถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 2006 โดยรอตเมเยอร์และคณะ (R. E. Rottmayer *et al.*) [12] เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลประเภทนี้จะอาศัยความร้อนจากเลเซอร์ไดโอด (laser diode) ซึ่งเชื่อมติดอยู่กับขั้วหัวเขียนข้อมูลเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับบิตข้อมูลในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กลงบนบิตข้อมูล และทำการบันทึกข้อมูล

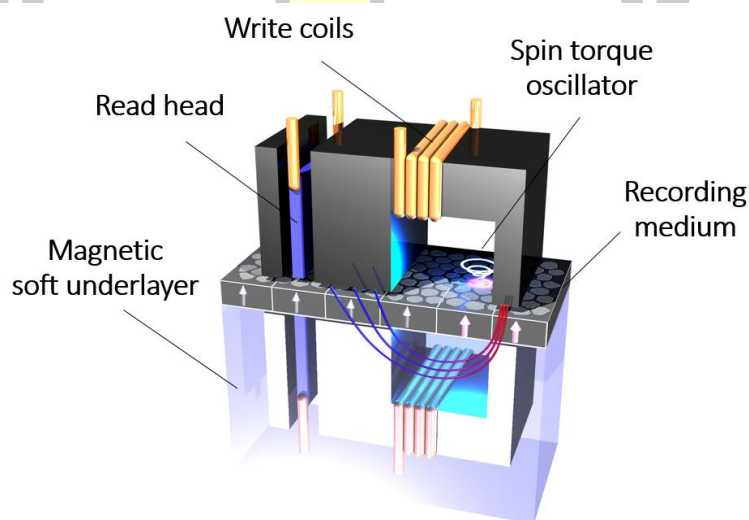
ลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลตามลำดับแสดงดังภาพประกอบ 2.7(ก) เนื่องจากแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีประเภทนี้มีพื้นฐานอยู่บนวัสดุแม่เหล็กไอรอนแพลตทินัม (Iron Platinum, FePt) ที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลสูงประมาณ $K_U \sim 7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ [69], [70] ทำให้ต้องใช้สนามเขียนหรือสนามหมุนกลับ (switching field, H_{sw}) ในปริมาณที่สูงขึ้นในการเขียนข้อมูลในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นการเพิ่มความร้อนค่าหนึ่งซึ่งใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) ไปยังบริเวณที่ต้องการเขียนข้อมูลจะช่วยลดค่าความเป็นแม่เหล็กของบิตข้อมูลและลดค่าเคอเออร์ซิวิตี (coercivity, H_C) ต่ำกว่าค่าสนามเขียนทำให้สามารถเขียนข้อมูลได้โดยใช้ปริมาณสนามเขียนที่ลดลง ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนข้อมูลได้ ภายหลังจากนั้นความร้อนจากเลเซอร์ไดโอดจะถูกกำจัดออกไปเพื่อให้อุณหภูมิภายในบิตข้อมูลมีค่าลดลงเข้าสู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ยังคงมีการป้อนสนามแม่เหล็กเพื่อให้แมกนีไทเซชันคงสภาพความเป็นแม่เหล็กตามทิศของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กด้วยสนามเขียนได้



ภาพประกอบ 2.7 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของแผ่นบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนช่วย

ในส่วนของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเป็นการอาศัยคลื่นความถี่ในระดับไมโครเวฟ (microwave frequency) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดสัญญาณสปิน-ทอร์ค (spin torque oscillator) ซึ่งเชื่อมติดอยู่กับหัวเขียนข้อมูลมาใช้ในการกระบวนการเขียนข้อมูล เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลประเภทนี้ถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 2008 โดยชูและคณะ (J. G. Zhu et

al.) [13] โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณสปินทอร์คจะช่วยทำให้แมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลเกิดการสั้นด้วยปริมาณสนามสลับจากคลื่นไมโครเวฟ (microwave alternating field หรือ localised ac field) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงหลายพันเออร์สเตด (Oersted, Oe) [13], [71] ที่ย่านความถี่สูงหลายสิบกิกะเฮิร์ตซ์ (gigahertz) [13] ปริมาณสนามสลับจากคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดให้กระทำกับบิตข้อมูลในทิศทางตั้งฉาก (orthogonal direction) กับทิศแกนง่าย (easy axis) ของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ในขณะที่สนามเขียนจะถูกป้อนเข้าสู่ชั้นบันทึกข้อมูลในทิศทางง่าย ด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้เกิดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบได้โดยง่ายแสดงดังภาพประกอบ 2.8 การบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยยังคงมีพื้นฐานอยู่บนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากซึ่งมีลักษณะเป็นสารประกอบโลหะเจือ CoPt ที่มีส่วนประกอบของแพลตทินัมมากขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีให้มีค่าสูงประมาณ $K_U \sim 1 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ [71] และเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาในด้านเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูล



ภาพประกอบ 2.8 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย

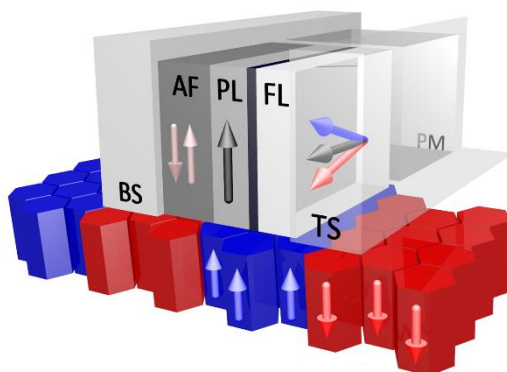
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลักที่สำคัญภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อรองรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในอนาคตนั้นจะมุ่งเน้นการพัฒนาไปในส่วนของหัวเขียนข้อมูล ในขณะที่ลักษณะของแผ่นบันทึกข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลนั้นยังคงมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะไม่ได้ออกไปถึงรายละเอียดของหัวเขียนข้อมูลรูปแบบใหม่เหล่านี้ แต่จะมุ่งเน้นไปในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

เพื่อใช้สำหรับการศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากและหัวอ่านข้อมูลเป็นหลักซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทถัดไป

2.1.3 หัวอ่านข้อมูล

หัวอ่านข้อมูลเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบหลักภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล โดยภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ เซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูล (read head sensor) ที่อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทาน (resistivity) ของวัสดุแม่เหล็กเนื่องจากผลของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกมาประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูล ในยุคแรกของประเทศเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistive effect) [72] และปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic magnetoresistive effect) [73], [74] ในการตรวจวัดสัญญาณทางแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูล

อย่างไรก็ตามภายหลังจากการค้นพบปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance) โดยบายบิชและคณะ (Baibich *et al.*) ในปี ค.ศ. 1988 [21] ทำให้มีการนำเสนอเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลแบบใหม่ซึ่งถูกเรียกว่า โครงสร้างสปินวาล์ว (spin-valve geometry) โดยดีนยและคณะ (B. Dieny *et al.*) ขึ้นในปี ค.ศ. 1991 [75] โครงสร้างสปินวาล์วแบบดั้งเดิม (conventional spin-valve geometry) [24], [75], [76] จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างวัสดุหลายชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) และชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้น ได้แก่ ชั้นพิน (pinned layer, PL) และชั้นฟรี (free layer, FL) ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic material) หรือชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer, SL) แสดงดังภาพประกอบ 2.9 โดยแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL จะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF และชั้น FM ซึ่งถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์ไบแอสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [16]–[19] เพื่อให้ชั้น PL ทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ที่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ออกจากบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ในขณะที่ชั้น SL จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL



ภาพประกอบ 2.9 โครงสร้างสปีนวาล์วแบบดั้งเดิมที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL บนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก

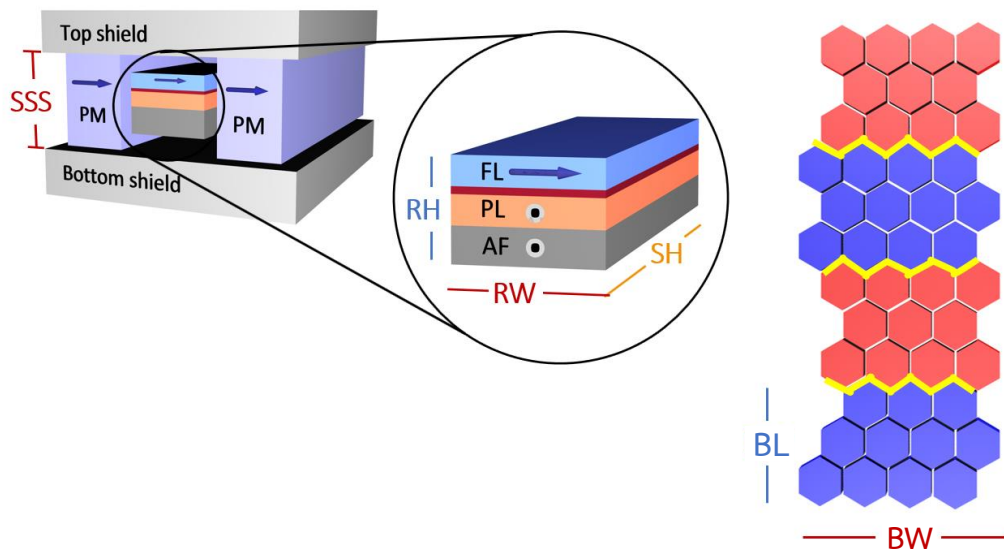
นอกจากนี้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลยังประกอบไปด้วยเกราะป้องกันด้านข้าง (side shield, SS) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวร (permanent magnet, PM) ที่เหนี่ยวนำได้ยาก และมีสภาพความเป็นแม่เหล็กหรือปริมาณเคอร์ซีวิตีที่ค่อนข้างสูง เช่น CoPt [15] และ CoCrPt [77] เป็นต้น วางขอบทั้งสองข้างของโครงสร้างสปีนวาล์ว เกราะป้องกันด้านข้างถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ให้มีทิศทางขนานกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลและตั้งฉากกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL ในขณะที่ไม่เกิดกระบวนการอ่านข้อมูลแสดงดังลูกศรสีดำในภาพประกอบ 2.9 เพื่อป้องกันการก่อดิวของโดเมนแม่เหล็กอื่นๆ ภายในชั้น FL ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชั้น FL ขาดเสถียรภาพทางความร้อนนำไปสู่การเกิดสัญญาณรบกวนในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล [78], [79] สำหรับเกราะป้องกันด้านบน (top shield, TS) และเกราะป้องกันด้านล่าง (bottom shield, BS) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีสภาพปรับไว้ได้แม่เหล็กสูง ยกตัวอย่างเช่น NiFe [77] และ CoFe [77] เป็นต้น จะถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลข้างเคียง (stray field) [14], [15] เข้ามารบกวนแมกนีไทเซชันของชั้น FL ในระหว่างกระบวนการตรวจวัดสัญญาณทางแม่เหล็กจากบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน [15]

กระบวนการอ่านข้อมูลจะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านข้อมูลและบิตข้อมูลที่ต้องการอ่านอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน และมีแนวโน้มการจัดเรียงทิศทางตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลนั้นๆ เมื่อมีการจ่ายแรงดันไบอัส (bias voltage) เพื่อทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า (electrical current) ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะทำให้สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าต้านทานแม่เหล็กได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ [21] และปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กจากการทะลุผ่าน [22] โดยปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมี

ค่าแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL [15], [23], [24] จากนั้นค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะถูกทำการขยายสัญญาณและอ่านข้อมูลออกมาในลักษณะไบนารีบิต (binary bits) หรือบิต 0 และบิต 1

อย่างไรก็ตามความแรงของสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลที่เหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL จะมีค่าน้อยมากในช่วง 200 Oe ถึง 300 Oe [15] ซึ่งไม่สามารถทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FL แสดงทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในบิตข้อมูลในทิศทางเดียวกันหรือทิศทางตรงกันข้ามได้อย่างสมบูรณ์ แต่จะทำมุมเล็กน้อยตามทิศทางการเหนี่ยวนำของบิตข้อมูลขึ้นอยู่กับความแรงในการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลนั้นๆ ที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL แสดงดังลูกศรสีน้ำเงินและลูกศรสีแดงในภาพประกอบ 2.9 ทำให้สามารถวัดปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กหรือแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (signal output amplitude) ได้ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นชั้น FL หรือเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลมีความจำเป็นจะต้องเลือกใช้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่มีความเป็นแม่เหล็กหรือปริมาณคอเออร์ซิวิตีที่ค่อนข้างสูงและมีคุณสมบัติที่เหนี่ยวนำได้ง่าย (high sensitivity) [15], [77] เพื่อให้สามารถตรวจวัดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลได้อย่างแม่นยำ

การพัฒนาประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลโดยการเพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลสามารถทำได้โดยการปรับลดขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งนำไปสู่การปรับลดขนาดความกว้างของบิตข้อมูล (bit width, BW) และความยาวของบิตข้อมูล (bit length, BL) แสดงดังภาพประกอบ 2.10 จากภาพจะเห็นได้ว่าการลดความยาวของบิตข้อมูล (bit length, BL) ซึ่งในปัจจุบันมีค่าอยู่ที่ประมาณ 17 nm [15] จะสัมพันธ์กับขนาดความสูงของชั้นหัวอ่านข้อมูล (reader height, RH) และระยะห่างระหว่างเกราะป้องกัน (shield-to-shield spacing, SSS) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าความกว้างของบิตข้อมูลประมาณ 50% [15] ในขณะที่การปรับลดขนาดความกว้างของบิตข้อมูลซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 20 nm ถึง 30 nm [15] จะสัมพันธ์กับความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width, RW) สำหรับความลึกของหัวอ่านข้อมูล (stripe height, SH) ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าต้านทานของอุปกรณ์และแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าน้อยกว่า 200 nm [80]

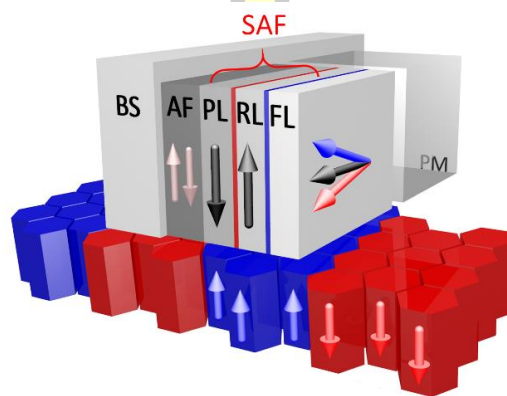


ภาพประกอบ 2.10 โครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หน้าทีรับกับแผ่นบันทึกข้อมูล (air-bearing surface, ABS) และลักษณะการแบ่งบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล

การปรับลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลเพื่อให้มีความสอดคล้องกับขนาดของบิตข้อมูลเป็นสาเหตุทำให้ต้องลดขนาดความกว้างและความสูงของหัวอ่านข้อมูลซึ่งนำไปสู่การลดลงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น AF และชั้น PL (weak exchange coupling AF/FM) เนื่องจากชั้น AF ขาดเสถียรภาพทางความร้อน (thermal instability) และไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ให้มีทิศทางที่แน่นอนได้ [81], [82] ในขณะเดียวกันเมื่อชั้น PL มีขนาดที่เล็กลงจะทำให้เกิดปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้าง (self-demagnetizing field) ภายในชั้น PL ที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FL และเกิดการก่อดัวของโดเมนแม่เหล็กภายในชั้น FL นำไปสู่การจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL (non uniform FL magnetization) [81], [82] ทำให้โครงสร้างสปินวาล์วแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล

ในเวลาต่อมาได้มีการนำเสนอโครงสร้างสปินวาล์วแบบสังเคราะห์ (synthetic spin-valve geometry) [83] โดยการเพิ่มชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกอีกหนึ่งชั้นซึ่งถูกเรียกว่า ชั้นอ้างอิง (reference layer, RL) ต่อจากชั้น PL และคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเพื่อช่วยเพิ่มการเกิดอันตรกิริยาระหว่างชั้น PL และชั้น FL หรืออันตรกิริยานีล (Neel coupling) [83] เพื่อทำแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น RL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามคล้ายคลึงกับลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF โดยชั้นวัสดุแม่เหล็กทั้งสามชั้นถูกเรียกรวมกันว่า ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic, SAF) โครงสร้างสปิน-

วาล์วแบบสังเคราะห์ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/SAF/SL/FL แสดงดังภาพประกอบ 2.11 จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างสปีนวาล์วแบบสังเคราะห์สามารถกำจัดผลของสนามแม่เหล็กหักล้างภายในชั้น PL ที่กระทำต่อชั้น FL ได้เนื่องจากปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในชั้น PL จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในชั้น RL และหักล้างกันหมดไป [81]–[83] นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างสปีนวาล์วแบบสังเคราะห์มีส่วนช่วยในการเพิ่มผลอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น PL และชั้น RL ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น RL ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL มีทิศทางที่แน่นอนและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแม้ว่าขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะถูกปรับให้มีขนาดที่ลดลง [81]–[83]

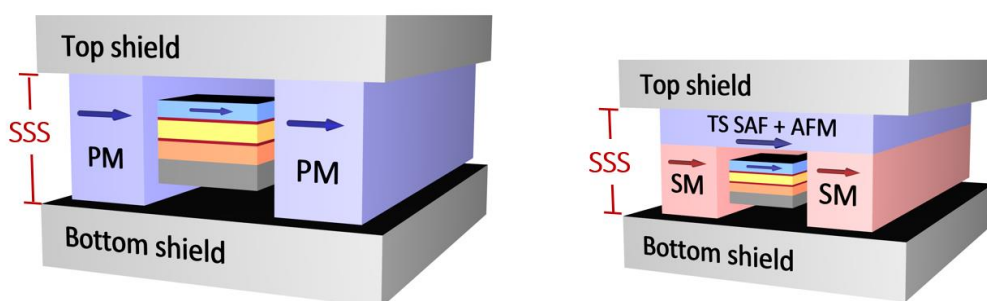


ภาพประกอบ 2.11 โครงสร้างสปีนวาล์วแบบสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยชั้น AF/SAF/SL/FL บนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก

นอกจากการลดขนาดของโครงสร้างสปีนวาล์วภายในหัวอ่านข้อมูลแล้วยังมีความจำเป็นจะต้องลดขนาดของเกราะป้องกันด้านข้าง เพื่อให้สามารถลดระยะห่างระหว่างเกราะป้องกันด้านบนและด้านล่างให้มีความสัมพันธ์กับขนาดของบิตข้อมูลที่มีขนาดเล็กลงได้แสดงดังภาพประกอบ 2.12(ก) อย่างไรก็ตามสนามแม่เหล็กจากเกราะป้องกันด้านข้างที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบถาวรซึ่งถูกใช้สำหรับยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL จะส่งผลทำให้เกิดการก่อตัวของโดเมนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของชั้น FL (FL domain formation) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลจะเกิดขึ้นได้ยาก [84] และส่งผลทำให้ความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าการก่อตัวของโดเมนแม่เหล็กภายในชั้น FL ยังส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL เกิดความไม่สมมาตรและเบี่ยงเบนออกจากแนวตั้งฉากกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL ซึ่งนำไปสู่ปัญหาสัญญาณเอาต์พุตแบบไม่เป็นเชิงเส้น

(non-linear output signal) ปัญหาของขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าลดลง (loss of amplitude) และปัญหาความไม่สมมาตรของแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (amplitude asymmetry) [84]–[86] เป็นต้น

จากปัญหาเนื่องจากผลการลดขนาดของเกราะป้องกันด้านข้างที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบถาวรและชั้น FL ทำให้มีการออกแบบและนำเสนอเกราะป้องกันด้านข้างรูปแบบใหม่ที่ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบไม่ถาวรและเหนียวได้ง่าย (soft magnet, SM) เช่น NiFe และ CoFe เป็นต้น ทดแทนการใช้วัสดุแม่เหล็กแบบถาวร [87]–[89] นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มชั้น AF และชั้น SAF ด้านล่างเกราะป้องกันด้านบนเพื่อทำหน้าที่ยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL แสดงดังภาพประกอบ 2.12(ข) จากการศึกษาพบว่าในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีการเลือกใช้เกราะป้องกันด้านข้างเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบไม่ถาวรทำให้เกิดปริมาณสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมต่อการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบของชั้น PL แบบสมมาตร (FL symmetry) โดยไม่ทำให้เกิดการก่อดำของโดเมนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของชั้น FL และทำให้สามารถวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูลได้เพิ่มขึ้น แม้ว่าอุปกรณ์จะถูกจำกัดให้มีขนาดเล็กลง [87]–[89]



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 2.12 โครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลที่มีเกราะป้องกันด้านข้างเป็น (ก) วัสดุแม่เหล็กแบบถาวร และ (ข) วัสดุแม่เหล็กแบบไม่ถาวร หน้าที่ได้รับกับแผ่นบันทึกข้อมูลในขณะที่ไม่เกิดกระบวนการอ่านข้อมูล

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาและออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์จริงนั้นมีเงื่อนไขที่จำกัดในหลากหลายด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการออกแบบลักษณะโครงสร้างและการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ในการศึกษาที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีขั้นสูงของวัสดุแม่เหล็กเพื่อให้สามารถ

ดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะได้อธิบายถึงทฤษฎีของวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2 ประเภทของวัสดุแม่เหล็ก

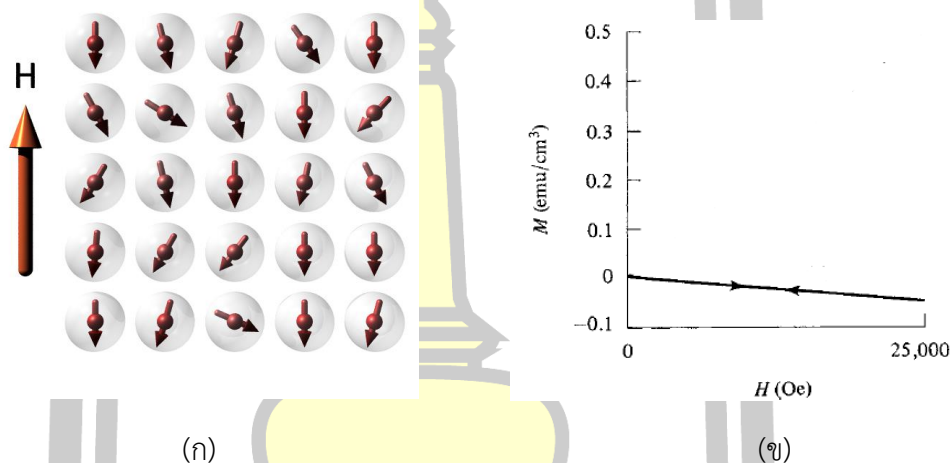
วัสดุแม่เหล็กคือวัสดุที่สามารถแสดงอำนาจทางแม่เหล็กหรือมีการตอบสนองต่อปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอก (external magnetic field หรือ applied field, H) ปริมาณทางฟิสิกส์ที่วัดได้จากลักษณะทางกายภาพของวัสดุเพื่อใช้ในการอธิบายการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุถูกเรียกว่า แมกนีไทเซชัน ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment, μ) ภายในวัสดุแม่เหล็ก ($M = \sum_i \mu_i$) โมเมนต์แม่เหล็กเกิดจากผลรวมของค่าโมเมนตัมเชิงมุม (total angular momentum, J) ที่ประกอบด้วยค่าโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน (spin angular momentum, S) และค่าโมเมนตัมเชิงมุมของออร์บิทัล (orbital angular momentum, L) โดยปริมาณโมเมนตัมเชิงมุมเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสองลักษณะคือ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบโคจรรอบนิวเคลียส (orbital motion) และการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัวเองของสปินภายในอิเล็กตรอน (spin motion)

การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากค่ารับไว้ได้แม่เหล็ก (magnetic susceptibility, $\chi = M/H$) [66] ซึ่งเป็นค่าที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเมื่อมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกหรือสามารถพิจารณาได้จากค่าความชันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งถูกเรียกว่า เส้นโค้งแมกนีไทเซชันหรือลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงลักษณะพื้นฐานและคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่สำคัญประเภทต่างๆ ได้แก่ วัสดุไดอะแมกเนติก (diamagnetic materials) วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic materials) วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกตามลำดับ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2.2.1 วัสดุไดอะแมกเนติก

วัสดุไดอะแมกเนติกเป็นวัสดุที่ไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนวงนอกแบบเต็มวง (electron full shell) ส่งผลทำให้ทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กหักล้างกันและทำให้ปริมาณโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ (net magnetic moment) หรือค่าแมกนีไทเซชันรวม (total magnetization) มีค่าเท่ากับศูนย์ ($M = 0$) ตัวอย่างสำหรับวัสดุไดอะแมกเนติก ได้แก่ ทอง (gold, Au) เงิน (silver, Ag) ทองแดง (copper, Cu) ก๊าซ-

เฉื่อย (noble gases) และสารประกอบออกไซด์ (oxide compound) [90] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกแก่วัสดุไดอะแมกเนติกพบว่า แมกนีไทเซชันรวมจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ($M \neq 0$) ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในวัสดุต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, ϵ) ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกและเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่มีค่าเป็นลบและมีค่าแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์เชิงมุม ภาพประกอบ 2.13(ก) แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกมีผลทำให้สามารถวัดค่าแมกนีไทเซชันได้เป็นค่าลบ แม้ว่าจะมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบสูงมากถึง 25,000 Oe [66] แสดงดังภาพประกอบ 2.13(ข)



ภาพประกอบ 2.13 (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุไดอะแมกเนติกและ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 25,000 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุไดอะแมกเนติก [66]

สำหรับโมเมนต์แม่เหล็ก m ที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกซึ่งถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก H สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กกับค่าโมเมนต์เชิงมุม L ได้ดังสมการ (2.1)

$$\Delta m = -\frac{e}{2m} \Delta L \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- e คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge)
 - μ_0 คือ สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กในปริภูมิอิสระ (permeability of free space)
 - r คือ รัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอนที่มีการเคลื่อนที่หรือรัศมีของออร์บิทัล (orbital radius)

โดยที่ $\Delta L = er^2\mu_0 H/2$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์แม่เหล็ก Δm ในรูปของสนามแม่เหล็กภายนอก H เมื่อแทนค่า ΔL ลงในสมการ (2.1) จะทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กภายนอกได้เป็น

$$\Delta m = -\frac{e}{2m} \left(\frac{er^2\mu_0}{2} H \right) = \frac{e^2 r^2 \mu_0}{4m} H \quad (2.2)$$

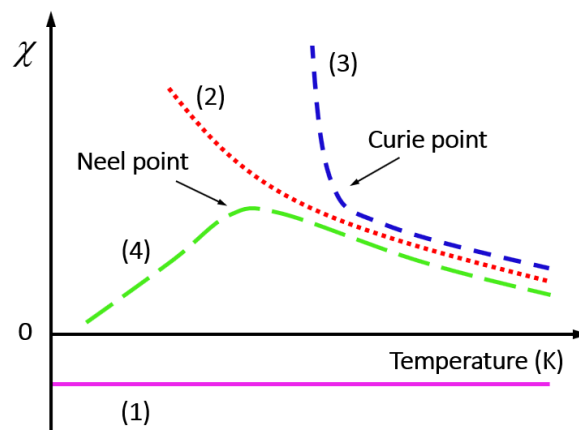
โดยทั่วไปแล้วค่ารับไว้ได้แม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่า M/H ดังนั้นจากสมการ (2.2) ทำให้สามารถเขียนค่ารับไว้ได้แม่เหล็กสำหรับวัสดุไดอะแมกเนติก χ_{dia} ได้ดังนี้

$$\chi_{dia} = \frac{-\mu_0 N Z e^2 \langle r^2 \rangle}{6m} \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือ เลขอาโวกาโดร (avogadro's number)

Z คือ เลขอะตอม (atomic number)

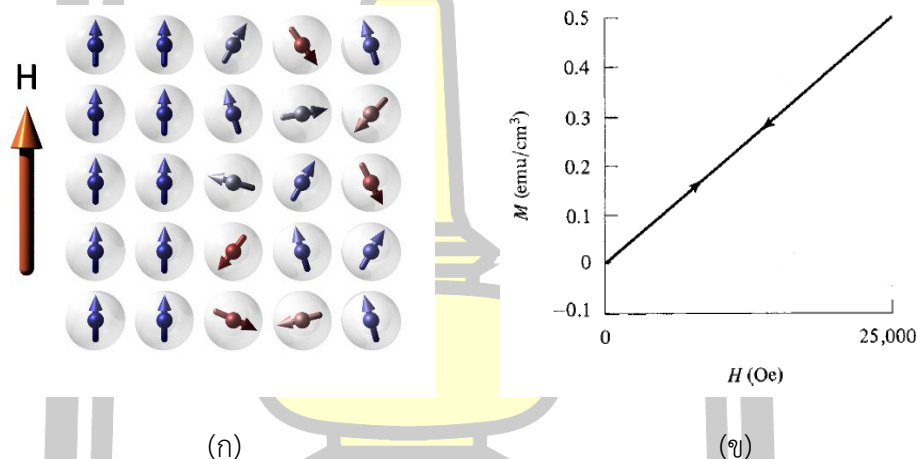
จากสมการ (2.3) จะเห็นได้ว่าค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุไดอะแมกเนติกนั้นจะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ภาพประกอบ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภทกับอุณหภูมิโดยเส้นกราฟสีม่วง (1) แทนค่ารับไว้ได้ของวัสดุไดอะแมกเนติกซึ่งมีค่าลดลงแบบคงที่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกและมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิซึ่งค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้จะมีค่าติดลบอยู่ที่ประมาณ -10^{-6} ถึง -10^{-5} [90]



ภาพประกอบ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับไว้ได้แม่เหล็กแต่ละชนิดกับอุณหภูมิโดยที่ (1) – (4) แทนวัสดุไดอะแมกเนติก วัสดุพาราแมกเนติก วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกตามลำดับ [90]

2.2.2 วัสดุพาราแมกเนติก

วัสดุพาราแมกเนติกเป็นวัสดุที่สามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อน เช่น อะลูมิเนียม (aluminium, Al) โครเมียม (chromium) และแพลตตินัม (platinum, Pt) [90] เป็นต้น โดยในกรณีที่ไม่มี การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่โครงสร้างวัสดุจะพบว่า การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะลักษณะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากผลของอุณหภูมิภายนอกทำให้ปริมาณแมกนีไทเซชันของวัสดุชนิดนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ ($M = 0$) แต่เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่โครงสร้างวัสดุจะมีผลทำให้โมเมนต์แม่เหล็กบางส่วนเกิดการตอบสนองและจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกแสดงดังภาพประกอบ 2.15(ก) ทำให้วัสดุพาราแมกเนติกมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกปริมาณได้แสดงดังภาพประกอบ 2.15(ข)



ภาพประกอบ 2.15 (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุพาราแมกเนติกและ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 25,000 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุพาราแมกเนติก [66]

สำหรับปริมาณแมกนีไทเซชันที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกสามารถอธิบายได้โดยอาศัยฟังก์ชันของแลงเจวิน (Langevin function) [66], [90] ซึ่งมีค่าแปรผันกับอุณหภูมิของระบบและแปรผันตรงกับปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกต่อการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กแสดงดังสมการ

$$L(a) = \frac{M}{M_0} = \coth a - \frac{1}{a} \quad (2.4)$$

หรือ

$$L(a) = \frac{a}{3} - \frac{a^3}{45} + \frac{2a^5}{945} - \dots \quad (2.5)$$

โดยที่ $M_0 = n\mu$ และ $a = \mu H/k_B T$ เมื่อ

μ คือ โมเมนต์แม่เหล็กภายในระบบ

n คือ จำนวนโมเมนต์แม่เหล็กภายในระบบที่มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก

k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K หรือ 1.38×10^{-16} erg/K

T คือ อุณหภูมิของระบบในหน่วยเคลวิน (Kelvin, K)

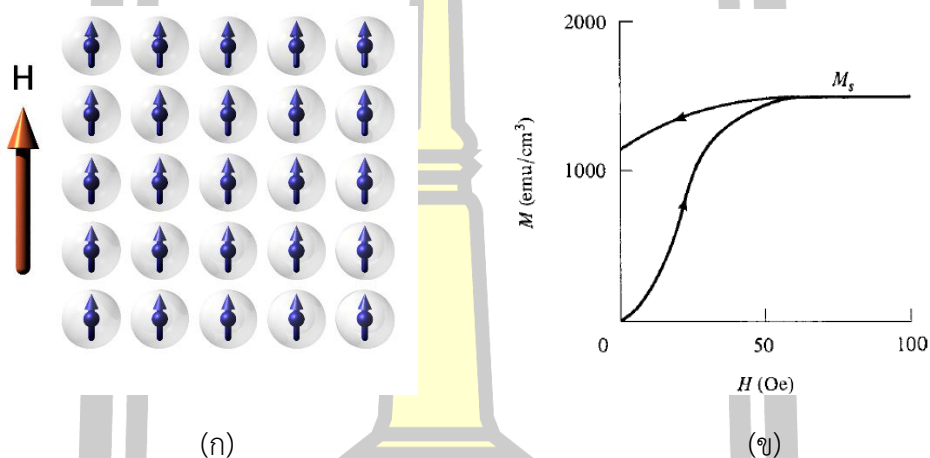
สำหรับค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุพาราแมกเนติกของวัสดุชนิดนี้จะมีค่าเป็นบวกและมีค่าแปรผกผันกับผลของอุณหภูมิภายในระบบและมีค่าอยู่ที่ประมาณ $+10^{-5}$ ถึง $+10^{-2}$ แสดงดังเส้นกราฟสีแดง (2) ในภาพประกอบ 2.14

2.2.3 วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีลักษณะเป็นธาตุโลหะทรานซิชัน (transition metals) ซึ่งมีสถานะของออร์บิทัลของอิเล็กตรอนวงนอกสุดไม่ถูกเติมเต็มด้วยสปิน เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนที่ไม่ปกติและเกิดการซ้อนทับกันระหว่างชั้นระดับพลังงาน 3d และ 4s ยกตัวอย่างเช่น โคบอลต์ (cobalt, Co) เหล็ก (iron, Fe) และนิกเกิล (nickel, Ni) [90] เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุเฟอร์โรจะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเมื่อไม่มีการเหนี่ยวนำให้กลายเป็นวัสดุแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในระบบมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มและหักล้างกันหมดไปทำให้ผลรวมของแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์ ($M = 0$) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก แต่เมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกจะพบว่าแมกนีไทเซชันทั้งหมดภายในระบบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกแสดงดังภาพประกอบ 2.16(ก) โดยโมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งค่าแมกนีไทเซชันจะมีค่าสูงสุดเรียกว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_S) สำหรับตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล เป็นต้น

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ภายหลังจากที่มีการเหนี่ยวนำให้กลายเป็นวัสดุแม่เหล็กเรียกว่า สภาพคงค้างทางแม่เหล็กหรือค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (remanence magnetization, M_r) ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์แม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกได้ถูกกำจัดออกจากระบบแล้ว ปริมาณสภาพคงค้างทางแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

เป็นสาเหตุทำให้เกิดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสแสดงดังภาพประกอบ 2.16(ข) โดยจะเห็นได้ว่าปริมาณสนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเท่ากับ 100 Oe สามารถทำให้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กได้แตกต่างจากวัสดุแม่เหล็กประเภทอื่น สำหรับค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดนี้จะมีค่ามากกว่า 10^5 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแม่เหล็กอื่นๆ แสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงิน (3) ในภาพประกอบ 2.14 เนื่องจากมีปริมาณแมกนีไทเซชันสูงกว่าปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกค่อนข้างมาก $M \gg H$

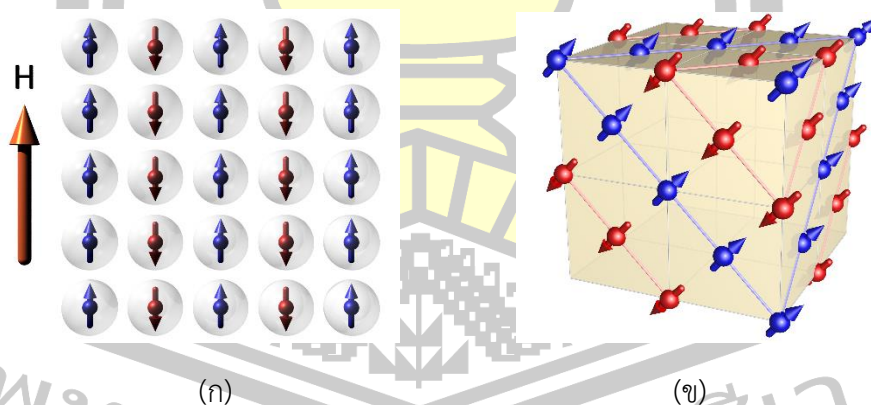


ภาพประกอบ 2.16 (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่วัดได้เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 100 Oe เข้าสู่ระบบโครงสร้างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก [66]

นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุประเภทนี้มีความสามารถทนต่อความร้อนได้ดี เนื่องจากจุดอุณหภูมิวิกฤติที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กชนิดนี้แปรสภาพกลายเป็นวัสดุพาราแมกเนติกหรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) มีค่าสูงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุแม่เหล็ก จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่สามารถคงสภาพความเป็นแม่เหล็กได้เป็นเวลานานและสามารถทนต่อความร้อนได้ดี เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิวิกฤติที่ค่อนข้างสูงส่งผลทำให้วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น องค์กรประกอบหลักภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมไปถึงอุปกรณ์หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก เป็นต้น สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในแผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีลักษณะเป็นสารประกอบโลหะเจือที่มีวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารประกอบหลัก ยกตัวอย่างเช่น โคบอลต์โครเมียม [9] โคบอลต์โครเมียมแพลตทินัม [91], [92] และเหล็กแพลตทินัม [93] เป็นต้น หรือแม้กระทั่งในหัวอ่านข้อมูลและหัวเขียนข้อมูลที่มีการเลือกใช้วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้มาประยุกต์ใช้งาน

2.2.4 วัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ไม่แสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กเนื่องจากมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันแบบพิเศษแตกต่างจากวัสดุแม่เหล็กประเภทอื่นๆ แมกนีไทเซชันภายในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละแลตทิซย่อย (sublattice) แสดงดังภาพประกอบ 2.17(ก) ส่งผลทำให้ปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในระบบมีค่าน้อยและลู่เข้าสู่ศูนย์ $M = 0$ แม้ว่าจะมีหรือไม่มีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่โครงสร้างวัสดุ โดยธรรมชาติแล้วธาตุแมงกานีส (manganese, Mn) และโครเมียม (chromium, Cr) จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [90] นอกจากนี้คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกยังสามารถถูกพบได้ทั่วไปในสารประกอบโลหะทรานซิชัน (transition metal compounds) และสารประกอบออกไซด์ (oxide compounds) เช่น ไอรอนแมงกานีส (iron Manganese, FeMn) อิริเดียมแมงกานีส (iridium manganese, IrMn) แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide, MnO) และโคบอลต์ออกไซด์ (cobalt oxide, CoO) [17]–[19], [25] เป็นต้น ภาพประกอบ 2.17(ข) แสดงลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันอย่างง่ายของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในธาตุแมงกานีส โดยจะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในทิศทางตรงกันข้ามด้วยมุมเท่ากับ 180° สลับกันไปในทุกๆ แลตทิซย่อยเป็นผลเนื่องจากแรงแลกเปลี่ยน (exchange force) ระหว่างสปินภายในแลตทิซย่อยที่กระทำต่อกัน



ภาพประกอบ 2.17 (ก) การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบ (ข) ลักษณะโครงสร้างอย่างง่ายของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในธาตุแมงกานีส [90]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารับไว้ได้แม่เหล็กกับอุณหภูมิของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกถูกแสดงดังเส้นกราฟสี่เหลี่ยม (4) ในภาพประกอบ 2.14 โดยจะเห็นได้ว่าค่ารับไว้ได้แม่เหล็กของวัสดุ

แอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีพฤติกรรมที่ไม่สอดคล้องกันและถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงด้วยค่าอุณหภูมิวิกฤตของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกหรืออุณหภูมิเนล (Neel temperature, T_N) สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของระบบมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเนล $T < T_N$ พบว่าคาร์บิวไรต์แม่เหล็กจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิเนื่องจากอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำจะไม่ส่งผลต่อการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันแบบพิเศษของวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้ส่งผลทำให้ค่าแมกนีไทเซชันรวมของระบบมีค่าต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิเนลจะมีผลทำให้การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นไปแบบสุ่ม เนื่องจากอิทธิพลของสนามความร้อนและทำให้แมกนีไทเซชันทั้งหมดภายในระบบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกมากยิ่งขึ้น โดยพบว่าคาร์บิวไรต์แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเนล $T = T_N$ แต่ในกรณีที่อุณหภูมิของระบบมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเนล $T > T_N$ พบว่าวัสดุแอนติเฟอร์โรจะแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุพาราแมกเนติก

นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันค่อนข้างสูง ทำให้วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์เช่นเดียวกันกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ยกตัวอย่างเช่น การสร้างชั้นอ้างอิงสำหรับเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลโดยอาศัยปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนที่เกิดจากการเชื่อมติดกันระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [17], [19], [25] ภายในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และอุปกรณ์หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก เป็นต้น ในลำดับต่อไปจะได้อธิบายถึงสมบัติพื้นฐานของวัสดุรวมไปถึงอันตรกิริยาและค่าพลังงานภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเพื่อเป็นพื้นฐานในการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.3 สมบัติพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็ก

การแสดงอำนาจทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยภายในและภายนอกที่ส่งผลต่อระบบวัสดุแม่เหล็ก ปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กคือ ปริมาณแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กหรือคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็ก (intrinsic properties) สำหรับปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางแม่เหล็ก ได้แก่ อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน (exchange interaction) และพลังงานความร้อน (thermal energy) ซึ่งจะถูกอธิบายถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก

เส้นโค้งแมกนีไทเซชันหรือลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากหลายปัจจัย โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแสดงอำนาจทางแม่เหล็กถูกเรียกว่า ปริมาณแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก ซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในที่แสดงถึงทิศทาง (preferential direction) ของแมกนีไทเซชันและเป็นตัวกำหนดความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก แอนไอโซโทรปีแม่เหล็กถูกจำแนกออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ แอนไอโซโทรปีผลึก (magneto-crystalline anisotropy) แอนไอโซโทรปีรูปร่าง (shape anisotropy) แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน (exchange anisotropy) และแอนไอโซโทรปีที่เกิดจากแรงกด (stress anisotropy) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของค่าแอนไอโซโทรปีประเภทต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กดังนี้

2.3.1.1 แอนไอโซโทรปีผลึก

แอนไอโซโทรปีผลึกเป็นปัจจัยภายในหลักที่ส่งผลต่อการแสดงอำนาจทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก แอนไอโซโทรปีผลึกถูกใช้เพื่อแสดงถึงทิศทางเริ่มต้น (preferential direction) หรือทิศแกนง่าย (easy axis) ของแมกนีไทเซชันเนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของธาตุหรือวัสดุแม่เหล็ก แอนไอโซโทรปีประเภทนี้เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างการเคลื่อนที่ของสปินและออร์บิทัลของอิเล็กตรอนแต่ละตัวภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ดังนั้นการพิจารณาถึงทิศทางการแสดงอำนาจทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบจะต้องใช้ค่าพลังงานที่สามารถเอาชนะอันตรกิริยาระหว่างการเคลื่อนที่ของสปินและออร์บิทัลเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ พลังงานดังกล่าวถูกเรียกว่า พลังงานแอนไอโซโทรปีผลึก (magneto-crystalline anisotropy energy, E_K)

สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์ (cubic crystal structure) เช่น โครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์แบบกลางตัว (body centered cubic, bcc) และโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์แบบกลางหน้า (face centered cubic, fcc) เป็นต้น จะสามารถเขียนพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกให้อยู่ในรูปของการกระจายอนุกรมในเทอมของมุมระหว่างทิศทางของแมกนีไทเซชันและแกนของลูกบาศก์ (cube axes) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แอนไอโซโทรปีได้ดังสมการ

$$E_K = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \dots \quad (2.6)$$

เมื่อ K_0 K_1 K_2 ... คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กมีหน่วยเป็น erg/cm^3
 θ คือ มุมระหว่างทิศทางของแมกนีไทเซชันและทิศแกนแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน
 α_1 α_2 α_3 คือ มุมที่แมกนีไทเซชันกระทำกับแนวแกน x y และ z ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยเทอมของ $\cos a$, $\cos b$, และ $\cos c$ ตามลำดับ [66]

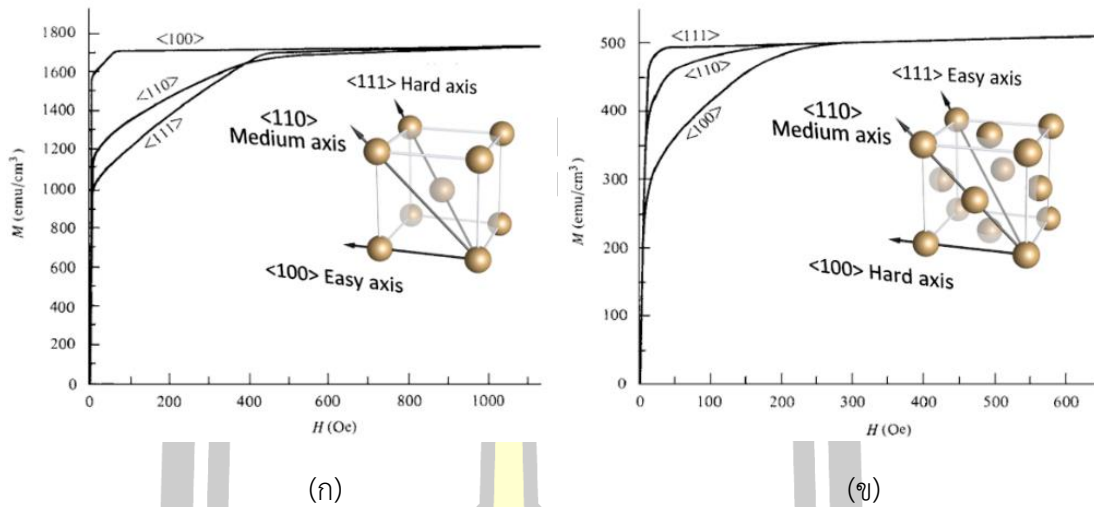
รูปแบบสมการของพลังงานแอนไอโซโทรปีสำหรับวัสดุที่มีแอนไอโซโทรปีแกนเดียวหรือมีทิศแกนง่ายเพียงทิศทางเดียว ยกตัวอย่างเช่น สารประกอบโลหะเจือที่มีวัสดุโคบอลต์เป็นสารประกอบหลักโดยมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหกด้านแบบปิดซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟจะมีรูปแบบสมการของพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันและทิศแกนง่ายดังนี้

$$E_K = K_0 + K_1\sin^2\theta + K_2\sin^4\theta + \dots \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) พบว่าเมื่อลำดับอนุกรมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้พลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ในขณะที่ในเทอมแรกของสมการจะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากเป็นค่าคงที่มีค่าไม่ขึ้นกับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันและแกนง่ายทำให้สามารถเขียนค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกได้ดังนี้

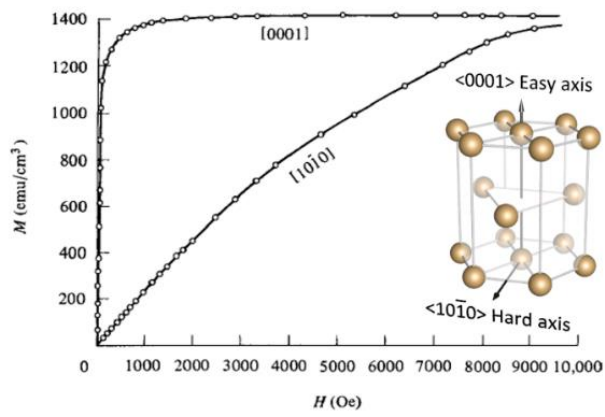
$$E_K = K_1 \sin^2 \theta \quad (2.8)$$

แอนไอโซโทรปีผลึกเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กที่เป็นตัวกำหนดความสามารถในการเหนี่ยวนำความเป็นแม่เหล็กเมื่อมีการให้สนามภายนอกในทิศทางต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น เหล็กวัสดุชนิดนี้จะมีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์แบบกลางตัวซึ่งมีระนาบของผลึกคือ $\langle 100 \rangle$ $\langle 110 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ โดยที่ทิศทาง $\langle 100 \rangle$ และ $\langle 111 \rangle$ เป็นทิศทางที่ง่ายและยากต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพความแม่เหล็กหรือการแมกนีไทซ์แสดงดังภาพประกอบ 2.18(ก) สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์แบบกลางหน้าจะมีทิศทางที่ง่ายและยากต่อการแมกนีไทซ์คือ $\langle 111 \rangle$ และ $\langle 100 \rangle$ ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 2.18(ข) ซึ่งแตกต่างจากวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์แบบกลางตัว



ภาพประกอบ 2.18 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็น (ก) ลูกบาศก์แบบกลางตัวและ (ข) ลูกบาศก์แบบกลางหน้า เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางที่ยากและง่ายต่อการแมกนีไทซ์ [66]

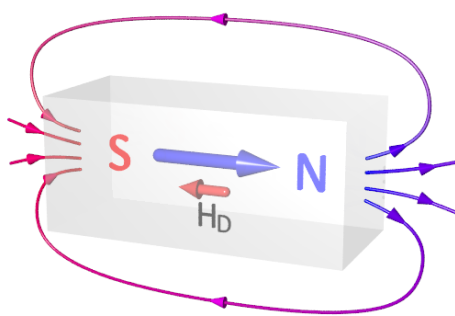
สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหกด้านแบบปิดจะมีความแตกต่างจากวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบลูกบาศก์เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีแอนไอโซโทรปีแกนเดียว ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้จะมีทิศแกนง่ายเพียงทิศทางเดียว คือทิศ $\langle 0001 \rangle$ ซึ่งง่ายต่อการแมกนีไทซ์แสดงดังภาพประกอบ 2.19



ภาพประกอบ 2.19 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปทรงหกด้านแบบปิด เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางที่ยากและง่ายต่อการแมกนีไทซ์ [66]

2.3.1.2 แอนไอโซโทรปีรูปร่าง

ลักษณะรูปร่างของวัสดุแม่เหล็กเป็นอีกหนึ่งปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กซึ่งถูกเรียกว่า แอนไอโซโทรปีรูปร่าง สำหรับวัสดุแม่เหล็กจะพบว่าคุณสมบัติความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็กนั้นจะมีค่ามากที่บริเวณขั้วแม่เหล็กทั้งสองด้าน โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ล้อมรอบวัตถุซึ่งมีทิศทางออกจากขั้วเหนือ (north pole, N) เข้าหาขั้วใต้ (south pole, S) เสมอ นอกจากนี้เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวยังสามารถเคลื่อนที่จากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ภายในโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันแทนด้วยลูกศรสีแดงซึ่งมีทิศตรงข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชันแทนด้วยลูกศรสีน้ำเงินในภาพประกอบ 2.20 โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กถูกเรียกว่า ปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ (self-demagnetizing field, H_D)



ภาพประกอบ 2.20 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กหักล้างด้วยตนเองภายในแท่งแม่เหล็ก [48]

แอนไอโซโทรปีรูปร่างสามารถอธิบายได้โดยอาศัยปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ H_D ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชัน M และเป็นสัดส่วนกับขนาดของแมกนีไทเซชันแสดงดังสมการ

$$H_D = -N_D M \quad (2.9)$$

เมื่อ N_D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดสภาพแม่เหล็ก (demagnetizing factor) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุแม่เหล็ก

สำหรับกรณีที่วัสดุแม่เหล็กมีรูปร่างทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง (prolate spheroid) จะสามารถทำการแมกนีไทซ์วัสดุแม่เหล็กได้ง่ายในทิศทางแกนยาว (long axis) เนื่องจากค่าสนามลดสภาพแม่เหล็กในทิศทางแกนยาวจะมีค่าน้อยกว่าในทิศทางแกนขวาง (short axis) [66] โดยที่ค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุรูปทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของพลังงานแม่เหล็กสถิตย์ (magnetostatic energy, E_{ms}) ได้ดังนี้

$$E_{ms} = \frac{1}{2} N_c M^2 + \frac{1}{2} (N_a - N_c) M^2 \sin^2 \theta \quad (2.10)$$

เมื่อ N_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดสภาพแม่เหล็กในทิศทางแกนขวาง
 N_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดสภาพแม่เหล็กในทิศทางแกนยาว
 θ คือ มุมที่แมกนีไทเซชันกระทำกับทิศทางแกนยาว

จากสมการ (2.10) สามารถเขียนค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปร่างวัสดุ (shape anisotropy constant, K_s) ได้ดังสมการ

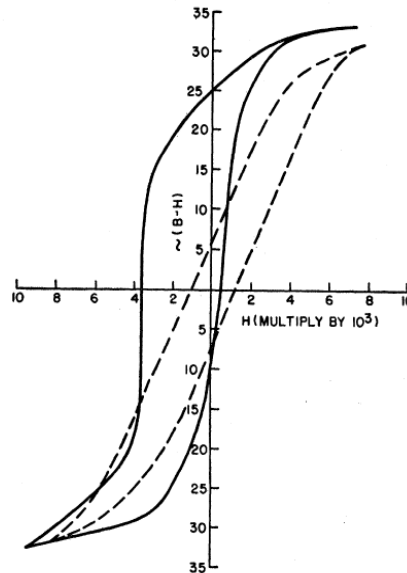
$$K_s = \frac{1}{2} (N_a - N_c) M^2 \quad \text{or} \quad K_s = \frac{1}{2} \Delta N M^2 \quad (2.11)$$

ในกรณีที่วัสดุหรือเกรนมีรูปร่างเป็นทรงกลมจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการลดสภาพแม่เหล็กเท่ากับ 4π นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุรูปทรงกลมจะไม่มีผลของค่าแอนไอโซโทรปีที่มีลักษณะขึ้นกับรูปร่างของวัสดุ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของการลดสภาพแม่เหล็กในทิศทางแกนขวางและแกนยาวของวัสดุรูปทรงกลมมีค่าเท่ากันและจะหักล้างกันหมดไปดังแสดงในสมการ (2.10) และ (2.11) ส่งผลให้ไม่มีทิศแกนง่ายภายในวัสดุ (no preferred orientation) ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กรูปทรงกลมจะไม่มีผลของแอนไอโซโทรปีรูปร่างเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.3.1.3 แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน

แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยนเป็นปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อการแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกับชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก แอนไอโซโทรปีประเภทนี้เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการให้สนามความเย็น (field cooling process) [17], [33] เพื่อกำหนดการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกนำไปสู่การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกให้มีทิศทางที่แน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชั้น ผลของค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสตามแนวแกนของสนามแม่เหล็กภายนอก (displaced hysteresis loop) และเกิดการหมุนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส (rotational hysteresis loop) [94] แสดงดังภาพประกอบ 2.21 แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยนถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฎการณ์ไบฮัสแลกเปลี่ยน [33] โดยโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่เกิดปรากฏการณ์ไบฮัสแลกเปลี่ยนจะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชัน

ภายในชั้น PL เพื่ออ้างอิงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL หรือแผ่นบันทึกข้อมูลภายในเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



ภาพประกอบ 2.21 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุโคบอลต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่เชื่อมติดกับวัสดุโคบอลต์ออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกภายหลังจากกระบวนการให้สนามความเย็น [17]

รูปแบบสมการของพลังงานแอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยนต่อหน่วยพื้นที่ (energy per unit area) ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะถูกพิจารณาจาก 4 ส่วนหลัก ได้แก่ พลังงานภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ตอบสนองต่อปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอก H พลังงานภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก พลังงานภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก และพลังงานภายในระหว่างชั้นวัสดุที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุด้วยค่าคงที่ควบคู่ที่บริเวณรอยต่อ (interface coupling constant, J_{int}) แสดงดังสมการ

$$E = -HM_{FM}t_{FM} \cos(\theta - \beta) + K_{FM}t_{FM} \sin^2\beta + K_{AF}t_{AF} \sin^2\alpha - J_{int} \cos(\theta - \alpha) \quad (2.12)$$

- เมื่อ t_{FM} คือ ความหนาของชั้นฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติก
 t_{AF} คือ ความหนาของชั้นฟิล์มแอนติเฟอร์โรแมกเนติก
 K_{FM} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติก
 K_{AF} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นฟิล์มแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

- θ คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับทิศแกนง่าย
- β คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกับทิศแกนง่าย
- α คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกับทิศแกนง่าย [17], [33]

เมื่อพิจารณาสมการ (2.12) จะพบว่าในกรณีที่พลังงานภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ควบคู่ที่บริเวณรอยต่อ $K_{AFtAF} < J_{int}$ จะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก แต่ในกรณีที่พลังงานภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่ามากกว่าค่าคงที่ควบคู่ที่บริเวณรอยต่อ $K_{AFtAF} > J_{int}$ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีพลังงานมากพอที่จะยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกให้มีทิศทางที่แน่นอน สำหรับรายละเอียดของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะถูกอธิบายเพิ่มเติมในบทที่ 4

2.3.2 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน

โมเมนต์แม่เหล็กเป็นปริมาณพื้นฐานทางฟิสิกส์ซึ่งถูกใช้เพื่ออธิบายคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก โดยลักษณะการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุดังกล่าว แนวโน้มการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังถูกพบว่ามีค่าขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็กนั้นๆ อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนจะเกิดขึ้นภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภท คือ อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางตรง (direct exchange interaction) อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อม (indirect exchange interaction) และอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบพิเศษ (superexchange interaction) โดยค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแต่ละประเภทจะมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

2.3.2.1 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางตรง

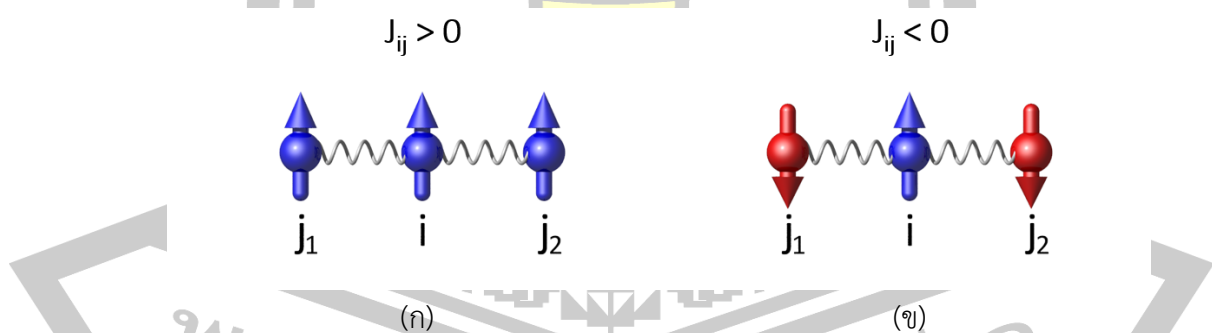
อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางตรงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบคือ อันตรกิริยาระยะสั้น (short-range interaction) และอันตรกิริยาระยะไกล (long-range interaction) [66] สำหรับกรณีของอันตรกิริยาระยะสั้นจะเกิดจากการซ้อนทับกันของออร์บิทัลระหว่างสปินที่อยู่ใกล้กันมากพอโดยอิเล็กตรอนวงนอกที่เคลื่อนที่รอบนิวเคลียสจะมีโอกาสที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังออร์บิทัลของ

อะตอมข้างเคียงได้ สำหรับกรณีของอันตรกิริยาระยะไกลจะเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันแต่ละตัวภายในระบบ โดยค่าพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน (E_{exch}) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการพลังงานได้ดังนี้

$$E_{\text{exch}} = - \sum_{i \neq j} J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j \quad (2.13)$$

เมื่อ J_{ij} คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน i และ j โดย
 \hat{S}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินที่พิจารณา
 \hat{S}_j คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินข้างเคียง

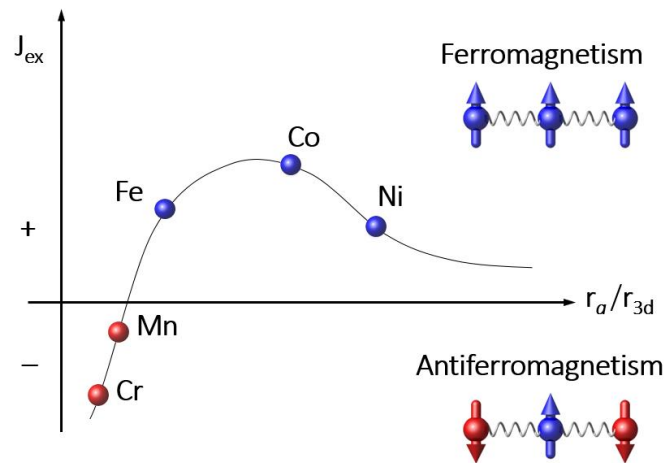
อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสปินภายในวัสดุแม่เหล็กแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ การจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งค่าคงที่การแลกเปลี่ยนจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุแม่เหล็ก โดยในกรณีของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะมีค่า J_{ij} มากกว่าศูนย์ ในขณะที่วัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีค่า J_{ij} น้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นลักษณะการจัดเรียงตัวของสปินในวัสดุจะพยายามจัดเรียงตัวเพื่อให้ค่าพลังงานของระบบมีค่าต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสปิน เช่น ในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสปินจะพยายามจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเนื่องจากค่าพลังงานแลกเปลี่ยนจะมีค่าต่ำที่สุดแสดงดังภาพประกอบ 2.22(ก) ในทำนองเดียวกับวัสดุแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรจะแสดงการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามดังภาพประกอบ 2.22(ข)



ภาพประกอบ 2.22 ลักษณะการจัดเรียงตัวของสปิน (ก) ในทิศทางเดียวกันและ (ข) ในทิศทางตรงกันข้าม [95]

จะเห็นได้ว่าค่าคงที่การแลกเปลี่ยนเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดลักษณะการจัดเรียงตัวของสปิน ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนสามารถถูกจำแนกได้ตามประเภทของวัสดุแสดงดังภาพประกอบ 2.23 ซึ่งแสดงค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแอนติเฟอร์โร-

แมกเนติกในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างรัศมีของอะตอม (r_a) และระยะรัศมีของระดับพลังงาน 3d (r_{3d}) ของธาตุโคบอลต์ เหล็ก และนิกเกิล ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่มีค่าคงที่การแลกเปลี่ยนเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยตามลำดับ สำหรับค่าคงที่การแลกเปลี่ยนของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกของธาตุแมงกานีสจะมีค่ามากกว่าธาตุโครเมียมแสดงดังวงกลมสีแดงในภาพประกอบ 2.23

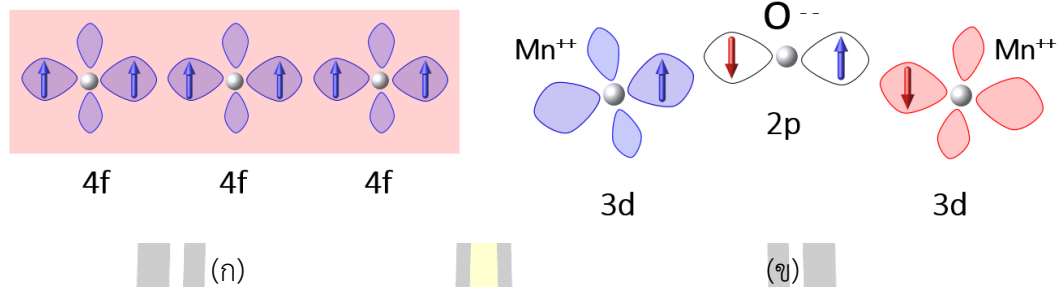


ภาพประกอบ 2.23 กราฟเบธ-สเลเตอร์ (Bethe-Slater) ที่แสดงค่าคงที่การแลกเปลี่ยนของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [48]

2.3.2.2 อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อมและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบพิเศษ

อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของแร่โลหะหายากหรือธาตุแลนทาไนด์ (rare earth metals หรือ lanthanides) จะไม่สามารถอธิบายได้จากการแลกเปลี่ยนทางตรงเช่นเดียวกันกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.3.1.1 แต่จะสามารถอธิบายได้ในลักษณะของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อมซึ่งถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอันตรกิริยา RKKY (RKKY interaction) ซึ่งถูกนิยามขึ้นจากรายชื่อผู้ค้นพบได้แก่ รูเดอ์แมน (M. Ruderman) คิทเทล (C. Kittel) คาซุยะ (T. Kasuya) และ โยซิดะ (K. Yosida) [96] ตามลำดับ อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากสปินในระดับพลังงาน f ของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนข้ามผ่านอิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electrons) ภายในโครงสร้างวัสดุแสดงดังภาพประกอบ 2.24(ก) อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางอ้อมจะมีความแรงมากกว่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนทางตรง เนื่องจากการซ้อนทับกันของระดับพลังงานในชั้น 4f ที่มีค่าน้อยส่งผลทำให้

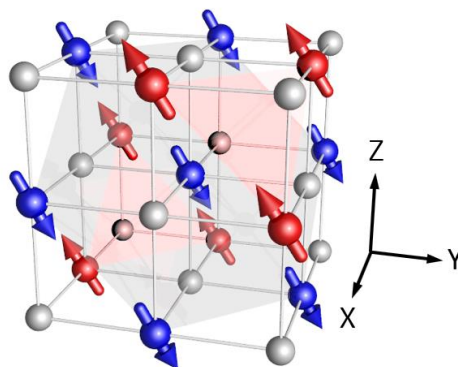
รัศมีของระดับพลังงานในชั้น 4f มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างอะตอมของวัสดุ [97] ดังนั้นค่าคงที่การแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอะตอมที่พิจารณา



ภาพประกอบ 2.24 ลักษณะการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินแบ่งออกเป็น (ก) การแลกเปลี่ยนทางอ้อมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการซ้อนทับกันของระดับพลังงานระหว่างอะตอมของวัสดุโลหะหายากที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก [97] และ (ข) การแลกเปลี่ยนแบบพิเศษซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการซ้อนทับกันของระดับพลังงานระหว่างอะตอมของวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กและอะตอมของออกไซด์ [97]

ตามธรรมชาติแล้ววัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกโดยส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเป็นโลหะผสม (metallic alloy) หรือสารประกอบออกไซด์ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.4 ซึ่งมีโครงสร้างวัสดุที่ต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุโดยมีโครงสร้างผลึกแบบร็อคซอลต์ (rocksalt structure) แสดงดังภาพประกอบ 2.25 วัสดุเหล่านี้จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของสปินโดยอะตอมที่อยู่ใกล้กันที่สุดจะมีทิศขานกันส่วนอะตอมที่อยู่ห่างออกมาจะมีทิศตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาสปินในระนาบ (111) พบว่าทิศทางของสปินทุกตัวจะมีทิศขานกันแต่ในระนาบที่อยู่ถัดไปสำหรับทิศ [111] จะมีทิศทางตรงกันข้าม จะเห็นได้ว่าระหว่างสปินของแต่ละอะตอมจะถูกคั่นกลางด้วยอะตอมของออกไซด์ที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็กมีผลทำให้สปินอยู่ในระยะที่ห่างกันเกินกว่าที่จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนทางตรงแต่อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างสปินในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบพิเศษ [97] ซึ่งถูกค้นพบโดยเครเมอร์ (H. Kramers H.) [98] และแอนเดอร์สัน (P. Anderson) [99]

พหุ ม ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 2.25 โครงสร้างผลึกแบบ rocksalt structure ในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [48] เมื่อวงกลมสีแดงและสีน้ำเงินแทนอะตอมวัสดุแม่เหล็กและวงกลมสีเทาแทนอะตอมของออกไซด์

การอธิบายลักษณะการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแบบพิเศษในที่นี่จะยกตัวอย่างในกรณีของโครงสร้างวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแมงกานีสออกไซด์ (manganese oxides, MnO) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นธาตุทรานซิชัน (transition metal oxides) โดยที่ออร์บิทัล 3d ของแมงกานีสจะบรรจุอิเล็กตรอนไว้ครึ่งหนึ่งในขณะที่อิเล็กตรอนของออกไซด์จะถูกบรรจุเต็มออร์บิทัล 2p ซึ่งมีทิศทางของสปินตรงข้ามกันตามกฎการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion) โดยพบว่าอะตอมของแมงกานีสและออกไซด์จะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันแต่ยังคงทิศทางของสปินดั้งเดิม เมื่ออะตอมของแมงกานีสตัวที่หนึ่งที่มีการจัดเรียงตัวเป็นสปินขึ้นเคลื่อนที่เข้าใกล้อะตอมของออกไซด์ที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็กจะส่งผลทำให้อะตอมของออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวเป็นสปินลงถูกดึงดูดเข้าใกล้อะตอมของแมงกานีส โดยอะตอมออกไซด์ที่เหลือนั้นจะถูกผลักออกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสปินในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือมีการจัดเรียงตัวเป็นสปินขึ้น จากนั้นอะตอมแมงกานีสตัวที่สองจะเคลื่อนที่เข้าใกล้อะตอมของออกไซด์และถูกบังคับให้มีการจัดเรียงทิศทางเป็นสปินลงตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 2.24(ข) ส่งผลทำให้ผลึกแมงกานีสออกไซด์แสดงคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [90]

2.4 การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน

กระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (magnetization reversal process) จะมีลักษณะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกของวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี ลักษณะโครงสร้างและรูปร่างวัสดุ อุณหภูมิและสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้เป็นเงื่อนไขสำคัญที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กนำไปสู่ลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึง

ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ รวมไปถึงพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพทางความร้อนซึ่งถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก

พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก คือ พลังงานที่ต่ำที่สุดของวัสดุแม่เหล็กที่จะต้องใช้พลังงานภายนอกหรือสนามแม่เหล็กภายนอกในปริมาณที่มากกว่าเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากผลต่างระหว่างค่าพลังงานที่สูงสุดและค่าพลังงานต่ำที่สุดภายในระบบซึ่งวัสดุแม่เหล็กใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชัน สำหรับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาในกรณีที่ง่ายที่สุดได้โดยกำหนดให้แมกนีไทเซชันทุกตัวภายในชั้นวัสดุมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดในลักษณะโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (magnetic single domain) โดยมีค่าพลังงานเริ่มต้นเป็นผลรวมของพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึก (crystalline anisotropy energy, E_K) และพลังงานสนามแม่เหล็กภายนอก (Zeeman energy, E_Z) แสดงดังสมการ [66]

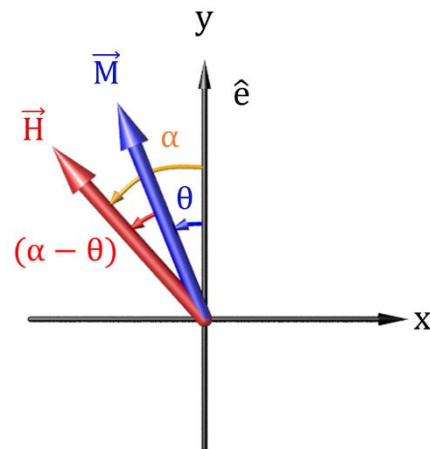
$$E_{\text{tot}} = E_K - E_Z \quad (2.14)$$

หรือ

$$E_{\text{tot}} = K_U V \sin^2 \theta - M_S V H \cos(\alpha - \theta) \quad (2.15)$$

- เมื่อ K_U คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี
 V คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในวัสดุ
 θ คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันและทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน
 α คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและทิศแกนง่ายแสดงดังภาพประกอบ 2.26

พหุ ประถม วิชา



ภาพประกอบ 2.26 การพิจารณามุมระหว่างแมกนีไทเซชัน \vec{M} และสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H} ที่กระทำต่อทิศแกนง่ายของวัสดุ [100]

จากการคำนวณค่าพลังงานรวมของระบบในสมการ (2.15) เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกตามทิศแกนง่ายของวัสดุแม่เหล็กจะทำให้สามารถแบ่งการพิจารณาพลังงานของระบบได้ในสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชัน \vec{M} จัดเรียงตัวตามทิศแกนง่าย \hat{e} กล่าวคือ ไม่เกิดมุมระหว่างแมกนีไทเซชัน $\theta = 0^\circ$ และในกรณีที่แมกนีไทเซชัน \vec{M} มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศแกนง่าย \hat{e} หรือ $\theta = 180^\circ$ นำมาซึ่งการคำนวณค่าพลังงานที่น้อยที่สุด (E_{\min}) และค่าพลังงานที่สูงที่สุด (E_{\max}) ของระบบดังนี้

$$E_{\min} = -MHV \quad (2.16)$$

และ

$$E_{\max} = K_U V \left(1 - \frac{MH}{2K_U}\right)^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นค่าพลังงานก็ดกกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงาน $E_{\max} - E_{\min}$ แสดงดังสมการ

$$\Delta E = KV \left[1 - \frac{H}{H_K}\right]^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ H_K คือ ค่าสนามแอนไอโซโทรปีที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งมีค่าประมาณ

$$H_K \sim 2K_U/M_S$$

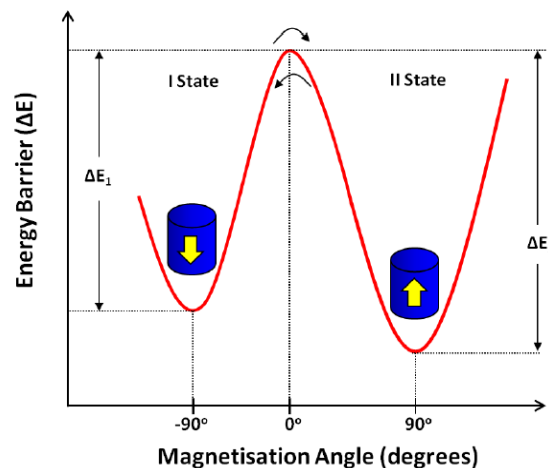
H คือ ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก

ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่น้อยที่สุดที่ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันได้จะต้องมีค่ามากพอที่จะสามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กได้ ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณเท่ากับสนามแอนไอโซโทรปีของแมกนีไทเซชัน กล่าวคือ $H \sim H_K$ ลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในเกรนเดี่ยว (single grain) ที่มีการป้อนสนามภายนอกในทิศทางตรงข้ามเท่ากับ 180° กับทิศแกนง่ายแสดงดังภาพประกอบ 2.27

ในทำนองเดียวกันพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$\Delta E = KV \left[1 - \frac{H^*}{H_K^*} \right]^2 \quad (2.19)$$

- เมื่อ H^* คือ ค่าสนามแลกเปลี่ยนที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกระทำบนชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก
- H_K^* คือ ค่าสนามแอนไอโซโทรปีเสมือนที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (pseudo anisotropy field) [101]



ภาพประกอบ 2.27 ผลของพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับมุมของแมกนีไทเซชัน [48]

2.4.2 ความไม่อิสระของเวลาและอุณหภูมิ (time dependent measurement)

สภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กจะมีแนวโน้มลดลงจากค่าเริ่มต้นหรือค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวที่เวลาใดๆ $M(t)$ เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนซึ่งเป็นปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กภายในระบบมีค่าลดลงเนื่องจากผลการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation) ถ้าระบบวัสดุแม่เหล็กมีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กต่ำกว่าค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ย $\Delta E < k_B T$ จะส่งผลทำให้วัสดุแม่เหล็กไม่สามารถคงสถานะความเป็นแม่เหล็กไว้ได้และนำไปสู่กระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน

การเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันอ้อมตัวที่เวลาใดๆ มีลักษณะที่สอดคล้องกับตัวแปรโบลซ์มาน (Boltzmann factor) หรือ $\exp(-\Delta E/k_B T)$ ซึ่งถูกใช้อธิบายโอกาสที่พลังงานความร้อนสามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันได้ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$M(t) \propto \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] \quad (2.20)$$

เมื่อพิจารณาพลวัตหรือการเปลี่ยนแปลงของค่าแมกนีไทเซชันภายในระบบที่ช่วงเวลาใดๆ จะทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$-\frac{dM}{dt} = f_0 M \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] = \frac{M}{\tau} \quad (2.21)$$

เมื่อ f_0 คือ ค่าคงที่ของการสั่น (frequency factor) ซึ่งเป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (precession frequency) ของแมกนีไทเซชันซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10^9 - 10^{10} เฮิร์ตส์ (Hertz, Hz) [102]

τ คือ ระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation time) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในระบบมีค่าลดลง $1/e$ หรือประมาณ 37% ของค่าแมกนีไทเซชันรวมเริ่มต้นตามกฎของอาร์เร็นเนียส-นีลส์ (Arrhenius-Néel law) [103] แสดงดังสมการ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.22) จะพบว่าระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันจะมีค่าแปรผันตรงกับพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก ΔE ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปี K_U และปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก V ดังนั้นการลดขนาดของค่าคงที่แอนไอโซโทรปีหรือปริมาตรของเกรนแม่เหล็กจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผันกลับทิศทางและระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน

สมการ (2.22) ยังถูกนำมาใช้ในการทำนายระยะเวลาที่ระบบวัสดุแม่เหล็กสามารถทนต่ออิทธิพลของความร้อนได้โดยการกำหนดให้ระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับระยะเวลาในการวัดคุณสมบัติแม่เหล็ก $\tau = t_m$ ยกตัวอย่างการพิจารณาระบบวัสดุแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกโดยการกำหนดระยะเวลาในการวัดคุณสมบัติแม่เหล็กให้มีค่าเป็น $t_m = 100$ วินาที (second, s) จะได้ว่า

$$\left[\frac{10^{-2}}{10^9} \right] = \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_B T} \right] \quad (2.23)$$

ดังนั้นค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้จะมีค่าประมาณ

$$\Delta E = 25k_B T \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) สามารถสรุปได้ว่าเกรนแม่เหล็กภายในระบบวัสดุแม่เหล็กใดๆ ที่มีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กน้อยกว่า 25 เท่าของค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในระบบ $\Delta E < 25k_B T$ จะถูกพิจารณาให้เป็นเกรนแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก เนื่องจากใช้เวลาในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันน้อยกว่า 100 s ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่จำเป็นต้องป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อทำให้เกิดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะมีค่าประมาณเท่ากับค่าเคอเออร์ซีวิตี H_C ดังสมการ

$$H_C = H_K \left[1 - \left(\frac{25k_B T}{K_U V} \right)^{1/2} \right] \quad (2.25)$$

ในการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลหรือโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไตร์พี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาผลกระทบเนื่องจากพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบเช่นเดียวกัน ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูงเท่ากับหรือมากกว่า $\Delta E \geq 40k_B T$ [48], [66] เพื่อให้ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมีเสถียรภาพทางความร้อนและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะเวลาที่เหมาะสม

วัสดุแม่เหล็กจะมีพฤติกรรมในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งแปรผันตามความแรงของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ยังถูกพบว่ามีลักษณะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการป้อนสนามและอัตราการป้อนสนามต่อวินาที (field sweep rate) [104], [105] เนื่องจากปริมาณแมกนีไทเซชันมีค่าแปรผันตามเวลาและอุณหภูมิแม้ว่าจะมีการป้อนสนามคงที่เข้าสู่ระบบ ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกหรือค่า H_C ที่ต้องใช้เพื่อกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะมีค่าไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับค่าเคอเออร์ซีวิตีที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $H_C(t)$ ใน

ระบบเกรนเดี่ยวที่ไม่คิดผลการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนสามารถพิจารณาได้จากสมการของชาร์ร็อก (Sharrock's equation) [106] แสดงดังสมการ

$$H_c(t) = H_K \left\{ 1 - \left[\frac{k_B T}{K_U V} \ln \left(\frac{f_0 t}{\ln 2} \right) \right]^n \right\} \quad (2.26)$$

- เมื่อ H_K คือ ค่าสนามแอนไอโซโทรปีซึ่งมีค่าโดยประมาณ $H_K \sim 2K_U/M_S$
 V คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา
 f_0 คือ ค่าคงที่ของการสั่น
 n คือ เลขชี้กำลังที่สัมพันธ์กับการกระจายตัวของทิศแกนง่าย

จากสมการ (2.26) จะเห็นได้ว่าค่า $H_c(t)$ จะมีค่าคงที่เท่ากับ H_K เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์และจะมีค่าลดลงตามเวลาขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิ



บทที่ 3

แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์ (granular micromagnetic model) เพื่อใช้ในการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพขององค์ประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วน of แผ่นบันทึกข้อมูลและหัวอ่านข้อมูล ในบทนี้จะอธิบายการประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่อาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างโวโรนอย (Voronoi construction) เพื่อกำหนดโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแกรนูลาร์และอาศัยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo technique) เพื่อพิจารณากระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีสถานะสมดุล ในลำดับสุดท้ายจะได้อธิบายผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กและกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแกรนูลาร์ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบใหม่ เช่น เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบบิต เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้ความร้อนช่วย และเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย เป็นต้น

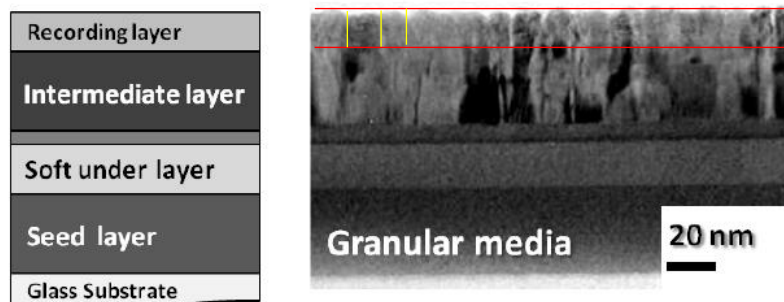
3.1 วิวัฒนาการของแผ่นบันทึกข้อมูล

เป้าหมายสูงสุดของการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กหรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือการเพิ่มค่าความในการจัดเก็บข้อมูลให้มีค่ามากที่สุดในขณะที่ตัวอุปกรณ์ถูกจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลง โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความจุข้อมูลคือ การออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้มีขนาดของบิตข้อมูลที่เล็กลงซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดของเกรนแม่เหล็กและยังคงประสิทธิภาพในการทำงานไว้ได้ แต่พบว่าการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กจะส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูลนำไปสู่ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้าน (media-trilemma problem) ได้แก่ ความเสถียรทางความร้อน ความสามารถในการเขียน และอัตราของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน [7], [9] ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.1.1 ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้านนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในยุคแรกถูกเรียกว่า แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาว (longitudinal recording media) ซึ่งแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางในแนวตามยาวและขนานกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล การลดขนาดของเกรนแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าความจุข้อมูลนั้นเป็นสาเหตุทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาวประสบกับปัญหาในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชัน เนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กมีค่าน้อยส่งผลทำให้ปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุ (self-demagnetizing field) มีค่ามาก [49], [50] เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตามยาว อิวาซากิและคณะ (S. Iwasaki *et al.*) [52], [53] ได้นำเสนอแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่ถูกรเรียกว่า แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (perpendicular recording media) ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยพบว่าแผ่นบันทึกข้อมูลรูปแบบนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุแต่ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลได้เป็นหลายเท่าตัว

ในลำดับถัดมาแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากได้รับการออกแบบและปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีความเหมาะสมอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มค่าความจุข้อมูลและแก้ไขปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้าน โดยรูปแบบของชั้นบันทึกข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ชั้นบันทึกข้อมูลแบบเกรนเดี่ยว (single granular layer, SL) [52], [53] ชั้นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องควบคู่ (coupled granular continuous layer, CGC) [55]–[57] ชั้นบันทึกข้อมูลแบบควบคู่แลกเปลี่ยน (exchange coupled composite layer, ECC) [58], [59] และชั้นบันทึกข้อมูลแบบผสม (ECC/CGC layer) [60]–[63] ตามลำดับ โดยชั้นบันทึกข้อมูลแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

ชั้นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากประเภทแรกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้จริงในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกเรียกว่า ชั้นบันทึกข้อมูลแบบเกรนเดี่ยว (SL) ซึ่งถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยอิวาซากิและคณะในปี ค.ศ. 1975 [52], [53] ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL มีลักษณะเป็นชั้นวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นที่ประกอบด้วยแท่งเกรนแม่เหล็กซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบโลหะเจือโคบอลต์โครเมียม (CoCr alloy) โดยที่เกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนจะถูกคั่นกลางด้วยสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ [107] เพื่อแบ่งขอบเขตของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain boundary) และช่วยลดการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กแสดงดังภาพประกอบ 3.1

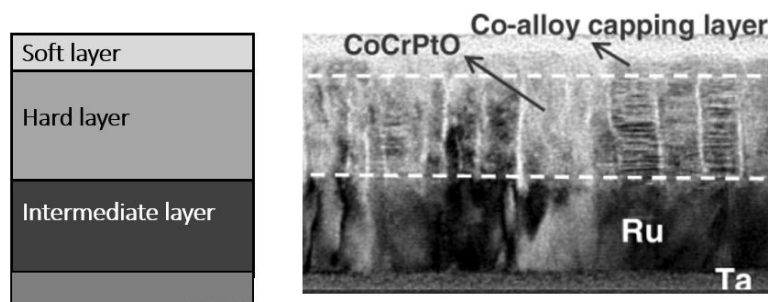


ภาพประกอบ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มค่าความจุของแผ่นบันทึกข้อมูลโดยลดขนาดของเกรนแม่เหล็กจำเป็นจะต้องอาศัยวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงส่งผลทำให้ไม่สามารถสร้างสนามเขียนหรือสนามหมุนกลับ (switching field, H_{sw}) ที่มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลได้นำไปสู่ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลในส่วนของความสามารถในการเขียนข้อมูล นอกจากนี้ยังพบว่าการหมุนกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นอย่างไม่พร้อมเพรียงกันทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวของสนามหมุนกลับ (switching field distribution, SFD) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความชันของอัตราส่วนปกติ M/M_S ที่ผ่านจุด H_C โดยถ้าค่าความชันของอัตราส่วนปกติ M/M_S ที่ผ่านจุด H_C มีค่าสูงหรือมีค่าการกระจายตัวของสนามหมุนกลับที่แคบจะส่งผลทำให้เกิดอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) ที่สูงและจะเพิ่มศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ แต่ในกรณีของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL พบว่ามีค่าการกระจายตัวของสนามหมุนกลับที่สูงส่งผลทำให้ SNR มีค่าต่ำซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ลดน้อยลง

ในเวลาต่อมาได้มีการนำเสนอชั้นบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่สามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในชั้นบันทึกข้อมูลแบบเกรนเดี่ยวได้ซึ่งถูกเรียกว่า แผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องควบคู่ (CGC) [55]–[57] แสดงดังภาพประกอบ 3.2 โดยจะเห็นว่าชั้นบันทึกข้อมูลประเภทนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นย่อยที่ประกอบด้วยชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างและชั้นเหนียวนำด้านบน สำหรับโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กถาวรที่เหนียวนำได้ยาก (hard magnetic materials) ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ ที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีซึ่งแสดงถึงความเป็นแม่เหล็กสูงเพื่อใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ในขณะที่ชั้นเหนียวนำด้านบนจะมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มต่อเนื่องที่ไม่มีสารประกอบออกไซด์คั่นกลางระหว่างเกรนแม่เหล็กซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวนำได้ง่าย (soft magnetic materials) โดยจะมีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ต่ำกว่าชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างเพื่อทำหน้าที่

เป็นตัวช่วยในการเหนี่ยวนำการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างโดยอาศัยปริมาณพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (intergranular exchange coupling) ที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนแม่เหล็กด้านบนและด้านล่างที่เชื่อมติดกัน

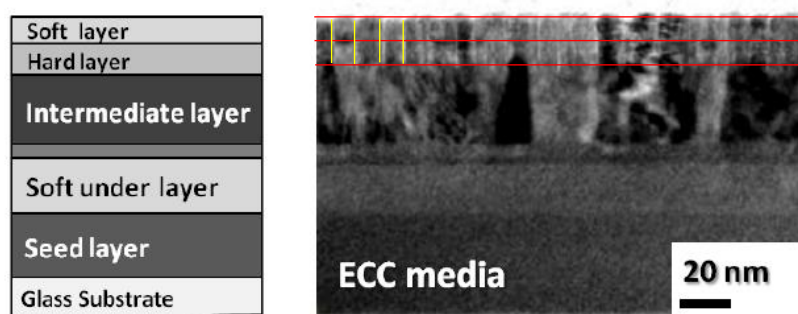


ภาพประกอบ 3.2 แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ CGC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [57]

จากการศึกษาพบว่าชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC มีส่วนช่วยทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดผลของสัญญาณรบกวนภายในระบบเนื่องจากปริมาณพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กของชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างเป็นไปอย่างพร้อมเพรียงกัน (coherent reversal mechanism) ทำให้ค่าการกระจายตัวของสนามหมุนกลับ H_{sw} มีค่าน้อย แต่เมื่อทำการเพิ่มความจุของแผ่นบันทึกข้อมูลโดยลดขนาดของเกรนแม่เหล็กจำเป็นต้องอาศัยวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงส่งผลทำให้ขนาดของสนามเขียนนั้นยังคงมีค่าค่อนข้างสูงและนำไปสู่ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลในส่วนของความสามารถในการเขียนข้อมูล ทำให้มีการนำเสนอชั้นบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ช่วยลดปริมาณสนามเขียนลงได้ซึ่งถูกเรียกว่า ชั้นบันทึกข้อมูลแบบควบคุมแลกเปลี่ยน (ECC) [58], [59] ในเวลาต่อมา

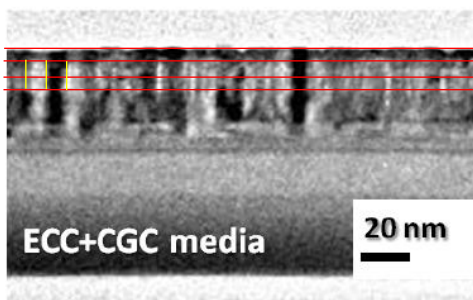
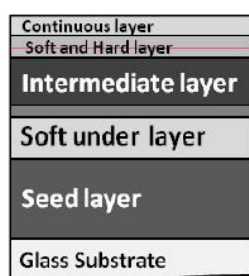
ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC ถูกออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างแบบสองชั้นโดยที่ชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำได้ยากและชั้นเหนี่ยวนำด้านบนยังคงมีลักษณะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำได้ง่ายเพื่อช่วยในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างแสดงดังภาพประกอบ 3.3 อย่างไรก็ตามเกรนแม่เหล็กในชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างและชั้นเหนี่ยวนำด้านบนจะมีการจัดเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกันแสดงลักษณะเป็นแท่งเกรน (columnar stack) โดยเกรนแม่เหล็กทั้งสองชั้นจะถูกคั่นกลางด้วยวัสดุประเภทออกไซด์เช่นเดียวกับกับชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL โดยพบว่าชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC มีส่วนช่วยในการลดขนาดของสนาม-

เขียนได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC เนื่องจากชั้นด้านบนจะมีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีต่ำทำให้สามารถหมุนกลับทิศทางได้ตามทิศของสนามเขียนก่อน ชั้นบันทึกข้อมูลที่อยู่ด้านล่างนำไปสู่การส่งผ่านแรงทอร์กเสริมไปยังแมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลด้านล่างเพื่อช่วยให้สามารถผันกลับทิศทางได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้ค่า H_c ของแผ่นบันทึกข้อมูลดังกล่าวมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC ยังคงประสบกับปัญหาการกระจายตัวของสนามหมุนกลับ SFD ที่มีค่าสูงนำไปสู่ปัญหา SNR เช่นเดียวกันกับชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL



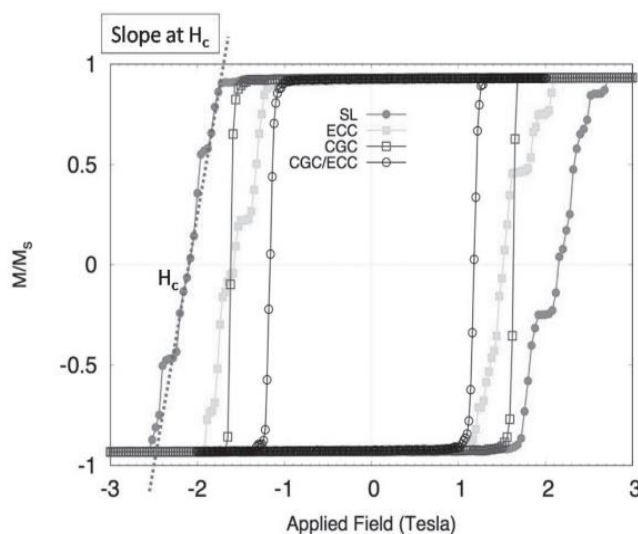
ภาพประกอบ 3.3 แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]

จากปัญหาทั้งหมดที่พบในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลทั้งสามประเภทดังที่ได้อธิบายข้างต้นทำให้มีการออกแบบชั้นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่ถูกเรียกว่า ชั้นบันทึกข้อมูลแบบผสม (ECC/CGC) โดยโนแลนและคณะ (T. P. Nolan *et al.*) ในปี ค.ศ. 2011 [63] ซึ่งเป็นการนำเอาจุดเด่นของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ภาพประกอบ 3.4 แสดงภาพถ่ายสองมิติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC ซึ่งถูกศึกษาโดยจूरูมาศและคณะ (J. Chureemart *et al.*) [92] โดยจะเห็นได้ว่าชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC จะถูกแบ่งออกเป็นสามชั้นโดยแต่ละชั้นมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแตกต่างกัน สำหรับชั้นด้านล่างยังคงถูกรักษาให้เป็นชั้นบันทึกข้อมูลที่มีลักษณะเป็นวัสดุที่เหนียวน้ำได้ยาก ในขณะที่ชั้นเหนียวน้ำตรงกลางและชั้นเหนียวน้ำด้านบนจะยังคงมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่เหนียวน้ำได้ง่ายตามลำดับ



ภาพประกอบ 3.4 แผนภาพอย่างง่ายและภาพตัดขวางของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [48]

การพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลโคบอลต์แพลตทินัม (cobalt platinum, CoPt) เนื่องจากผลของการออกแบบโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ได้แก่ ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC โดยอาศัยการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระดับอะตอม (atomistic model) ถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 2016 โดยแสงมาศและคณะ (O. Saengmart *et al.*) [62] โดยผลการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นบันทึกข้อมูลประเภทต่างๆ ถูกแสดงดังภาพประกอบ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลที่มีความซับซ้อนจะส่งผลทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า H_c และค่าความชันของอัตราส่วนปกติ M/M_s ที่ผ่านจุด $[d(M/M_s)/dH]_{H=H_c}$ โดยรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL มีความกว้างมากที่สุด ในขณะที่ผลของการออกแบบโครงสร้างที่มีความซับซ้อน เช่น ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC จะให้ลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่มีลักษณะแคบซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลให้เป็นแบบหลายชั้นจะส่งผลต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบและส่งผลทำให้ค่าสนามหมุนกลับซึ่งมีค่าแปรผันตามค่า H_c มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เมื่อทำการพิจารณาค่าความชันของอัตราส่วนปกติ M/M_s ที่ผ่านจุด H_c พบว่าในกรณีของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC จะให้ค่าความชันที่สูงกว่าชั้นบันทึกข้อมูลแบบ SL และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC เนื่องจากชั้นฟิล์มต่อเนื่องของชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC และชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC มีส่วนช่วยทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นบันทึกข้อมูลเกิดการผันกลับทิศทางได้อย่างพร้อมเพรียงกันนำไปสู่การลดสนามเขียนและค่าการกระจายตัวของสนามหมุนกลับ SFD



ภาพประกอบ 3.5 การเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นบันทึกรหัสข้อมูลประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 K และตัวอย่างของเส้นความชันที่ผ่านจุด H_c [62]

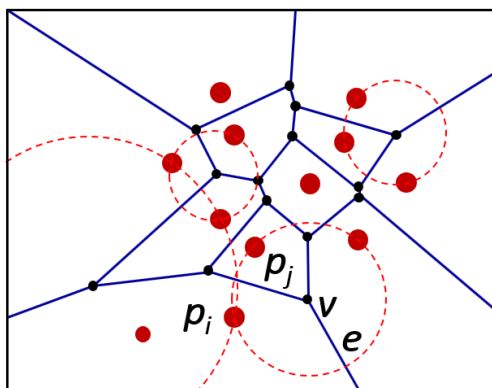
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กและพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลเป็นอย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย โดยโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกจำลองขึ้นจะสามารถควบคุมขนาด ลักษณะการกระจายตัว และความหนาของเกรนแม่เหล็กได้เพื่อใช้สำหรับศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคมอนติคาร์โลตามลำดับ

3.2 โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย

โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยจะถูกใช้สำหรับการจำลองโครงสร้างในด้านวัสดุศาสตร์อย่างแพร่หลายซึ่งมีข้อดีคือ สามารถกำหนดและควบคุมพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการจำลองโครงสร้างวัสดุได้ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้โปรแกรมไวโรนอยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลและหัวข้อข้อมูลในงานวิจัยนี้ โดยในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงลักษณะของโปรแกรมไวโรนอยและการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมไวโรนอยเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการดำเนินงานวิจัยตามลำดับ

3.2.1 แผนภาพโวโรนอย

แผนภาพโวโรนอยเป็นลักษณะการจำลองโครงสร้างรูปแบบหนึ่งซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น ด้านดาราศาสตร์ (astronomy) เพื่อทำนายลักษณะพื้นผิวของดวงดาว ด้านเคมี (chemistry) และด้านวัสดุศาสตร์ (material sciences) เพื่อระบุตำแหน่งของนิวเคลียส (nuclei) ภายในอะตอม เป็นต้น [41], [108] แผนภาพโวโรนอยประกอบด้วยเซตของจุดในระนาบหรือนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอย (Voronoi nucleus, p_i) จำนวน n นิวเคลียสแสดงดังภาพประกอบ 3.6 ระนาบของแผนภาพโวโรนอยจะถูกแบ่งออกจากกันโดยการลากเส้นตรงตัดผ่านบริเวณกึ่งกลางระหว่างนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอยที่อยู่ข้างเคียงกัน (p_i, p_j) ซึ่งถูกเรียกว่า เส้นขอบโวโรนอย (Voronoi edge, e) เพื่อแบ่งระนาบออกเป็นเซลล์โวโรนอยที่มีจำนวนเท่ากับนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอยในระนาบนั้นๆ การสร้างเซลล์โวโรนอยจะทำให้เกิดจุดยอดโวโรนอย (Voronoi vertex, v) ของเซลล์โวโรนอยที่เกิดจากการที่เส้นเชื่อมของเซลล์สามเซลล์มาบรรจบกันเกิดขึ้น จุดยอดโวโรนอยเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีระยะห่างจากนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอยทั้งสามจุดเป็นระยะที่เท่าๆ กันโดยจะไม่มีนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอยอื่นๆ อยู่ในวงกลมดังกล่าว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแผนภาพโวโรนอยเป็นการแบ่งส่วนระนาบออกเป็นเซลล์โวโรนอยจำนวน n เซลล์ ซึ่งทำให้เกิดจุดยอดโวโรนอยจำนวนมากขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอย

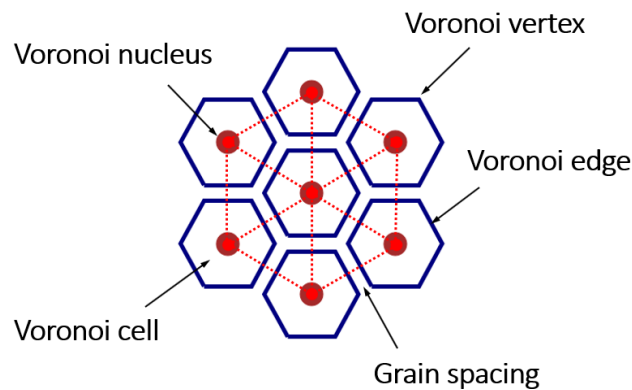


ภาพประกอบ 3.6 แผนภาพโวโรนอยที่เกิดจากการสร้างเส้นเชื่อมโวโรนอยระหว่างนิวเคลียสของเซลล์โวโรนอยภายในระบบ [41], [108]

รูปแบบของแผนภาพโวโรนอยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือ การจัดเรียงตัวของเซลล์โวโรนอยอย่างเป็นระเบียบ (collinear sites form) และการจัดเรียงตัวของเซลล์โวโรนอยแบบสุ่ม (non-collinear sites form) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การจัดเรียงตัวของเซลล์โวลโรนอยอย่างเป็นระเบียบ

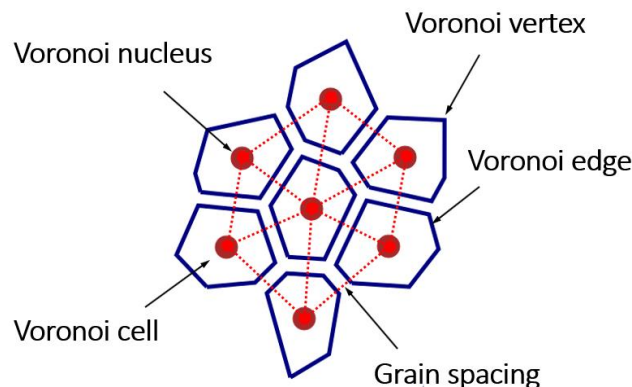
เมื่อทำการลากเส้นเชื่อมเพื่อแบ่งระนาบออกเป็นเซลล์โวลโรนอยในกรณีที่นิวเคลียสของเซลล์โวลโรนอยมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและสมมาตรจะทำให้ได้เซลล์โวลโรนอยที่มีขนาดเท่ากันทุกเซลล์ซึ่งมีรูปร่างเป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal shape) แสดงดังภาพประกอบ 3.7 โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าเซลล์โวลโรนอยภายในระบบจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบด้วยเส้นเชื่อมโวลโรนอยที่มีขนาดเท่ากันทุกด้าน



ภาพประกอบ 3.7 แผนภาพโวลโรนอยที่มีการจัดเรียงนิวเคลียสของเซลล์โวลโรนอยอย่างเป็นระเบียบ

2) การจัดเรียงตัวของเซลล์โวลโรนอยแบบสุ่ม

เมื่อทำการลากเส้นเชื่อมเพื่อแบ่งระนาบออกเป็นเซลล์โวลโรนอยในกรณีที่นิวเคลียสของเซลล์โวลโรนอยมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มและไม่สมมาตรจะได้เซลล์โวลโรนอยที่มีลักษณะแตกต่างกันเนื่องจากระยะห่างระหว่างนิวเคลียสของเซลล์โวลโรนอยมีค่าไม่เท่ากันส่งผลทำให้เส้นเชื่อมเซลล์โวลโรนอยมีความยาวแตกต่างกันนำไปสู่การแบ่งเซลล์โวลโรนอยที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวและมีขนาดที่ไม่เท่ากันแสดงดังภาพประกอบ 3.8



ภาพประกอบ 3.8 แผนภาพโวลโรนอยที่มีการจัดเรียงนิวเคลียสของเซลล์โวลโรนอยเป็นแบบสุ่ม

3.2.2 การกำหนดโครงสร้างแบบแกรนูลาร์

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมีความจำเป็นจะต้องทำการจำลองระบบโครงสร้างวัสดุที่ต้องการศึกษาเป็นลำดับแรก ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมโวลโรนอยเพื่อกำหนดลักษณะโครงสร้างแบบแกรนูลาร์ของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยโปรแกรมโวลโรนอยสามารถกำหนดตัวแปรควบคุม (input parameters) สำหรับการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเพื่อให้ได้ลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีความเสมือนจริง เช่น ขนาดของระบบ (system dimension) ขนาดของเกรนแม่เหล็ก (grain size) ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (grain spacing) และการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก (grain size distribution) เป็นต้น การประมวลผลของโปรแกรมโวลโรนอยด้วยตัวแปรควบคุมที่ถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรมจะทำให้ได้ตัวแปรตาม (output parameters) หรือชุดข้อมูลของระบบที่ถูกสร้างขึ้น ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของเกรนแม่เหล็ก จำนวนและตำแหน่งของเกรนแม่เหล็กข้างเคียง (nearest neighbor grains) และความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน (relative exchange field strength) เป็นต้น

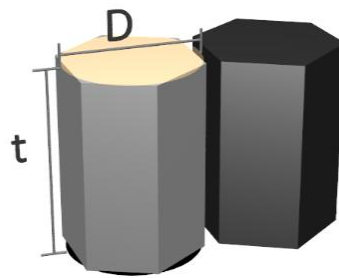
สำหรับเกรนแม่เหล็กหรือเซลล์โวลโรนอยที่ถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรมโวลโรนอยถูกพิจารณาจากจุดยอดโวลโรนอยที่เส้นเชื่อมของเซลล์โวลโรนอยหลายเซลล์มาบรรจบกันส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็กมีขนาดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กในระบบ เนื่องด้วยโครงสร้างภายในของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กรูปทรงคล้ายปริมาตรรูปทรงกระบอกเชื่อมติดกันแสดงดังภาพประกอบ 3.9 ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์มดังสมการ

$$V = At = \frac{\pi D^2}{4} t \quad (3.1)$$

- เมื่อ V คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain volume)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็ก (cross sectional area)
 t คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม (film thickness) และ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain diameter)

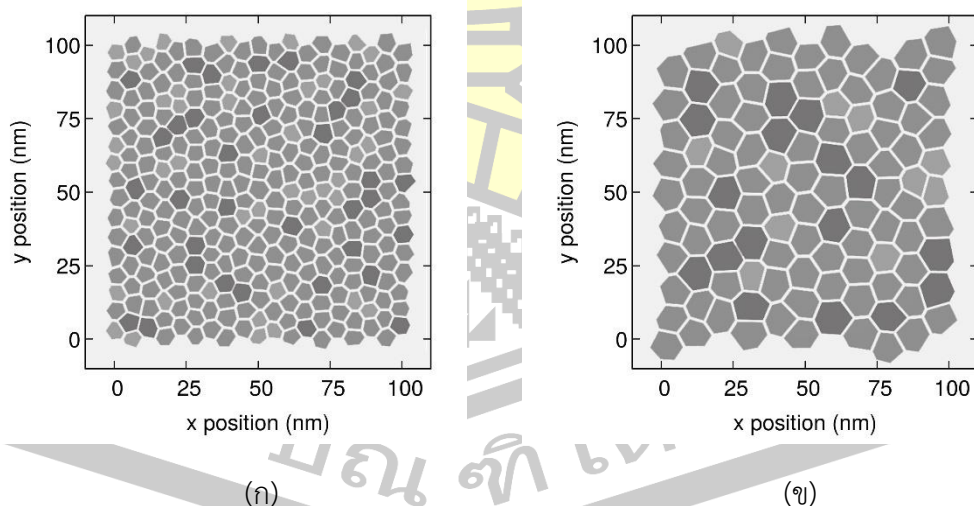
ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็กจะถูกประมาณค่าให้มีลักษณะพื้นที่วงกลมซึ่งสามารถพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบได้ดังสมการ

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.2)$$



ภาพประกอบ 3.9 การพิจารณาพื้นที่หน้าตัดและปริมาตรของเซลล์ไวโรนอยหรือเกรนแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย

นอกจากนี้โปรแกรมไวโรนอยยังสามารถกำหนดขนาดของโครงสร้างของแผ่นฟิล์มแม่เหล็กของระบบที่พิจารณาและกำหนดขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบที่ถูกสร้างขึ้นให้มีความเสมือนจริงได้ โดยตัวแปรทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ยกตัวอย่างการจำลองระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ซึ่งมีการกำหนดให้ขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบมีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 4 nm และ 10 nm แสดงดังภาพประกอบ 3.10(ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าระบบโครงสร้างทั้งสามระบบจะถูกกำหนดให้มีขนาดคงที่ด้วยความกว้าง 100 nm และความยาว 100 nm สำหรับระบบที่ทำการกำหนดเกรนที่มีขนาดเล็กเท่ากับ 4 nm โปรแกรมไวโรนอยจะสร้างเกรนแม่เหล็กขนาดเล็กทำให้ได้เกรนแม่เหล็กด้วยจำนวนที่มากกว่าระบบที่มีขนาดเกรนแม่เหล็กเท่ากับ 10 nm



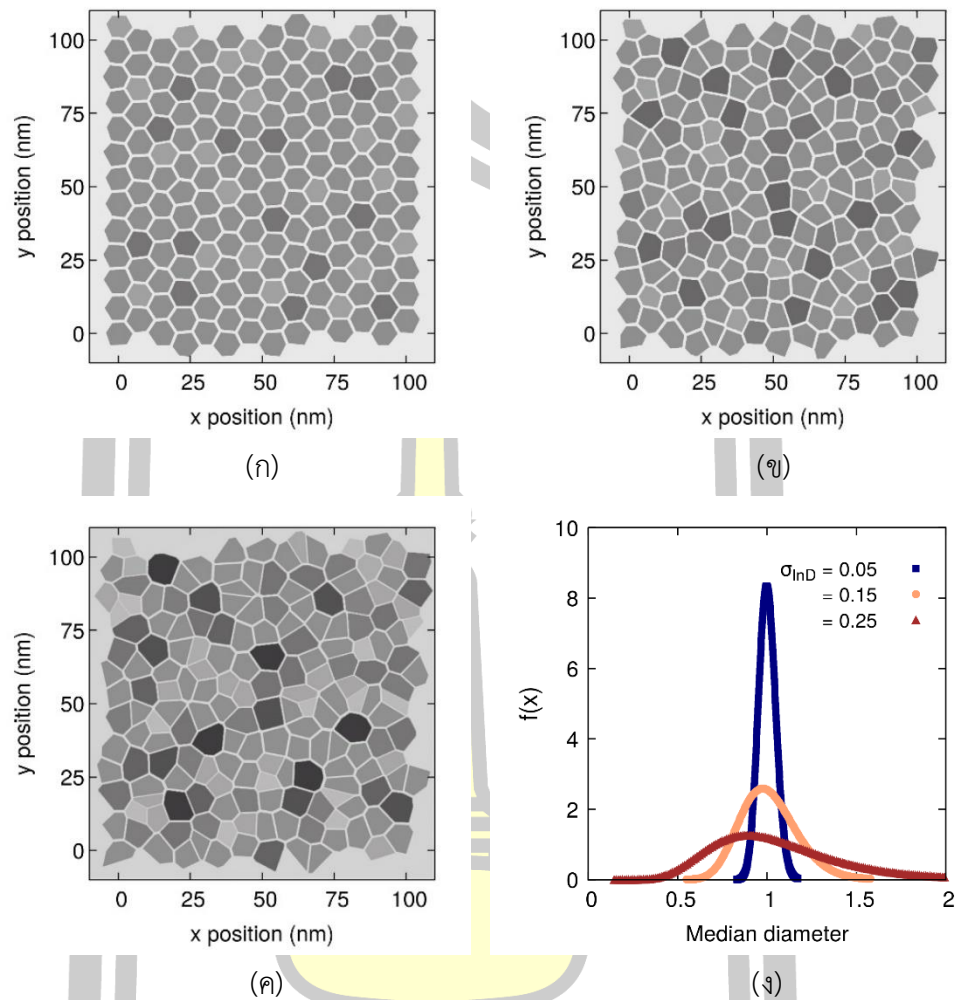
ภาพประกอบ 3.10 ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรมไวโรนอยสำหรับระบบที่มีขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ (ก) 4 nm และ (ข) 10 nm ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้ขนาดของระบบโครงสร้างวัสดุรวมไปถึงการกำหนดขนาดของเกรนภายในระบบนั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงเพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการคำนวณเนื่องจากในการศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยอาศัยการคำนวณทางคอมพิวเตอร์นั้นค่อนข้างที่จะใช้ระยะเวลายาวนาน

3.2.3 การกำหนดลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก

การเลือกใช้โปรแกรมไวโรนอยเพื่อจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลไม่เพียงแต่ช่วยให้สามารถกำหนดขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบได้เท่านั้น แต่ยังสามารถกำหนดลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้การจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลมีลักษณะเสมือนจริงได้ ในการกำหนดการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กสามารถทำได้โดยใช้ตัวแปรที่ถูกเรียกว่า ค่าระยะการเคลื่อนที่ (distance to move, δ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกใช้เพื่อทำให้ตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์ไวโรนอยเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมมาตรในลักษณะแบบสุ่ม โดยโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นด้วยระยะการเคลื่อนที่ δ ที่มีค่าน้อยจะไม่ส่งผลทำให้ตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์ไวโรนอยเคลื่อนที่และยังคงมีลักษณะสมมาตรทำให้เกิดการแบ่งเซลล์ไวโรนอยหรือเกรนแม่เหล็กที่เป็นระเบียบและมีขนาดสม่ำเสมอ แต่ในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นด้วยระยะการเคลื่อนที่ δ ที่มีค่ามากจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์ไวโรนอยแบบสุ่มทำให้เกิดการแบ่งเซลล์ไวโรนอยหรือเกรนแม่เหล็กที่ไม่มีเป็นระเบียบและมีขนาดที่ไม่เท่ากันนำไปสู่ลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก โดยระยะการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ถูกจำลองขึ้นและสามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรในการพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก (standard deviation of grain size distribution, σ_{IND}) ได้โดยอาศัยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข [43]

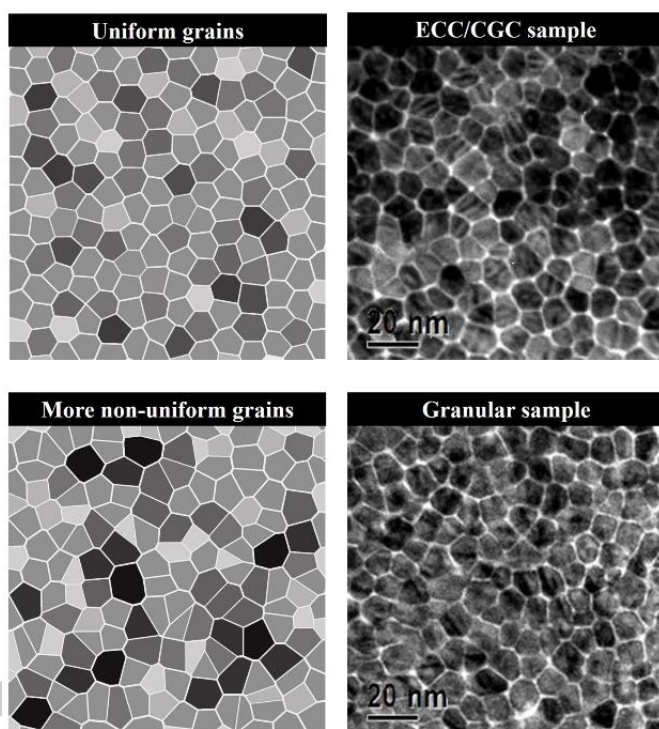
พูน ปรณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 3.11 ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรม โวโรนอยในกรณีที่ σ_{mD} มีค่าเท่ากับ (ก) 0.05 (ข) 0.15 และ (ค) 0.25 ตามลำดับ และ (ง) ผลการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กทั้งสามกรณี

ตัวอย่างโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ที่กำหนดให้ค่ากลางของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 8 nm และมีลักษณะการกระจายของขนาดของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกันถูกแสดงในภาพประกอบ 3.11 เมื่อ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันแสดงค่าความหนาแน่นหรือความถี่ (density function) ของเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกันภายในระบบ โดยในกรณีที่กำหนดให้ระยะการเคลื่อนที่ δ มีค่าน้อยจะเห็นได้ว่าเกรนแม่เหล็กทั้งหมดภายในระบบจะมีขนาดเสมือนและมีรูปร่างคล้ายรูปหกเหลี่ยมและทำให้สามารถพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กได้เท่ากับ $\sigma_{mD} = 0.05$ แสดงภาพประกอบ 3.11(ก) เมื่อกำหนดให้ระยะการเคลื่อนที่ δ มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะพบว่าลักษณะของเกรนแม่เหล็กภายในระบบขาดความเสมือนและมี

รูปร่างบิดเบี้ยวและหยาบๆ) ให้สามารถพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กได้เท่ากับ $\sigma_{\text{InD}} = 0.15$ และ 0.25 แสดงภาพประกอบ 3.11(ข) และ (ค) ตามลำดับ ผลการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่กำหนดให้ระยะการเคลื่อนที่ δ มีค่าแตกต่างกันทำให้เกรนแม่เหล็กภายในระบบมีค่าการกระจายตัวที่แตกต่างกัน เมื่อทำการพิจารณาเส้นกราฟการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กเปรียบเทียบกับทั้ง 3 กรณีดังแสดงในภาพประกอบ 3.11(ง) จะพบว่าขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบที่มีค่า $\sigma_{\text{InD}} = 0.05$ มีแนวโน้มการกระจายตัวค่อนข้างแคบและมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) แต่ในกรณีที่ค่า $\sigma_{\text{InD}} = 0.15$ และ 0.25 จะเห็นได้ว่าขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบมีแนวโน้มการกระจายตัวที่เพิ่มสูงขึ้นและมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปกติล็อก (log normal distribution) [109] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ระบบมีค่า $\sigma_{\text{InD}} = 0.25$



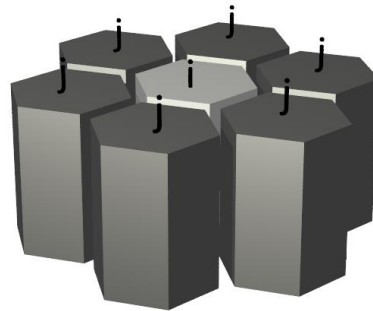
ภาพประกอบ 3.12 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยกับภาพถ่าย TEM ของเกรนแม่เหล็กภายใน (ก) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม และ (ข) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบเกรนเดี่ยว [40], [48]

ภาพประกอบ 3.12(ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบลักษณะของขนาดของเกรนแม่เหล็กแบบ 2 มิติที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมและแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ เกรนเดี่ยวที่

เป็นภาพถ่าย 2 มิติบนระนาบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (in-plane transmission electron microscopy) [48] ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างและการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรมไวโรนอยจะให้ลักษณะโครงสร้างที่มีความใกล้เคียงกับโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมไวโรนอยสามารถจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลได้เสมือนจริงและให้ค่าจากการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลอง

3.2.4 การคำนวณค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน

โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยยังมีข้อดีคือ สามารถพิจารณาค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน (relative exchange field strength, f_{ij}) ที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันได้ ในหัวข้อนี้จะได้ยกตัวอย่างการพิจารณาค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันในระบบโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กภายในระบบทั้งหมดจำนวน 7 เกรนดังแสดงในภาพประกอบ 3.13 โดยกำหนดให้เกรนแม่เหล็กที่พิจารณาหรือเกรนอ้างอิง (referred grain, i) อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของระบบซึ่งมีเกรนเชื่อมติดที่ใกล้ที่สุดหรือเกรนข้างเคียง (nearest neighbor grain, j) อยู่บริเวณล้อมรอบจำนวน 6 เกรน ดังนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าเกรนอ้างอิง i จะเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนกับเกรนข้างเคียง j ทั้งหมดจำนวน 6 เกรน



ภาพประกอบ 3.13 การพิจารณาเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j ในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอย

การพิจารณาค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน f_{ij} ถูกนำเสนอขึ้นโดยเพงและคณะ (Y. Peng *et al.*) [110] โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ

$$f_{ij} = \left(\frac{J_{ij}}{J_m} \right) \left(\frac{L_{ij}}{L_m} \right) \left(\frac{A_m}{A_i} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ J_{ij} คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (exchange constant between grains)

J_m คือ ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (median exchange constant)

- L_{ij} คือ ระยะความยาวที่เชื่อมติดกันระหว่างเกรน (contact length between grains)
 L_m คือ ค่าเฉลี่ยของระยะความยาวที่เชื่อมติดกัน (median contact length)
 A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนอ้างอิง i (crosssectional area of grain i)
 A_m คือ ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดของเกรนในระบบ (median crosssectional area)

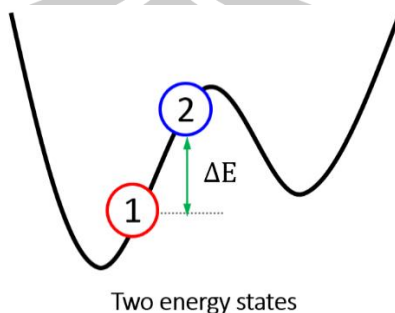
จากสมการ (3.3) พบว่าถ้าแผ่นบันทึกข้อมูลมีขนาดของเกรนแม่เหล็กที่แตกต่างกันจะทำให้ค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน f_{ij} มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของเกรนและระยะความยาวที่เชื่อมติดกันมีค่าเปลี่ยนแปลงนำไปสู่การกระจายตัวของค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน f_{ij}

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กส่งผลต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของระบบวัสดุแม่เหล็กเป็นอย่างมาก ดังนั้นข้อมูลโครงสร้างวัสดุเสมือนจริงที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมโมโรโนยจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับวิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ขั้นสูงโดยอาศัยเทคนิคมอนติคาร์โลเพื่อใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่สภาวะสมดุลซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

3.3 ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โล

การอธิบายและแก้ไขปัญหาทางฟิสิกส์เชิงทฤษฎีในระบบสสารควบแน่น (condensed matters) สามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการพิจารณาความน่าจะเป็น (probabilistic means) ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายคือ ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) [111] ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โลเป็นวิธีการคำนวณเชิงสถิติที่อาศัยการสุ่มเลือกตัวอย่าง (random sampling) ของฟังก์ชันใดๆ ที่ต้องการพิจารณาเพื่อนำมาคำนวณและวิเคราะห์โอกาสความน่าจะเป็นทางสถิติโดยอาศัยฟังก์ชันความน่าจะเป็น (probability function) ซึ่งความแม่นยำในการคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดที่ทำการคำนวณ (number of points, N) [112]–[114] โดยทั่วไปแล้ววิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิส (Metropolis Monte Carlo, MC) จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาโอกาสความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะของอนุภาคสำหรับระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium state) หรือระบบที่อนุภาคมีค่าพลังงานต่ำที่สุด (energy minimum) ยกตัวอย่างในกรณีของอนุภาคที่มีภูมิภาพของพลังงาน (energy landscape) แสดงดังภาพประกอบ 3.14 จะเห็นได้ว่าอนุภาคดังกล่าวมีโอกาสเกิดความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ (transition probability) ระหว่างสองสถานะพลังงาน (two energy states) ซึ่งเชื่อมติดอยู่

ในอ่างความร้อน (heat bath) เดียวกันจากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 ได้ถ้าค่าพลังงานในสถานะที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานต่ำที่สุดในสถานะที่ 1



ภาพประกอบ 3.14 การพิจารณาผลต่างระหว่างสองสถานะพลังงานของอนุภาคที่จำเป็นต้องเอาชนะเพื่อทำให้เกิดโอกาสในการเปลี่ยนแปลงทิศทางจากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 [115]

แม้ว่าวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสจะมีลักษณะที่เหมาะสมต่อการอธิบายคุณสมบัติของระบบวัสดุแม่เหล็กได้ แต่วิธีการนี้ยังคงมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถอธิบายพลวัตของอนุภาคหรือโมเมนต์แม่เหล็กที่พิจารณาได้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้เฉพาะระบบที่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ถูกใช้สำหรับการคำนวณด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสจะไม่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับเวลาจริงได้ ทำให้มีการพัฒนาวิธีการมอนติคาร์โลแบบใหม่ที่สามารถเชื่อมโยงลำดับขั้นของวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิส (MC step) ร่วมกับเวลาจริงได้ซึ่งถูกเรียกว่า วิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo) [42], [116] เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสพบว่าวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์สามารถนำมาใช้พิจารณาระยะเวลาจริงที่ใช้สำหรับการคำนวณพลวัตของอนุภาคหรือโมเมนต์แม่เหล็กได้ในกรณีที่ค่าพลังงานเริ่มต้น (initial energy) หรือค่าพลังงานอิสระ (free energy) มีค่าสูงกว่าค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยเท่านั้น เนื่องจากการดำเนินการด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้อนุภาคหรือโมเมนต์แม่เหล็กอยู่ระหว่างสองสถานะพลังงานที่ต่ำที่สุด (two minima energy states) ของระบบซึ่งถ้าหากค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของโมเมนต์แม่เหล็กมีค่ามากกว่าค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กที่ได้รับการกระตุ้นทางความร้อนยังคงสามารถรักษาระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดไว้ได้ แต่เมื่อใดก็ตามที่สถานะพลังงานที่ต่ำที่สุดสองสถานะมีค่าใกล้เคียงกันมากพบว่าโมเมนต์แม่เหล็กจะสามารถอยู่ในสถานะพลังงานใดก็ได้ซึ่งในกรณีนี้วิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสจะถูกนำกลับมาพิจารณาร่วมด้วย

สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวนำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากมีปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง $K_U \sim 10^6 - 10^7 \text{ erg/cm}^3$ [9], [60], [107] เพื่อให้แผ่นบันทึกข้อมูลสามารถรักษาข้อมูลเชิงแม่เหล็กได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน อย่างไรก็ตามในระบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่ช่วงอุณหภูมิใดๆ จะเกิดโอกาสที่ผลของความร้อนมีอิทธิพลมากกว่าค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กภายในระบบซึ่งนำไปสู่โอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน เนื่องจากผลการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation process) ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.4.2 โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันตามกฎของอาเร็นเนียส-นิล [103] ในสมการ (2.16) กล่าวคือ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_B T} \right] \quad (3.4)$$

- เมื่อ τ คือ ระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation time) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ทำให้ปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในระบบมีค่าลดลง $1/e$ หรือประมาณ 37% ของค่าแมกนีไทเซชันรวมเริ่มต้น
- ΔE คือ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่จะต้องเอาชนะเพื่อทำให้เกิดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าคงที่แอนไอโซโทรปีและปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา $\Delta E = K_U V$
- f_0 คือ ค่าคงที่ของการสั่นหรือค่าความถี่ทดลอง (attempt frequency) ซึ่งมีค่าโดยประมาณ $10^9 - 10^{10} \text{ Hz}$ [117], [118]
- k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน
- T คือ อุณหภูมิของระบบในหน่วยเคลวิน (K)

สำหรับกรณีที่กำหนดให้ระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับระยะเวลาในการวัดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชัน $\tau = t$ ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าปริมาตรวิกฤตของเกรนแม่เหล็ก (critical volume, V_C) ที่เป็นตัวกำหนดสถานะของวัสดุแม่เหล็กจะมีค่าเป็น $V_C = \ln(t f_0) k_B T / K_U$ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่สอดคล้องกับค่าพลังงานของระบบนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกพฤติกรรมทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กภายในระบบซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสองเฟส โดยเฟสแรกคือเฟสของวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก (SPM phase) ซึ่งปริมาตรของเกรนแม่เหล็กจะมีค่าน้อยกว่าปริมาตรวิกฤต $V < V_C$ ส่งผลทำให้จำเป็นจะต้องใช้เวลาในการวัดสถานะของแมกนีไทเซชันยาวนานกว่าระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่สูงมาก $t \gg \tau$ เพื่อให้ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลทางความร้อน (thermal equili-

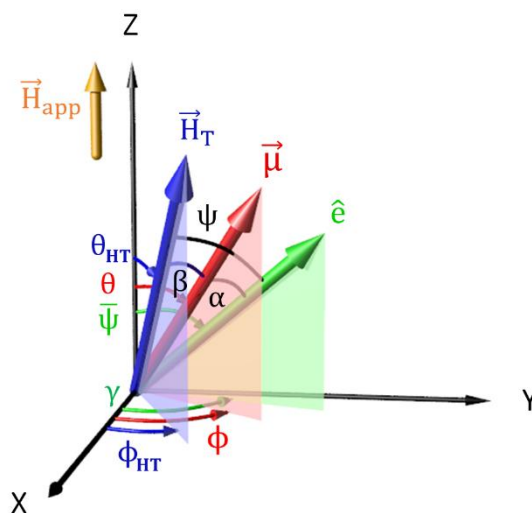
brium) ได้ สำหรับเฟสที่สองคือเฟสที่เกรนแม่เหล็กมีความสามารถทนต่อความร้อนได้ (thermally stable, TS phase) กล่าวคือแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กที่อยู่ในเฟสนี้จะสามารถคงทิศทางอยู่ได้ โดยไม่เกิดการผันกลับทิศทางเนื่องจากอิทธิพลของความร้อน

แม้ว่าจะสามารถทำการจำแนกเกรนแม่เหล็กที่มีเฟสแม่เหล็กทั้งสองเฟสออกจากกันได้ โดยอาศัยการพิจารณาค่าปริมาตรวิกฤตตั้งที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่พบว่าเกรนแม่เหล็กที่มีเฟสแม่เหล็กแตกต่างกันนี้จะไม่สามารถทำการพิจารณาแยกจากกันได้อย่างชัดเจนเนื่องจากเกรนแม่เหล็กเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนที่เชื่อมติดกันทำให้จำเป็นต้องใช้วิธีการที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของเกรนแม่เหล็กทั้งสองเฟสที่อยู่ภายในระบบเดียวกันได้อย่างถูกต้อง [42], [116] ดังนั้นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้จะได้นำเอาเทคนิคมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสและเทคนิคมอนติคาร์โลเชิงจลน์มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เทคนิคมอนติคาร์โลในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กจำเป็นจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้งาน ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าแบ่งสถานะ (cut-off value) เพื่อใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตการคำนวณระหว่างวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสและวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ [42] โดยในกรณีที่ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กที่ถูกพิจารณานั้นมีค่าน้อยกว่าสามเท่าของค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ย $\Delta E \leq 3k_B T$ หรือเกรนแม่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันจะถูกดำเนินการด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิส แต่ในกรณีที่เกรนแม่เหล็กมีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กสูงเป็น $\Delta E > 3k_B T$ การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันจะถูกดำเนินการด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ [42], [119] ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

แบบจำลองที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้จะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคมอนติคาร์โลที่เป็นการพิจารณาร่วมกันระหว่างวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสและวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล เนื่องจากสามารถอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในระยะยาวได้อย่างรวดเร็ว [42], [43] และสามารถนำมาใช้สำหรับพิจารณาโอกาสความน่าจะเป็นในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งช่วยให้สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ลงได้เป็นอย่างมาก แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกนำเสนอขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบจำลองเสมือนจริงที่สามารถพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กจากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายและค่าสนามแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ ภายในระบบโครงสร้างวัสดุ

แม่เหล็กได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในลำดับแรกเกรนแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย เพื่อให้สามารถควบคุมขนาดของเกรนแม่เหล็กและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่มีความเสมือนจริงได้ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.2 ภายหลังจากนั้น ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน (anisotropy easy axes, \hat{e}) จะถูกกำหนดขึ้นแบบสุ่มในระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) โดยอาศัยฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution function) ด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้สามารถกำหนดมุมของการกระจายตัวได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมการกระจายตัว (easy axis dispersion, σ_ϕ) โดยทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันชั้นจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันของมุม ψ และ γ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) $\hat{e}(\psi, \gamma)$ แสดงดังภาพประกอบ 3.15 สำหรับทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว $\vec{\mu} = \vec{\mu}(\theta, \phi)$ เช่นเดียวกัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณสนามแม่เหล็กรวมภายในระบบจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันของมุม θ_{HT} และ ϕ_{HT} ซึ่งเป็นมุมระหว่างทิศการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (applied field, \vec{H}_{app}) และทิศของสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา $\vec{H}_T(\theta_{HT}, \phi_{HT})$



ภาพประกอบ 3.15 ระบบพิกัดของแมกนีไทเซชันที่มีการกระจายตัวออกจากทิศแกนง่ายในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบ [116]

การคำนวณโอกาสในการเปลี่ยนแปลงสถานะของแมกนีไทเซชันตามพื้นฐานของวิธีการมอนติคาร์โลจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงค่าพลังงานเริ่มต้นซึ่งในที่นี้คือค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก

ภายในเกรนแม่เหล็กที่พิจารณาเป็นอันดับแรก แบบจำลองนี้ได้ประยุกต์ใช้รูปแบบพลังงานของ Stoner – Wohlfarth [100] ซึ่งเป็นผลรวมของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (anisotropy energy) และค่าพลังงานสนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นภายในระบบ (total field energy) แสดงดังสมการ

$$\Delta E = E_K + E_{HT} \quad (3.5)$$

เมื่อ E_K คือ ค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และ
 E_{HT} คือ ค่าพลังงานสนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นภายในระบบ

สำหรับค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก E_K ที่ถูกใช้ในการอธิบายการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศแกนง่ายมีค่าดังสมการ

$$E_K = K_U V (\hat{e} \cdot \hat{m})^2 \quad (3.6)$$

เมื่อ \hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน
 \hat{m} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชัน

ในแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้ทิศแกนง่าย \hat{e} มีลักษณะการกระจายตัวตามฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนเพื่อให้สามารถพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายได้ และเนื่องจากค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กเป็นปริมาณที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิ $K(T)$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้พิจารณาถึงความไม่อิสระต่ออุณหภูมิของค่าคงที่แอนไอโซโทรปีโดยอาศัยทฤษฎีของคัลเลน – คัลเลน (Callen - Callen theory) [66] แสดงดังสมการ

$$K(T) = K(0) \left[\frac{M(T)}{M(0)} \right]^n \quad (3.7)$$

เมื่อ $K(0)$ คือ ค่าแอนไอโซโทรปีที่อุณหภูมิมิค่าเท่ากับ 0 K
 $K(T)$ คือ ค่าแอนไอโซโทรปีที่อุณหภูมิใดๆ ที่ต้องการพิจารณา
 $M(0)$ คือ ค่าแมกนีไทเซชันรวมที่อุณหภูมิมิค่าเท่ากับ 0 K
 $M(T)$ คือ ค่าแมกนีไทเซชันรวมที่อุณหภูมิใดๆ ที่ต้องการพิจารณา
 n คือ เลขชี้กำลังที่มีค่าเฉพาะขึ้นกับประเภทของวัสดุแม่เหล็กซึ่งถูกพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 3 สำหรับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก [36]

สำหรับค่า E_{H_T} นั้นจะถูกพิจารณาจากปริมาณสนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นภายในระบบ (total local field, \vec{H}_T) ที่กระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรน $\vec{\mu}$ แสดงดังสมการ

$$E_{H_T} = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}_T \quad (3.8)$$

โดยที่ค่า \vec{H}_T จะประกอบไปด้วยปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ \vec{H}_{app} ปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing หรือ dipolar field, \vec{H}_{dip}) และปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก \vec{H}_{exch} นั่นคือ

$$\vec{H}_T = \vec{H}_{app} + \vec{H}_{dip} + \vec{H}_{exch} \quad (3.9)$$

สำหรับปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H}_{app} ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อเหนี่ยวนำทำให้เกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กซึ่งสามารถนิยามได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{app} = H\hat{e}_z \quad (3.10)$$

เมื่อ \hat{e}_z คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

H คือ ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ

สำหรับปริมาณสนามหักล้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากเกรนใดๆ j ทั้งหมดภายในระบบกระทำอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระยะไกลต่อเกรนอ้างอิง i ซึ่งนิยามด้วยสัญลักษณ์ $\vec{H}_{i,dip}$ สามารถเขียนได้ดังสมการ [43]

$$\vec{H}_{i,dip} = \sum_{j \neq i} \left[\frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \quad (3.11)$$

เมื่อ $\hat{\mu}_j$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งแสดงถึงทิศทางของเกรนข้างเคียง

\hat{r}_{ij} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางระหว่างเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\hat{r}_{ij} = \vec{r}_{ij}/|\vec{r}_{ij}|$

\vec{r}_{ij} คือ เวกเตอร์ระหว่างเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j

$|\vec{r}_{ij}|$ คือ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{r}_{ij}

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าสนามแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นกับเกรนอ้างอิง i เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนกับเกรนข้างเคียง j ทั้งหมดได้จากสมการ [110]

$$\vec{H}_{\text{exch}}^{ij} = H_{\text{exch}} \sum_{i \neq j}^{nn} f_{ij} \hat{\mu}_j \quad (3.12)$$

โดยที่ $H_{\text{exch}} = J_m L_m / (t^2 M_s A_m)$ และ $f_{ij} = \left(\frac{J_{ij}}{J_m}\right) \left(\frac{L_{ij}}{L_m}\right) \left(\frac{A_m}{A_i}\right)$ [110] เมื่อแทนค่าสนามแม่เหล็กประเภทต่างๆ ลงในสมการ (3.9) ซึ่งแสดงถึงค่าสนามแม่เหล็กรวมของระบบจะได้ว่า

$$\vec{H}_T = H \hat{e}_z + \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{\mu}_i \cdot \hat{r}_{ij}) \hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_i}{r_{ij}^3} \right] + H_{\text{exch}} \sum_{i \neq j}^{nn} f_{ij} \hat{\mu}_j \quad (3.13)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (3.6) และ (3.8) ลงในสมการ (3.5) จะสามารถเขียนค่า ΔE ของเกรนแม่เหล็กใหม่ได้เป็น

$$\Delta E = K_U V (\hat{e} \cdot \hat{m})^2 - \vec{\mu} \cdot \vec{H}_T \quad (3.14)$$

หรือ

$$\Delta E = K_U V \sin^2 \alpha - \mu H_T \cos \beta \quad (3.15)$$

เมื่อ μ คือ ขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันที่ถูกพิจารณาซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวและปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา $\mu = MV$
 α คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันและทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน
 β คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กรวมภายในระบบซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังภาพประกอบ 3.13 และนิยามได้ดังนี้

$$\cos \alpha = \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta \cos (\gamma - \phi) \quad (3.16)$$

และ

$$\cos \beta = \cos \theta_{HT} \cos \theta + \sin \theta_{HT} \sin \theta \cos (\phi_{HT} - \phi) \quad (3.17)$$

การดำเนินการด้วยวิธีการมอนติคาร์โลแบบมาตรฐานหรือวิธีการเมโทรโพลิสสามารถพิจารณาได้จากการสุ่มเลือกแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนและกำหนดทิศทางใหม่ให้กับแมกนีไทเซชันดังกล่าวด้วยการเคลื่อนที่แบบทดสอบ (trial move) จากนั้นทำการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กรวม \vec{H}_T ในสมการ (3.13) และค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก ΔE ในสมการ (3.15) เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบ การดำเนินการด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเมโทรโพลิสสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สุ่มเลือกเกรนแม่เหล็กที่ต้องการพิจารณาและกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชัน
2. สร้างสถานะใหม่ของแมกนีไทเซชันด้วยการเคลื่อนที่แบบทดสอบ

3. คำนวณผลต่างของค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันระหว่างสถานะใหม่ E_{new} และสถานะเริ่มต้น E_{current} กล่าวคือ $\Delta E = E_{\text{new}} - E_{\text{current}}$ ตามสมการ (3.15)
4. คำนวณค่าโอกาสในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน P โดยอาศัยสมการ

$$P = e^{\left[\frac{-\Delta E}{k_B T}\right]} \quad (3.18)$$
5. เปรียบเทียบค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะ P กับตัวเลขสุ่ม (random number, x) ที่ถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง $x(0,1)$ ซึ่งถ้าค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะมีค่ามากกว่าตัวเลขสุ่ม $P_t > x$ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของแมกนีไทเซชันหรือทำให้แมกนีไทเซชันสามารถผันกลับทิศทางได้ ในทางตรงกันข้าม ถ้า $P_t < x$ จะทำให้แมกนีไทเซชันไม่สามารถเกิดการผันกลับทิศทางได้
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 – 5 ตามจำนวนครั้งที่ต้องการคำนวณ N เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้อง
7. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 อีกครั้งตามจำนวนเกรนแม่เหล็กทั้งหมดภายในระบบ
8. ปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในระบบจะมีค่าเท่ากับผลเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กทุกเกรนภายในระบบ

แบบจำลองนี้ยังได้รวมผลการพิจารณาความไม่อิสระของมุม (angular dependence)

ต่อค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายร่วมด้วย ดังนั้นค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กจะถูกพิจารณาให้มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของมุมระหว่างทิศแกนง่ายและทิศทางของสนามแม่เหล็กรวม โดยในกรณีที่ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กรวมกล่าวคือ $\bar{\psi} = 0$ ทำให้สามารถเขียนค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กได้เป็น

$$\Delta E(H_T, \bar{\psi} = 0) = \Delta E_0 (1 - h_T)^2 \quad (3.19)$$

เมื่อ $\Delta E_0 = \Delta E_a = K_U V$ และ $h_T = H_T/H_K$ สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันทำมุมใดๆ กับทิศของสนามแม่เหล็กกล่าวคือ $\bar{\psi} \neq 0$ จะไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงเนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณ ซึ่งมีความจำเป็นจะต้องนำเอาวิธีการประมาณเชิงตัวเลข (numerically approximate expression) [120] มาใช้ในการพิจารณาโดยค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของค่าสนามแม่เหล็กรวม H_T และมุม $\bar{\psi}$ แสดงดังสมการ

$$\Delta E(H_T, \bar{\psi}) = K_U V \left[1 - \frac{h_T}{g(\bar{\psi})} \right]^{\kappa(\bar{\psi})} \quad (3.20)$$

เมื่อ $g(\bar{\psi}) = [\cos^{2/3}\bar{\psi} + \sin^{2/3}\bar{\psi}]^{-3/2}$ และ $\kappa(\bar{\psi}) = 0.86 + 1.14g(\bar{\psi})$ เป็นรูปแบบการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกลำเอียงมาใช้ในการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่มีมุมเฟสระหว่างทิศแกนง่ายและสนามแม่เหล็กรวมมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางต่างกัน กล่าวคือ $\bar{\psi} \neq 0$ [120] ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.19) และ (3.20) จะถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่แต่ละสถานะพลังงานแสดงดังสมการ

$$\tau^{-1}(H_T, T, \bar{\psi}) = f_0 \exp \left[\frac{-\Delta E(H_T, \bar{\psi})}{k_B T} \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ $\Delta E(H_T, \bar{\psi})$ คือ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กรวมของแมกนีไทเซชัน

$\bar{\psi}$ คือ มุมระหว่างทิศแกนง่ายและทิศทางของสนามแม่เหล็กรวม

จากนั้นผลรวมของระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (total relaxation time) ของระบบที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลง (transition rate) ระหว่างสถานะที่มีพลังงานต่ำที่สุด (two minima energy states) สองสถานะแสดงดังภาพประกอบ 3.16 กล่าวคือ $\tau^{-1} = \tau_{12}^{-1} + \tau_{21}^{-1}$ จะถูกคำนวณเพื่อที่จะได้นำไปใช้ในการพิจารณาโอกาสที่แมกนีไทเซชันจะเกิดกระบวนการผันกลับทิศทางในสมการ (3.22) ตามลำดับ การดำเนินงานด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดช่วงเวลาสำหรับการคำนวณ
2. เลือกเกรนแม่เหล็กที่ต้องการพิจารณา
3. คำนวณการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันให้สอดคล้องกับสถานะพลังงานต่ำสุด
4. คำนวณค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแต่ละสถานะในสมการ (3.19) และสมการ (3.20)
5. คำนวณค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะของแมกนีไทเซชัน P_t โดยอาศัยสมการ

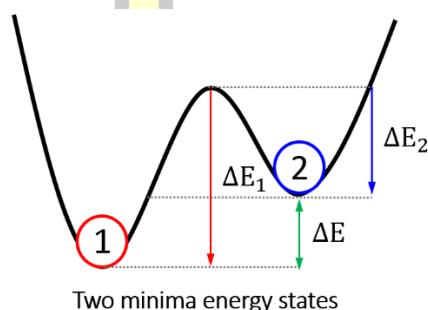
$$P_t = (1 - e^{-t_m/\tau}) \quad (3.22)$$

เมื่อ t_m คือระยะเวลาที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงซึ่งในแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10^{-8} s [115], [121]

6. เปรียบเทียบค่าโอกาสในการเปลี่ยนสถานะ P_t กับตัวเลขสุ่ม x ที่ถูกกำหนดให้มีค่าระหว่าง $0 < x < 1$ ถ้าค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะมีค่ามากกว่าตัวเลขสุ่ม $P_t > x$ แมกนีไทเซชันจะสามารถกลับทิศทางได้ แต่ถ้า $P_t < x$ แมกนีไทเซชันในระบบจะไม่

สามารถผันกลับทิศทางได้ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันอีกครั้งจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดและวิธีการคำนวณในลักษณะนี้จะดำเนินไปจนกว่าเกรนทุกเกรนภายในระบบสามารถผันกลับทิศทางได้อย่างสมบูรณ์

7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 – 5 ตามจำนวนเกรนแม่เหล็กทั้งหมดภายในระบบด้วยจำนวนครั้งที่ต้องการคำนวณ N เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากที่สุด
8. ปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในระบบจะมีค่าเท่ากับผลเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กทุกเกรนภายในระบบ



ภาพประกอบ 3.16 สถานะพลังงานต่ำที่สุดสองสถานะซึ่งถูกใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในเกรนแม่เหล็ก [115]

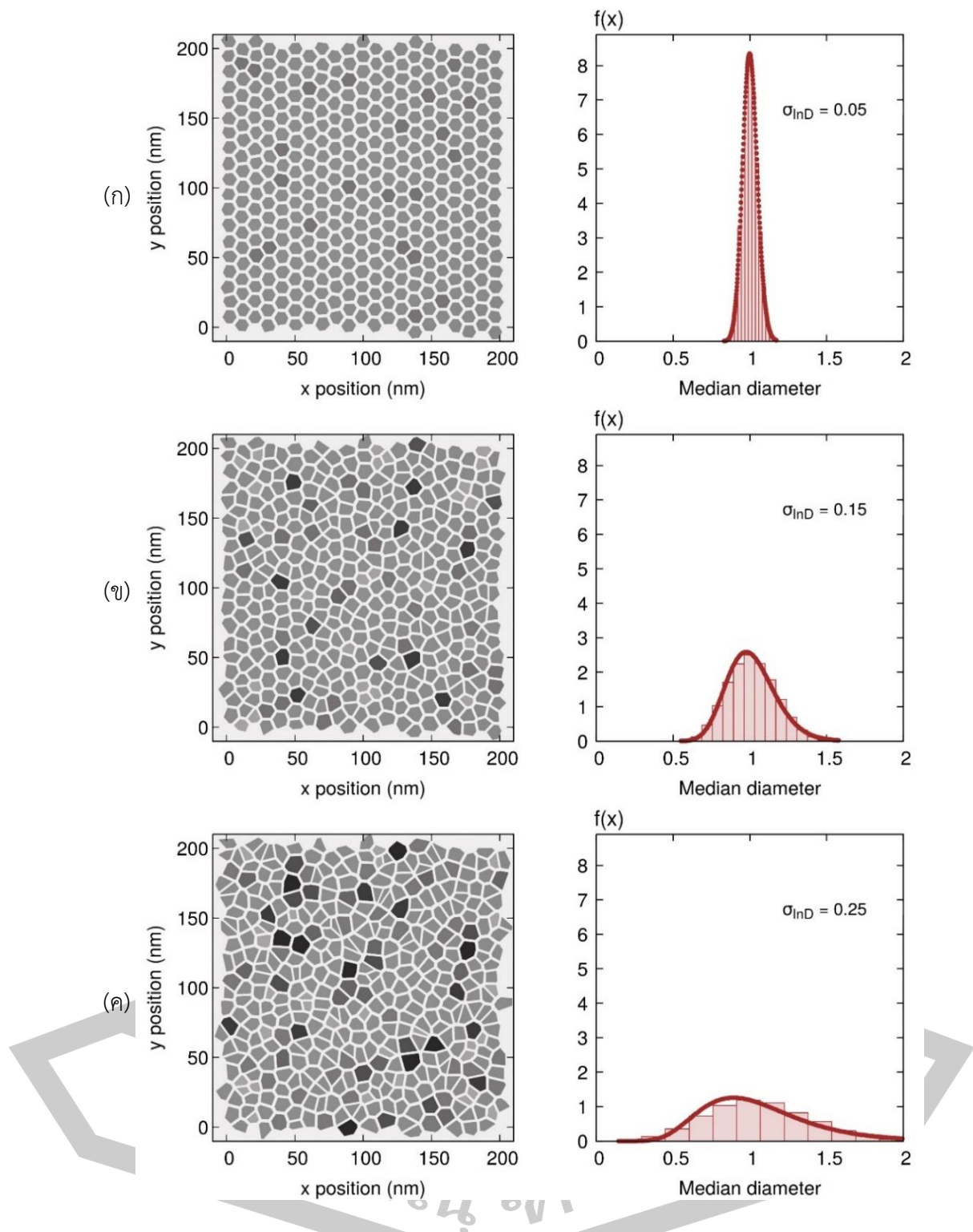
ด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้สามารถพิจารณาลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลที่คิดผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก ผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย รวมไปถึงค่าอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะได้อธิบายถึงผลการศึกษาคณสมบัติเชิงแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลและกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลโดยอาศัยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลต่อไป

3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่สภาวะสมดุล

แบบจำลองแกรนูลาร์ที่อธิบายไว้ข้างต้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยและผลกระทบเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบใหม่ โดยพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแกรนูลาร์จะถูกอธิบายผ่านรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและการคำนวณค่าเคอเออร์ซิวิตี (coercivity, H_C) สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่พิจารณา

ในงานวิจัยนี้จะจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบชั้นเดียวที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง ได้แก่ โคบอลต์แพลตทินัม (CoPt) ซึ่งถูกใช้เป็นชั้นบันทึกข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน [60] ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กพื้นฐานดังนี้ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_U) และค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_S) มีค่าเท่ากับ 1.0×10^7 erg/cm³ [122], [123] และ 600 emu/cm³ [123] ตามลำดับ โดยค่าอุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) ของวัสดุแม่เหล็กชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 700 K [124] การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันจะถูกพิจารณาในช่วงอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 300 K สำหรับความแรงสนามแลกเปลี่ยน (exchange field strength, H_{exch}) ซึ่งแสดงถึงความแรงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันจะถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 2,000 Oe โดยค่านี้ได้ถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของจूरีมาศและคณะ (P. Chureemart *et al.*) ที่ได้ทำการพิจารณาค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนด้วยกระบวนการเปรียบเทียบสองขั้น (two-step procedure) [43] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสระหว่างผลการทดลองบนแผ่นบันทึกข้อมูลจริงและผลการคำนวณด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์

ในการศึกษานี้จะกำหนดให้ระบบมีขนาดของฟิล์มตามแนวแกน x และ y ด้านละ 200 nm และกำหนดลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบให้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริงดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3 โดยลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กจะสามารถพิจารณาได้จากระยะการเคลื่อนที่ (distance to move, δ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์ไวโรนอยแบบสุ่มภายในระบบ ระยะการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ถูกจำลองขึ้นหรือมีค่าสอดคล้องกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก σ_{IND} สำหรับการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดลักษณะการกระจายตัวใน 3 รูปแบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบเป็นระเบียบ (uniform grains) การกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (non-uniform grains) และการกระจายตัวแบบสุ่ม (more non-uniform grains) ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก σ_{IND} จะมีค่าเท่ากับ 0.05 0.15 และ 0.25 ลักษณะโครงสร้างและกราฟการกระจายตัวของขนาดเกรนแม่เหล็กในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลทั้ง 3 รูปแบบสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3.17(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



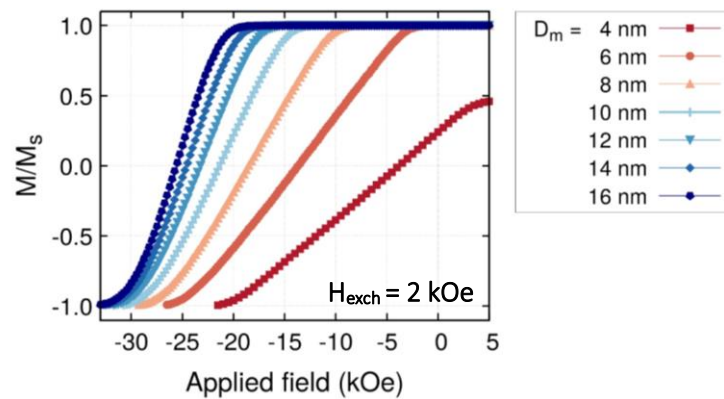
ภาพประกอบ 3.17 โครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลขนาด $200 \times 200 \text{ nm}^2$ และกราฟการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่มีค่าเท่ากับ (ก) 0.05 (ข) 0.15 และ (ค) 0.25 ตามลำดับ

3.4.1 ผลกระทบจากการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล

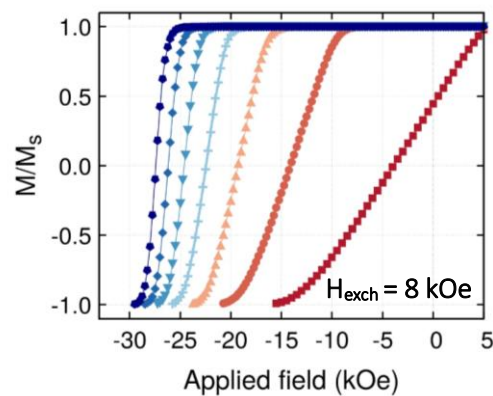
หัวข้อนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของการออกแบบโครงสร้างทางกายภาพที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล ได้แก่ ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ความหนาของชั้นฟิล์ม ลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก เป็นต้น แบบจำลองแกรนูลาร์ที่อาศัยเทคนิคมอนติคาร์โลในการคำนวณถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถพิจารณาผลของค่าอันตรกิริยาต่างๆ ภายในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลได้เพื่อให้ผลการคำนวณมีความเสมือนจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรวมผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก H_{ex} และผลของสนามแม่เหล็กหักล้าง H_{dip} ซึ่งถูกอธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.3

ในลำดับแรกจะได้ศึกษาผลกระทบของการออกแบบขนาดของเกรนแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กลงและยังคงมีเสถียรภาพทางความร้อนเพื่อสามารถเพิ่มความจุข้อมูลสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลต่อไปในอนาคตได้ โดยจะทำการกำหนดให้ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าตั้งแต่ 4 nm ถึง 10 nm ซึ่งมีความเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 nm และกำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 10 nm ในกรณีศึกษาเบื้องต้นจะไม่พิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลโดยกำหนดให้ค่า $\sigma_p = 0^\circ$ และกำหนดให้เกรนแม่เหล็กภายในระบบมีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นระเบียบซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กเท่ากับ $\sigma_{IND} = 0$ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดของเกรนแม่เหล็ก

ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่ง (half-hysteresis loop) จะถูกคำนวณผ่านแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ ภาพประกอบ 3.18(ก) แสดงการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกันในกรณีที่มีความแรงสนามแลกเปลี่ยน H_{exch} ซึ่งแสดงถึงความแรงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2,000 Oe ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า H_C มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าลดลงสำหรับกรณีที่แผ่นบันทึกข้อมูลมีขนาดของเกรนแม่เหล็กต่ำกว่า 6 nm พบว่าจะแสดงพฤติกรรมของวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกและให้ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (remanence magnetization, M_r) ที่ลดลงมากกว่า 50% เนื่องจากการลดลงของขนาดของเกรนแม่เหล็กนำไปสู่การลดลงของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก (energy barrier) ซึ่งเป็นพลังงานในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันและส่งผลทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลมีขนาดของเกรนแม่เหล็กต่ำกว่า 6 nm ขาดเสถียรภาพทางความร้อน



(ก)



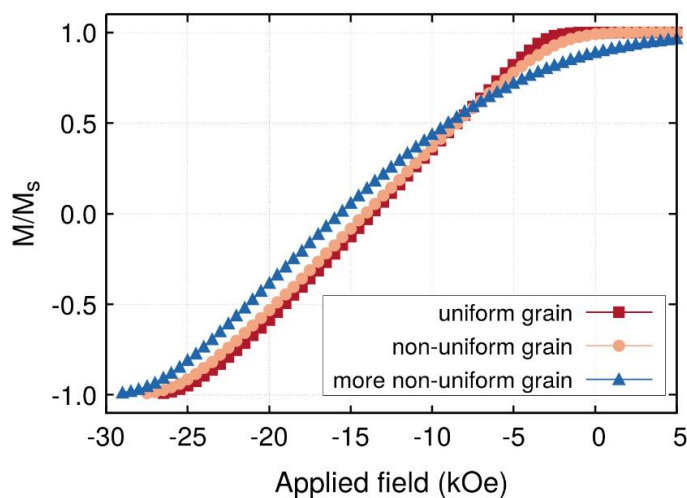
(ข)

ภาพประกอบ 3.18 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ในกรณีที่มีขนาดของเกรนแม่เหล็กในระบบมีค่าแตกต่างกันเมื่อความแรงสนามแลกเปลี่ยน H_{exch} มีค่าเท่ากับ ก) 2,000 Oe และ ข) 8,000 Oe [40]

ในลำดับต่อมาผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กจะถูกพิจารณา ร่วมกับผลของการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ $H_{\text{exch}} = 8000$ Oe ภาพประกอบ 3.18(ข) แสดงการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลสำหรับกรณีที่ H_{exch} มีค่าสูง จากการเปรียบเทียบพบว่าสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีเกรนแม่เหล็กขนาดใหญ่มากกว่า 10 nm การเพิ่มขึ้นของค่า H_{exch} จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ H_C เพียงอย่างเดียวและจะไม่มีผลต่อค่าความชันที่ผ่านจุด H_C ซึ่งแตกต่างกับกรณีที่ H_{exch} มีค่าต่ำ สาเหตุคาดว่าเป็นผลเนื่องจากแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีขนาดของเกรนแม่เหล็กขนาดใหญ่จะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง

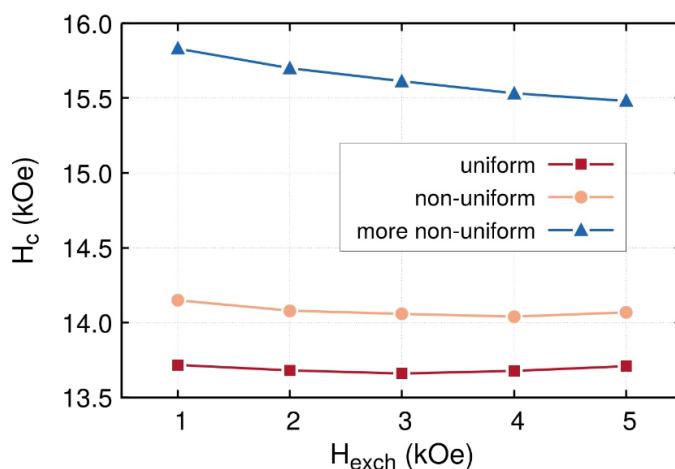
หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลคือลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามหมุนกลับ (switching field distribution, SFD) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย โดยปัจจัยหลักคือลักษณะกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล สำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในอนาคตพบว่า แผ่นบันทึกข้อมูลจะมีเกรนแม่เหล็กที่ถูกแบ่งออกจากกันอย่างสมบูรณ์ด้วยวัสดุซิลิกอนออกไซด์ทำให้เกรนแม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าน้อย ยกตัวอย่างเช่น แผ่นบันทึกข้อมูลแบบบิต [10] เป็นต้น แต่สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ถูกใช้ในปัจจุบันจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กจะมีค่าสูงและนำไปสู่การกระจายตัวของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่แตกต่างกัน โดยผลของค่าความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กยังคงมีความสำคัญสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากเนื่องจากปัจจัยดังกล่าวช่วยลดปัญหาสนามแม่เหล็กหักล้างที่เกิดขึ้นในแผ่นบันทึกข้อมูล ดังนั้นผลการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กจะถูกศึกษาในหัวข้อนี้ โดยทำการพิจารณาผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กไปด้วย

สำหรับโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่พิจารณาผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมไวโรนอย โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก σ_{IND} ซึ่งพิจารณาจากระยะการเคลื่อนที่ δ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3 ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.05 0.15 และ 0.3 เพื่อสร้างระบบเกรนแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีการกระจายตัวแบบเป็นระเบียบ การกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ และการกระจายตัวแบบสุ่ม ตามลำดับ ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 6 nm ความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 10 nm และขนาดความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $H_{\text{exch}} = 2,000$ Oe เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt ถูกเปรียบเทียบในกรณีที่ระบบมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพประกอบ 3.19 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบเป็นระเบียบมีค่าใกล้เคียงกันมากกับระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ แต่ในกรณีของระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบสุ่มพบว่าค่าความชันของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสนามหมุนกลับ (SFD) นอกจากนี้ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง M_r ที่แสดงถึงสภาพคงค้างทางแม่เหล็กและค่าสนามนิวเคลียส (nucleation field, H_n) ที่ทำให้แมกนีไทเซชันภายในระบบเริ่มผันกลับทิศทางมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการกระจายตัวของค่าพลังงานกีดกันที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเกรนแม่เหล็กภายในระบบมีลักษณะที่บิดเบี้ยวและไม่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ



ภาพประกอบ 3.19 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่เปรียบเทียบกับในกรณีที่มีระบบมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกัน [40]

ในลำดับถัดมาได้ทำการศึกษาผลกระทบของลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ส่งผลต่อค่า H_C โดยพิจารณาผลของค่า H_{exch} ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1,000 Oe ถึง 5,000 Oe โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1,000 Oe แสดงดังภาพประกอบ 3.20 จากผลการคำนวณพบว่าปริมาณ H_C มีค่าเพิ่มขึ้นและแปรผันตามลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้น ผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของเพงและคณะ (Y. Peng *et al.*) [110] ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดบริเวณที่เกรนแม่เหล็กสามารถรวมตัวกัน (effective pinning site) และมีค่าพลังงานกีดกันเพิ่มสูงขึ้นได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า H_C แม้ว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า H_C ในระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบสุ่มจะลดลงแบบต่อเนื่อง แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า H_C ในระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบเป็นระเบียบและระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบจะมีแนวโน้มคงที่และเพิ่มขึ้นเมื่อค่า H_{exch} มีค่ามากกว่า 3,000 Oe เนื่องจากค่า H_{exch} ที่สูงส่งผลทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล [40]



ภาพประกอบ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_c กับค่า H_{exch} เปรียบเทียบกันในกรณีแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่มีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกัน [40]

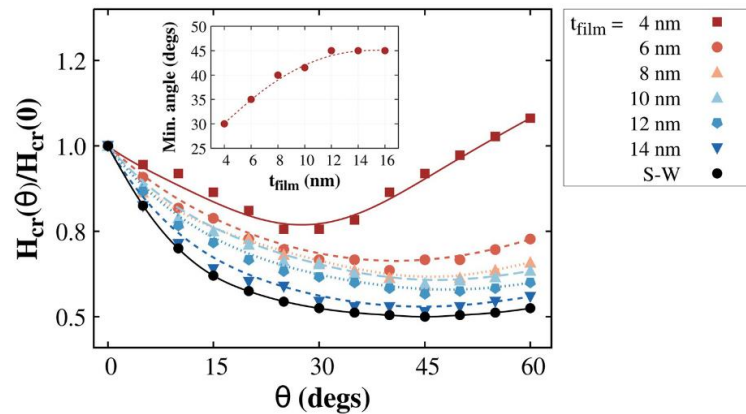
3.4.2 ปัจจัยของมุมต่อค่าสนามวิกฤต

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงและมีเกรนแม่เหล็กขนาดเล็ก ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามวิกฤต (critical field, H_{cr}) ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไทเซชันมีการกลับทิศทางอย่างแน่นอน (irreversible flip) จากสภาวะคงตัวหนึ่งไปยังอีกสภาวะหนึ่ง (two stable states) [60] โดยทั่วไปแล้วการศึกษาพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (single magnetic domain) ที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามผลของมุมสนามแม่เหล็กที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ สำหรับกรณีของโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวพบว่าทำให้สนามแม่เหล็กภายนอกด้วยมุมระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูล (applied field angle, θ) ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดการลดลงของปริมาณเคอเออร์ซิวิตี H_c เนื่องจากการเพิ่มค่ามุม θ เป็นการเพิ่มแรงทอร์กที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในระบบโดเมนเดี่ยวนำไปสู่การกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศของสนามแม่เหล็กได้ง่าย โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกด้วยมุม $\theta = 10^\circ$ มีผลทำให้ปริมาณ H_c มีค่าลดลงมากถึง 30% เมื่อเทียบกับกรณีที่มุม $\theta = 0^\circ$ นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาค่า H_{cr} ของระบบโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวจะพบว่าค่า H_{cr} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุม θ โดยค่ามุมการป้อนสนามที่น้อยที่สุด (minimum field angle) ที่ทำให้แมกนีไทเซชันเกิดการผันกลับทิศทางอย่างพร้อมเพรียงกัน (coherent reversal process) ตามทิศของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ $\theta = 45^\circ$ ตามทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth [100]

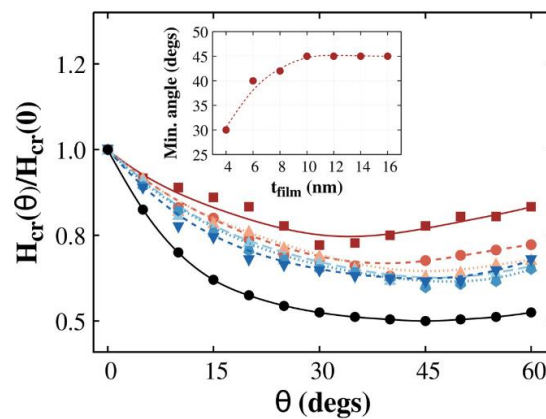
ในการคำนวณนี้จะได้พิจารณาผลของค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน ค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง และค่าสนามความร้อนที่อุณหภูมิ 300 K โดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกนำเสนอขึ้น นอกจากนี้ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะถูกพิจารณาร่วมด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{cr} ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กในกรณีที่มีระบบไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ($\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$) และกรณีที่มีระบบมีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเล็กน้อย ($\sigma_{\phi} = 3^{\circ}$) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้จะมีลักษณะเป็นระบบเกรนแม่เหล็กที่มีการกระจายตัวแบบเป็นระเบียบ $\sigma_{IND} = 0.0$ โดยที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 6 nm ซึ่งเป็นขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เล็กที่สุดและไม่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 4 nm ถึง 14 nm สำหรับกรณีศึกษานี้ในแต่ละความหนาของชั้นฟิล์มจะได้ทำการคำนวณค่า H_{cr} ในช่วงที่ค่ามุมการป้อนสนามแม่เหล็ก θ มีค่าตั้งแต่ 0° ถึง 60° โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 5°

ภาพประกอบ 3.21(ก) และ (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมของค่า H_{cr} ที่พิจารณาผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายที่ $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ และ 3° ตามลำดับ โดยที่แกน x แสดงมุมระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลและแกน y แสดงอัตราส่วนของค่าสนามวิกฤตที่มุมการป้อนสนามแม่เหล็กใดๆ $H_{cr}(\theta)$ ต่อค่าสนามวิกฤตที่มุม $\theta = 0^{\circ}$ และภาพด้านในภาพประกอบ 3.21(ก) และ (ข) แสดงผลการพิจารณาค่ามุมที่น้อยสุดที่ทำให้เกิดการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (minimum angle) ที่เป็นฟังก์ชันของค่าความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็ก





(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 3.21 ผลการนอมอลไลซ์ค่า H_{cr} ที่มุม θ ต่างๆ ในกรณีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth (ก) เมื่อไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ($\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$) (ข) เมื่อมีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ($\sigma_{\phi} = 3^{\circ}$) [40]

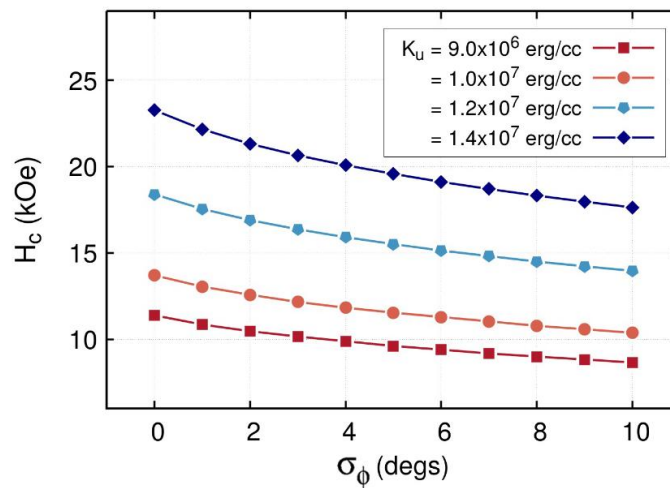
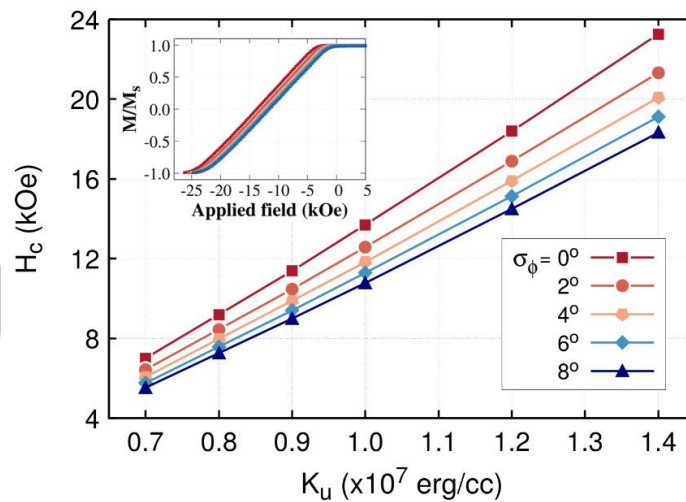
จากการศึกษาพบว่าผลการพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายไม่ส่งผลต่อเส้นโค้งของค่า $H_{cr}(\theta)$ ในกรณีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มมีค่ามาก แต่ในกรณีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าเท่ากับ 4 nm จะสามารถสังเกตความแตกต่างของค่า $H_{cr}(\theta)$ ที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนดังแสดงในภาพประกอบ 3.21 (ก) และ (ข) โดยในกรณีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าสูงสุดเท่ากับ 14 nm พบว่าค่า H_{cr} จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.5 ที่มุม $\theta = 45^{\circ}$ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการณ์กลับทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth [100] เนื่องจากการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันเกิดขึ้นอย่างพร้อมเพรียงกัน แต่ในระบบที่มีความหนาของชั้นฟิล์มลดลงจะเกิดการเบี่ยงเบนของค่า $H_{cr}(\theta)/H_{cr}(\theta = 0)$ จากค่าทฤษฎีเป็นอย่างมาก โดยพบว่ามุมที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการกลับทิศทางถูกเลื่อนไปที่มุม $\theta = 30^{\circ}$ เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มถูกลดขนาดลงให้มีค่า

เท่ากับ 4 nm แสดงถึงภาพด้านในของภาพประกอบ 3.21 (ก) และ (ข) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการลดความหนาของชั้นฟิล์มให้มีขนาดที่เล็กจนเกินไปนำไปสู่พฤติกรรมการณ์กลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่ซับซ้อนและเป็นไปอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน (incoherent reversal process) เนื่องจากระบบขาดเสถียรภาพทางความร้อนและอาจจะเป็นผลทำให้ค่าอันตรกิริยาทางแม่เหล็กภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของมอริสันและคณะ (C. Morrison *et al.*) [125] เป็นอย่างดี

3.4.3 ปัจจัยของการกระจายตัวของทิศแกนง่าย

ลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามหมุนกลับ (switching field distribution, SFD) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูล การกระจายตัวของค่าสนามหมุนกลับเกิดจากสาเหตุหลัก ได้แก่ การกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันและค่าคงที่แอนไอโซโทรปีผลึก K_U [91], [92] โดยพบว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเพียงเล็กน้อยเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลดลงของค่าสนามหมุนกลับ (switching field, H_{SW}) หรือค่าเคอเออร์ซีวิตี H_C ตามทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth [100] ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวของค่าสนามหมุนกลับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย σ_ϕ และค่าคงที่แอนไอโซโทรปีผลึก K_U ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของค่า H_C สำหรับระบบที่ใช้ในการศึกษานี้จะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบเป็นระเบียบ $\sigma_{IND} = 0.0$ ที่มีเกรนแม่เหล็กขนาดเท่ากับ 6 nm และความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 10 nm

ภาพประกอบ 3.22(ก) แสดงผลการคำนวณค่า H_C ที่เป็นฟังก์ชันของค่า K_U ตั้งแต่ 9×10^6 erg/cm³ ถึง 1.4×10^7 erg/cm³ ในขณะที่การกระจายตัวของทิศแกนง่ายมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 8° โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 2° และภาพด้านในภาพประกอบ 3.22(ก) แสดงลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการกระจายตัวของทิศแกนง่าย จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่า K_U มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณ H_C มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก $H_C \propto K_U$ ของระบบ โดยในกรณีที่ไม่วมผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย $\sigma_\phi = 0^\circ$ พบว่าค่า H_C จะมีค่าสูงที่สุดที่แต่ละค่า K_U แต่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า σ_ϕ จะส่งผลทำให้ปริมาณ H_C ของระบบมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 3.22 (ก) ผลการคำนวณค่า H_c ที่เป็นฟังก์ชันของค่า K_u โดยภาพด้านในแสดงรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า σ_ϕ และ (ข) ผลการคำนวณค่า H_c ที่เป็นฟังก์ชันของค่า σ_ϕ ที่ค่า K_u ต่างๆ [40]

สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นแบบโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวจะพบว่า ปริมาณ H_c จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าสนามหมุนกลับภายใน (intrinsic switching field, H_K) ที่สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ $H_K = \alpha K_u / M_s$ เมื่อ α คือค่าคงที่ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากปัจจัยอื่นๆ ร่วมกับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_c และค่า K_u ในภาพประกอบ 3.22(ก) โดยจะเห็นได้ว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความชันของเส้นกราฟ H_c มี

แนวโน้มลดลง เมื่อทำการพิจารณาค่าคงที่ α ได้เท่ากับ 1.40 เป็น 1.04 สำหรับกรณีที่ $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ และ 8° ตามลำดับ โดยค่าคงที่ α ที่สามารถคำนวณได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีเมื่อค่าคงที่ α สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีแอนไอโซโทรปีแกนเดียว (uniaxial anisotropy) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.96 ถึง 2 สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบสุ่มสามมิติจนถึงไม่มีลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่าย [126]

การคำนวณค่า H_C ที่เป็นฟังก์ชันของค่ามุมการกระจายตัวของทิศแกนง่าย σ_{ϕ} ในระบบที่มีค่า K_U แตกต่างกันถูกแสดงดังภาพประกอบ 3.22(ข) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟ H_C จะมีแนวโน้มที่ลดลงในระบบสำหรับทุกค่า σ_{ϕ} นำไปสู่ค่า asymptotic ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สอดคล้องกับความไม่อิสระต่อมุมการบิดสนามแม่เหล็กภายนอกสอดคล้องกับทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth [100] ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของลีและคณะ (J. Lee et al.) [127] โดยจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงแม่เหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสนามหมุนกลับของของแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt ที่เป็นแผ่นบันทึกข้อมูลทางเลือกสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบใช้ความร้อนช่วยและแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วย เป็นต้น

3.4.4 ปัจจัยของเวลาต่อค่าสนามกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาผลของระยะเวลาต่อการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของค่า H_C สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ โดยในทางปฏิบัติแล้วแผ่นบันทึกข้อมูลจะต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงซึ่งสามารถพิจารณาได้จากตัวแปรที่บ่งบอกเสถียรภาพทางความร้อน $\Delta E \sim K_U V / k_B T > 60$ เพื่อให้แผ่นบันทึกข้อมูลนั้นสามารถรักษาข้อมูลไว้ได้เป็นระยะเวลาสิบปี [40] เมื่อแผ่นบันทึกข้อมูลได้ทำการจัดเก็บข้อมูลหลังจากกระบวนการเขียนโดยอาศัยสนามแม่เหล็กภายนอกจากหัวเขียนข้อมูลจะพบว่าแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของสนามเขียนนั้นๆ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปกลับพบว่าปัจจัยทางความร้อนสามารถส่งผลทำให้เกิดกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลได้ซึ่งถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผลการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation) การพิจารณาความไม่อิสระของเวลาและอุณหภูมิต่อค่า H_C ในระบบที่ไม่คิดผลการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนสามารถอธิบายได้จากสมการของซารอค [104], [128] ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าเคอเออร์ซีวิตีในลักษณะเป็นฟังก์ชันของเวลาหรือพลวัตของค่าเคอเออร์ซีวิตีที่เวลาใดๆ $H_C(t)$ แสดงดังสมการ

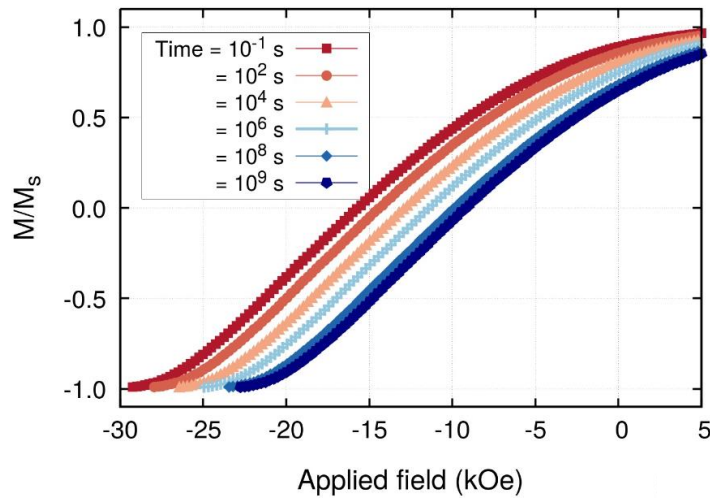
$$H_C(t) = H_K \left\{ 1 - \left[\frac{k_B T}{K_U V} \ln \left(\frac{f_0 t}{\ln 2} \right) \right]^n \right\} \quad (3.23)$$

- เมื่อ H_K คือ ค่าสนามแอนไอโซโทรปีซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $2K_U/M_S$
 V คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก
 f_0 คือ ค่าความถี่ทดลอง
 n คือ เลขชี้กำลังที่สัมพันธ์กับการกระจายตัวของทิศแกนง่าย [128], [129]

การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสมการของซารอคและผลการทดลองวัดค่า H_C เป็นวิธีการที่ถูกใช้เพื่อกำหนดตัวแปรที่บ่งบอกเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูล $\Delta E \sim K_U V / k_B T$ และค่าสนามแอนไอโซโทรปี H_K

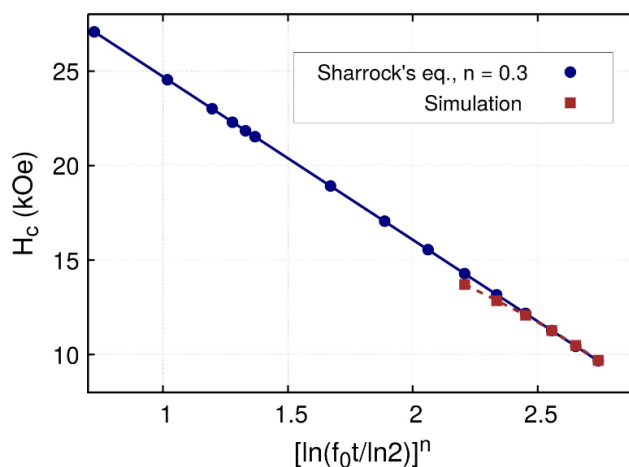
แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายถึงลักษณะการคลายตัวของแมกนีไทเซชันในระยะยาวสำหรับกระบวนการเขียนข้อมูลโดยการพิจารณาความไม่อิสระของเวลาในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ในกรณีศึกษานี้ได้เลือกใช้ระบบที่มีการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กเป็นแบบสุ่ม $\sigma_{\text{IND}} = 0.25$ และกำหนดให้ระบบมีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันเท่ากับ $\sigma_\phi = 3^\circ$ โดยสนามแม่เหล็กภายนอกจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบในแนวตั้งฉากกับระนาบของแผ่นบันทึกข้อมูลที่อุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับ 300 K ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ถูกคำนวณด้วยระยะเวลาในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 0.1 s ถึง 10^9 s ซึ่งทำให้สามารถคำนวณอัตราการให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบต่อเวลาในหน่วยวินาที (field sweep rate) ได้เท่ากับ $2,500 \text{ Oe}\cdot\text{s}^{-1}$ ถึง $2.5 \times 10^{-7} \text{ Oe}\cdot\text{s}^{-1}$ แสดงดังภาพประกอบ 3.23 โดยจะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่า H_C และค่า M_T มีค่าลดลงเนื่องจากผลการกระตุ้นทางความร้อนในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดจะส่งผลต่อการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่แตกต่างกันสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการ (3.23)

พูนุ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 3.23 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแบบครึ่งที่ถูกคำนวณด้วยระยะเวลาในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 0.1 s ถึง 10^9 s

ค่า H_C ที่สามารถคำนวณได้จากเทคนิคมอนติคาร์โลโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมการของซารอคแสดงดังภาพประกอบ 3.24 ในทางปฏิบัติแล้วกระบวนการเขียนข้อมูลนั้นจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมาก (น้อยกว่า 0.1 s) ด้วยความถี่สูงในย่านจิกะเฮิร์ตส์ (gigahertz, GHz) [104], [118] ดังนั้นค่าความถี่ที่ถูกเลือกใช้สำหรับการคำนวณถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10^{10} Hz นอกจากนี้ตัวแปรที่บ่งบอกเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกพิจารณาให้มีค่าสูงเพียงพอต่อการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลในระยะยาวซึ่งมีค่าประมาณ $\Delta E \sim K_U V / k_B T = 68$ จากการศึกษาพบว่าเลขชี้กำลัง n ที่ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการคำนวณจากวิธีการมอนติคาร์โลได้สอดคล้องกับกฎของซารอคมีค่าเท่ากับ $n = 0.3$ ซึ่งมิต่ำกว่าเลขชี้กำลังที่ได้จากการเปรียบเทียบกฎของซารอคและทฤษฎี Stoner – Wohlfarth สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่ไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายซึ่งมีค่าเท่ากับ $n = 0.5$ [130] เนื่องจากผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายและค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน [40], [129]



ภาพประกอบ 3.24 การเปลี่ยนแปลงของค่า H_c ที่เป็นฟังก์ชันของระยะเวลาในการวัดลูปวงปิด ฮิสเทอริซิสแบบล็อกการีทิมเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากสมการของชาร์รอกและแบบจำลองแกรนูลาร์ [40]

แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่มีค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กสูง ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล สำหรับแบบจำลองดังกล่าวได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในการพิจารณาพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันเพื่อให้สามารถคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันที่ครอบคลุมกับระยะเวลา (timescale) ในการคลายตัวของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลที่สภาวะสมดุลได้ โดยลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่จะถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรมไวโรนอยซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมขนาดของเกรนแม่เหล็กและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กให้มีความเสมือนจริงได้ นอกจากนี้แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นยังสามารถพิจารณาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กและพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น ผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน และค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง เป็นต้น ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.3

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนแม่เหล็กสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบโลหะเจือที่มีวัสดูโคบอลต์เป็นสารประกอบหลัก (CoPt-alloy compounds) และมีค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กอยู่ในช่วง $K_U \sim 10^7$ erg/cm³ พบว่าขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เล็กที่สุดซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนและไม่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดูซูเปอร์พาราแมกเนติกจะมีค่าเท่ากับ 6 nm โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความแรงแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กในระบบเกรนที่มีขนาดเล็กเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่น

บันทึกข้อมูล เมื่อพิจารณาผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าเคอเออร์ซีวิตีซึ่งพบว่า ระบบเกรนที่มีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอจะให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า H_C ที่แตกต่างกัน (non-monotonic behavior) เมื่อค่าความแรงแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก H_{exch} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามเขียนหรือค่าสนามวิกฤต H_{cr} ที่มุมการป้อนสนามแม่เหล็กต่างๆ พบว่าส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์กลับทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นอย่างมากเมื่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มถูกลดขนาดลง โดยมุมที่น้อยที่สุดของการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะถูกเลื่อนจาก 45° เป็น 30° ในส่วนสุดท้ายได้ทำการศึกษาปัจจัยของเวลาต่อค่า H_C โดยพบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการของซารอคได้อย่างมีนัยสำคัญโดยใช้เลขชี้กำลัง n ที่มีค่าน้อยกว่าสมการของซารอค ซึ่งการลดลงของค่า n อาจจะมีสาเหตุมาจากการพิจารณาผลของค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดตัวแปรที่บ่งบอกเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นบันทึกข้อมูล $\Delta E \sim K_U V / k_B T$

แม้ว่าผลการคำนวณในการศึกษานี้จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก โดยเฉพาะแต่พบว่าสามารถเทียบเท่ากับรูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้ความร้อนช่วยและเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยได้เช่นเดียวกัน วิธีการวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่ถูกนำเสนอขึ้นนี้ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่และผลกระทบต่อการจัดเก็บข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่เมื่อองค์ประกอบของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ได้รุดพ้นจากจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลงได้



บทที่ 4

แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

นอกจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพขององค์ประกอบสำคัญภายในหัวอ่านข้อมูลโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias layer) ที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) เชื่อมติดกับชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในหัวอ่านข้อมูลโดยอาศัยผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) โดยงานวิจัยนี้จะได้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยทางโครงสร้าง เช่น ผลของความหนาของชั้นฟิล์ม ขนาดของเกรนแม่เหล็ก การกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก และการกระจายตัวของทิศแกนง่ายภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ ในบทนี้จะได้อธิบายถึงจุดกำเนิดและทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนรวมถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและทบทวนแบบจำลองทางทฤษฎีที่สามารถอธิบายผลการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในเชิงการทดลองได้อย่างมีนัยสำคัญเพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์ให้มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น ในลำดับถัดไปจะได้อธิบายถึงวิธีการสร้างแบบจำลองแกรนูลาร์ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการพิจารณาลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) และสมการแลนดอว์ - ลิฟชิตส์ - กิลเบิร์ต (Landau – Lifshitz – Gilbert equation) ตามลำดับ ในส่วนสุดท้ายจะได้อธิบายถึงผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและผลการออกแบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นโดยอาศัยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไป

4.1 ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

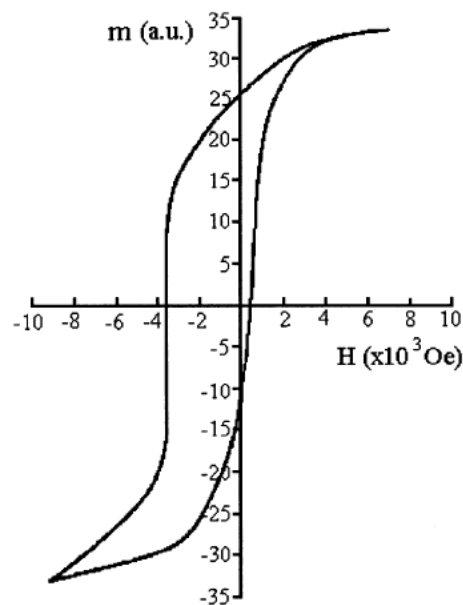
4.1.1 จุดกำเนิดของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดยไมเคิลจอร์นและปิ่น (W.H. Meiklejohn and C.P. Bean) ในปี ค.ศ. 1956 [16] จากการทดลองวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของ

วัสดุแม่เหล็กที่มีลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโน (nanoparticle) ของวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ FM ที่ถูกหุ้มด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ AF การเชื่อมติดกันของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทส่งผลทำให้คุณสมบัติภายในของวัสดุ FM เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสตามแนวแกนของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบแสดงดังภาพประกอบ 4.1 โดยทั่วไปแล้วอัตราการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะถูกนิยามด้วย ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias field, H_{EB}) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลต่างเฉลี่ยของค่าเคอเออร์ซิวิตี (coercivity, H_C) ทางด้านซ้ายและด้านขวาของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแสดงดังสมการ (4.1) [17], [18]

$$H_{EB} = \frac{H_C^- - H_C^+}{2} \quad (4.1)$$

เมื่อ H_C^- และ H_C^+ คือปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ส่งผลให้ปริมาณแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์หรือค่าเคอเออร์ซิวิตีทางด้านซ้ายและด้านขวาของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสตามลำดับ

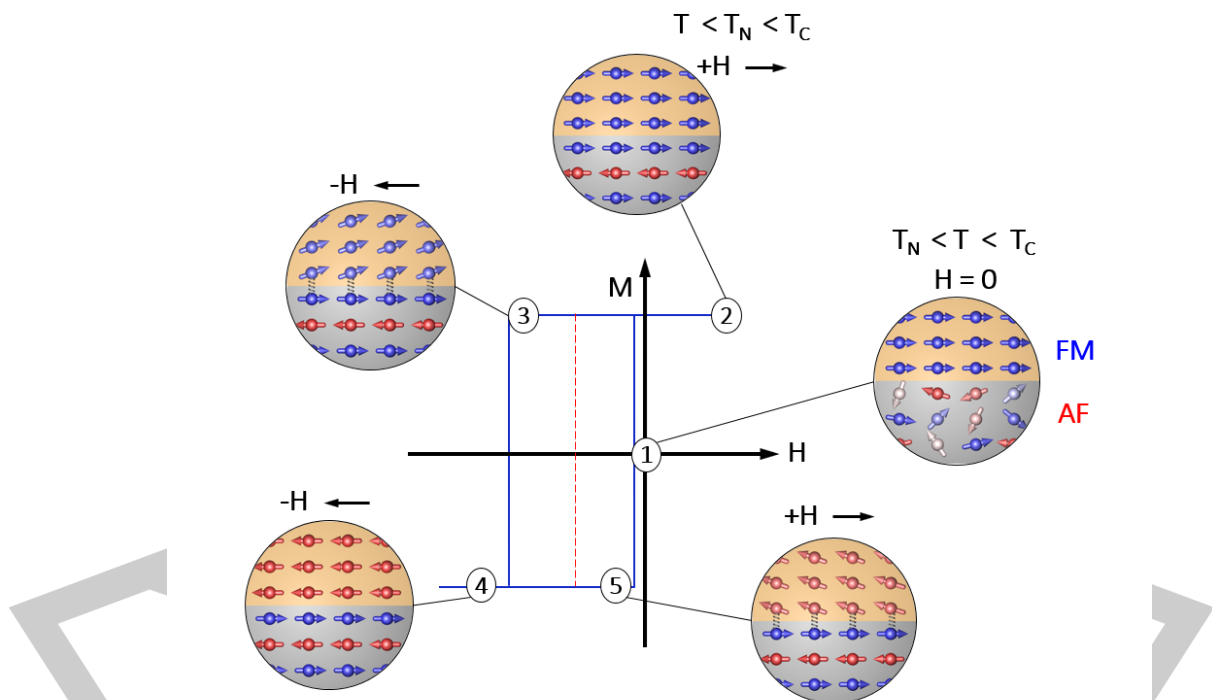


ภาพประกอบ 4.1 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ซึ่งถูกหุ้มด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ออกไซด์ที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [16]

นอกจากนี้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนยังส่งผลทำให้เกิดแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า H_C ของระบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลรวมเฉลี่ยของค่า H_C^- และ H_C^+ ที่วัดได้จากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น [17], [18] แสดงดังสมการ

$$H_C = \frac{H_C^- + H_C^+}{2} \quad (4.2)$$

สำหรับกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากการเชื่อมติดกันระหว่างชั้น AF และชั้น FM สามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบ 4.2 เมื่อระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นถูกให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ T ที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมินีล (Neel temperature, T_N) แต่น้อยกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) กล่าวคือ $T_N < T < T_C$ จะมีผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF มีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของวัสดุพาราแมกเนติก ในขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM จะมีการจัดเรียงทิศทางตามทิศแกนง่ายของวัสดุแสดงดังจุดที่ 1 ในภาพประกอบ 4.2



ภาพประกอบ 4.2 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM [17], [18]

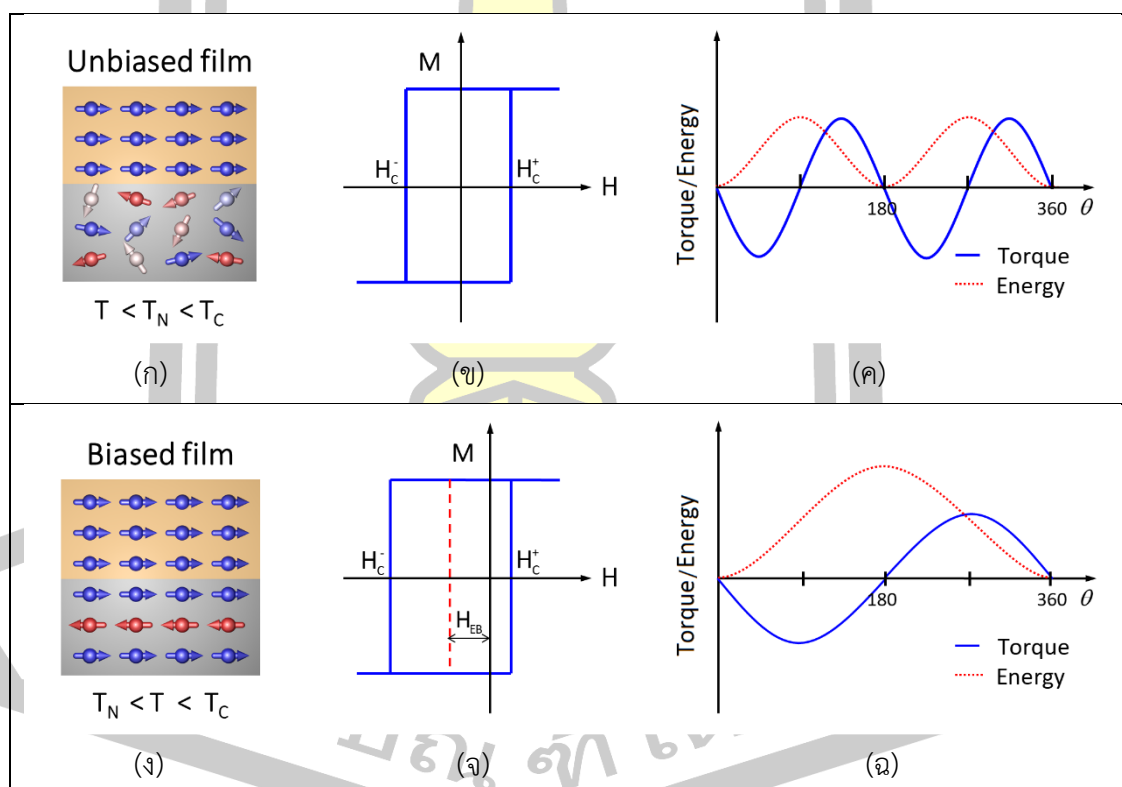
เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง $+H$ ในช่วงอุณหภูมิ $T_N < T < T_C$ จะมีผลทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น FM มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น AF ยังคงแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุพาราแมกเนติก ในลำดับถัดมาเมื่อทำ

การลดอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $T < T_N < T_C$ ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง $+H$ จะเห็นได้ว่าการลดค่าอุณหภูมิของระบบให้มีค่าต่ำกว่า $T < T_N$ ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF เปลี่ยนพฤติกรรมจากวัสดุพาราแมกเนติกกลับไปเป็นวัสดุ AF โดยที่แมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF จะพยายามจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM เนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในแต่ละแลตทิซย่อยของชั้น AF มีการจัดเรียงตัวในทิศตรงกันข้ามดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.2.4 แสดงดังจุดที่ 2 ในภาพประกอบ 4.2 วิธีการดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการให้สนามความเย็น (field cooling process) [18], [94]

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนสามารถพิจารณาได้จากอัตราการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ การเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเกิดขึ้นเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศตรงกันข้ามกับทิศเริ่มต้น $-H$ เพื่อวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะพบว่าแมกนีไทเซชันในชั้น FM จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่แมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF จะยังคงรักษาทิศทางเดิมไว้ เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กประเภทนี้มีค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ค่อนข้างสูง ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศสนามแม่เหล็กภายนอกได้ยากแสดงดังจุดที่ 3 ในภาพประกอบ 4.2 นอกจากนี้ยังพบว่าแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF จะออกแรงอันตรกิริยากระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกโดยง่ายทำให้ค่า H_C ของชั้น FM มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีปริมาณมากพอที่จะเอาชนะค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุได้จะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถจัดเรียงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้แสดงดังจุดที่ 4 ในภาพประกอบ 4.2 แต่เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางเริ่มต้น $+H$ อีกครั้งเพื่อทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะพบว่า แมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกโดยง่ายแสดงดังจุดที่ 5 ในภาพประกอบ 4.2 เนื่องจากแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF มีการจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกส่งผลทำให้เกิดแรงทอร์กเสริมกับแรงทอร์กจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM นำไปสู่การเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรหรือทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนนั่นเอง

นอกจากนี้ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายในของชั้น FM เช่นเดียวกัน โดยในระหว่างการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ

ค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้น FM จากเดิมที่มีลักษณะเป็นพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว (uniaxial anisotropy) ให้กลายเป็นพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบทิศทางเดียว (unidirectional anisotropy) ซึ่งทำให้ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าแอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน (exchange anisotropy) [16], [66] ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.3.1.3 จากภาพประกอบ 4.3(ก) และ (ข) จะเห็นว่าระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นในขณะที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบแอสแลกเปลี่ยน จะให้ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีความสมมาตรและไม่มีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตร และเมื่อพิจารณาปริมาณทอร์กของแมกนีไทเซชันของชั้น FM ในภาพประกอบ 4.3(ค) พบว่าระบบดังกล่าวจะมีทอร์กที่เกิดขึ้นในรูปของฟังก์ชัน $\sin 2\theta$ โดยที่มีค่าพลังงานต่ำสุดได้สองสถานะคือกรณีที่ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 180^\circ$ ซึ่งเป็นลักษณะของค่าแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว กล่าวคือ แมกนีไทเซชันของชั้น FM จะถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกให้เข้าสู่สภาวะสมดุลได้ในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีทิศทางง่ายขนานในทิศทางเดียวกัน (parallel orientation) และในทิศทางตรงกันข้าม (anti-parallel orientation) กับสนามแม่เหล็กภายนอกเท่านั้น



ภาพประกอบ 4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติภายในของระบบวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF และชั้น FM เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าอยู่ในช่วง $T_N < T < T_C$ และ $T < T_N < T_C$ [16]

สำหรับระบบที่มีการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นนั้นจะพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอริซิสจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรในแนวระนาบ (horizontal shift) ส่งผลให้เกิดค่า H_{EB} และเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า H_C แสดงดังภาพประกอบ 4.3(ง) และ (จ) โดยทอร์คที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $\sin\theta$ ซึ่งมีค่าพลังงานต่ำสุดได้เพียงสถานะเดียวในกรณีที่ $\theta = 0^\circ$ แสดงดังภาพประกอบ 4.3(ฉ) ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ในระบบที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมีลักษณะเป็นค่าแอนไอโซโทรปีแบบทิศทางเดียว กล่าวคือ แมกนีไทเซชันของชั้น FM จะถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกให้เข้าสู่ภาวะสมดุลได้เฉพาะในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีทิศทางง่ายขนานในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกเท่านั้น

วิธีการวัดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (conventional measurement procedure) โดยพบว่าเมื่อทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซ้ำอีกครั้งด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมจะส่งผลทำให้เกิดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสใหม่ที่มีขนาดไม่เท่าเดิม (non reproducible exchange bias) เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสในแต่ละครั้งส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF บางส่วนขาดเสถียรภาพทางความร้อนและแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก ดังนั้นแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่ขาดเสถียรภาพทางความร้อนไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ไว้ได้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} โดยผลการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} ในลักษณะนี้ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปรากฏการณ์เทรนนิ่ง (training effect) [131]

จากข้อจำกัดของการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมเนื่องจากผลของอุณหภูมิเข้ามามีผลกระทบต่อทิศทางของแมกนีไทเซชันโอเกรดีและคณะ (K. O'Grady *et al.*) [25] ได้นำเสนอวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสรูปแบบใหม่ซึ่งถูกเรียกว่า York protocol ซึ่งเป็นวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่สามารถกำจัดผลของความร้อนระหว่างกระบวนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสได้ (training free measurement) การเลือกใช้ York protocol ช่วยให้สามารถวัดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอริซิสได้อย่างแม่นยำ กล่าวคือ ปริมาณ H_{EB} ที่วัดได้จะมีค่าเท่าเดิมเสมอ (reproducible exchange bias) แม้ว่าจะทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสซ้ำหลายครั้ง เนื่องจากลูปวงปิดฮิสเทอริซิสจะถูกวัดในช่วงอุณหภูมิที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งถูกเรียกว่า (non-activation temperature, T_{NA}) และไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิในการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ให้มีค่าที่สูงมากๆ จนเกินไปเพื่อป้องกัน

การเปลี่ยนสภาพของชั้นฟิล์มเนื่องจากความร้อน สำหรับการวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสของชั้นไบอัส แลกเปลี่ยนด้วย York protocol มีขั้นตอนดังนี้

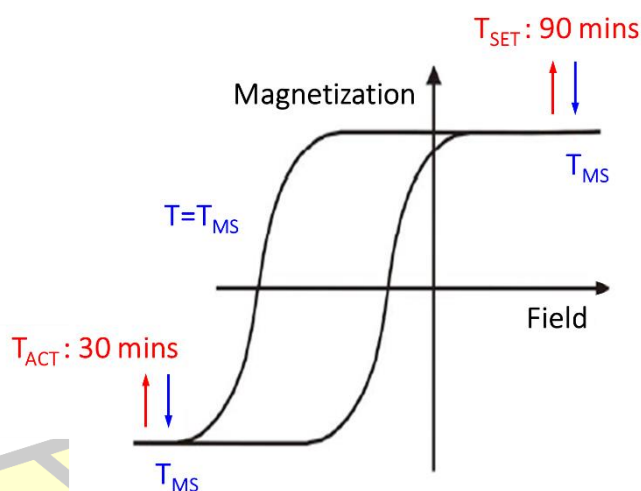
ในลำดับแรกชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนจะถูกให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิการกำหนดทิศทาง (setting temperature, T_{SET}) ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็ก ภายนอกในทิศทางบวก +H เป็นเวลา 90 นาที [132] เพื่อให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกในขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF จะถูกกระตุ้นด้วยผลของความร้อนทำให้แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุพาราแมกเนติกและมีการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นแบบสุ่ม โดยค่าอุณหภูมิ T_{SET} จะถูกกำหนดให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติหรืออุณหภูมินีล T_N ของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลของความร้อนทำลายลักษณะโครงสร้างของชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน [25], [132] จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{NA} ในขณะที่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF มีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF ส่วนใหญ่ถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนด้วยผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (setting process) [25], [132] ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการให้สนามความเย็นสำหรับวิธีการวัดแบบดั้งเดิม เมื่อลดอุณหภูมิของระบบลงจนมีค่าเท่ากับ T_{NA} แล้วทำการให้สนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสครั้งที่หนึ่ง จากนั้นให้ทำซ้ำกระบวนการเดิมเพื่อวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสครั้งที่สองโดยทำการให้สนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 30 นาที หากลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสลู่วางที่หนึ่งและลู่วางที่สองยังไม่เกิดการซ้อนทับกันให้ทำการวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสครั้งที่สามใน ช่วงอุณหภูมิ T_{NA} ที่มีค่าลดต่ำลงและทำซ้ำกระบวนการเดิมไปเรื่อยๆ (trial and error) จนกระทั่งเมื่อใดก็ตามที่ลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสลู่วางที่หนึ่งและลู่วางที่สองซ้อนทับกันจะสามารถพิจารณาได้ว่า อุณหภูมิที่ทำให้ลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสทั้งสองซ้อนทับกันเป็นอุณหภูมิ T_{NA} ที่ไม่มีผลกระทบของความร้อนภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยอุณหภูมิ T_{NA} ดังกล่าวนี้อาจถูกกำหนดให้เป็นค่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีส (measurement temperature, T_{Ms}) ในลำดับถัดไป

เมื่อสามารถพิจารณาหาอุณหภูมิ T_{Ms} ได้แล้วจึงเริ่มทำการวัดลู่วางปิดฮีสเทอร์รีซีสที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนได้ตามแผนภาพในภาพประกอบ 4.4 ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. ทำการให้ความร้อนต่อชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยอุณหภูมิ T_{SET} ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H เป็นเวลา 90 นาที
2. ทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{Ms}

3. ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ $-H$ เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลูป-วงปิดฮิสเทอริซิสลูป
4. เพิ่มอุณหภูมิที่ต้องการพิจารณาซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิที่มีการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) เป็นระยะเวลา 30 นาที
5. ลดอุณหภูมิของระบบให้กลับเข้าสู่ T_{MS} อีกครั้งเพื่อให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF บางส่วนที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเปลี่ยนแปลงทิศทางไป
6. ทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนอีกครั้งจนเกิดเป็นลูปวงปิดฮิสเทอริซิส

ด้วยวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสในลักษณะดังกล่าวแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อน (AF free of thermal activation) ทำให้สามารถพิจารณาค่า H_{EB} ที่แน่นอนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้ แม้ว่าจะมีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสซ้ำอีกหลายครั้ง



ภาพประกอบ 4.4 การวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วย York protocol [25]

4.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานานหลังจากที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นำไปสู่การค้นพบปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น ยกตัวอย่างเช่น ความหนาของชั้นฟิล์ม FM และ

ชั้น AF ลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ และอุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.2.1 ความหนาชั้นฟิล์มแม่เหล็ก

การปรับลดขนาดของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นสาเหตุทำให้มีความจำเป็นต้องลดขนาดและความหนาของวัสดุทุกชั้นภายในหัวอ่านข้อมูลซึ่งรวมไปถึงความหนาของชั้นฟิล์ม AF และชั้น FM ทำให้มีการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นฟิล์ม FM (FM thickness, t_{FM}) และความหนาของชั้นฟิล์ม AF (AF thickness, t_{AF}) ต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นอย่างแพร่หลาย [18], [25] จากการศึกษาโดยส่วนใหญ่พบว่าปริมาณ H_{EB} ในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะมีค่าแปรผกผันกับ t_{FM} [17]–[19], [25] ดังความสัมพันธ์ในสมการ (4.3) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า t_{FM} เป็นการเพิ่มปริมาตรและพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ใช้สำหรับในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชัน ส่งผลทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF มีค่าไม่เพียงพอต่อการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม FM มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้นและทำให้ปริมาณ H_{EB} มีค่าน้อยลง

$$H_{EB} \propto \frac{1}{t_{FM}} \quad (4.3)$$

สำหรับกรณีของชั้น AF จะสามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อ t_{AF} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้ดียิ่งขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณ H_{EB} มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มค่า t_{AF} เป็นการเพิ่มปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ใช้ในการรักษาทิศทางแสดงดังสมการ [38]

$$\Delta E_{AF} = K_{AF} V_{AF} \left[1 - \frac{H^*}{H_K^*} \right]^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ ΔE_{AF} คือ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็ก AF

V_{AF} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ซึ่งมีค่าเท่ากับ $V_{AF} = at_{AF}$

a คือ พื้นที่ของเกรนแม่เหล็ก AF

K_{AF} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF

H^* คือ สนามไบอัสแลกเปลี่ยนจากชั้น FM ที่กระทำต่อชั้น AF

H_K^* คือ สนามแอนไอโซโทรปีที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (pseudo anisotropy field) [101]

จากสมการ (4.4) พบว่าค่า ΔE_{AF} ที่ใช้สำหรับยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM มีค่าแปรผันตรงกับ t_{AF} นำไปสู่การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_{EB} และปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ในเทอมของการหาปริพันธ์ในช่วง $V_C < V < V_{SET}$ ได้ดังสมการ (4.5) โดยรายละเอียดจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.4

$$H_{EB} \propto \int_{V_C}^{V_{SET}} f(V) dV \quad (4.5)$$

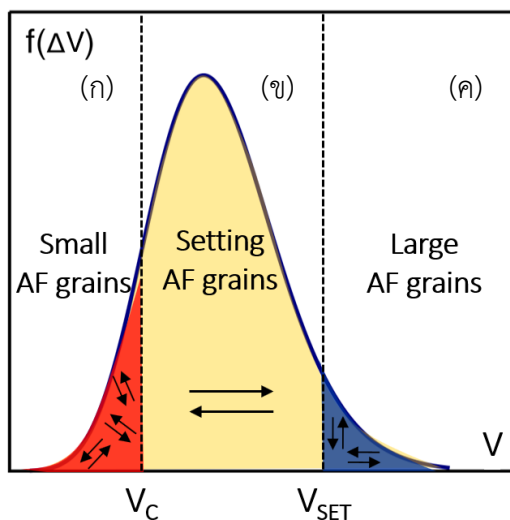
เมื่อ H_{EB} คือ ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส

$f(V)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF

จากการศึกษาของเฟอร์นันเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [133] ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยนมีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (setting fraction, f_{SET}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF (AF grain volume, V) โดยผลการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF ที่มีลักษณะการกระจายตัวตามฟังก์ชันปกติล็อก (log-normal distribution) ถูกนำมาใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งถูกแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงสำคัญด้วยปริมาตรวิกฤติของเกรนแม่เหล็ก AF ของเกรนขนาดเล็ก (critical AF grain volume, V_C) และปริมาตรวิกฤติของเกรนแม่เหล็ก AF ของเกรนขนาดใหญ่ (unset AF grain volume, V_{SET}) แสดงดังภาพประกอบ 4.5

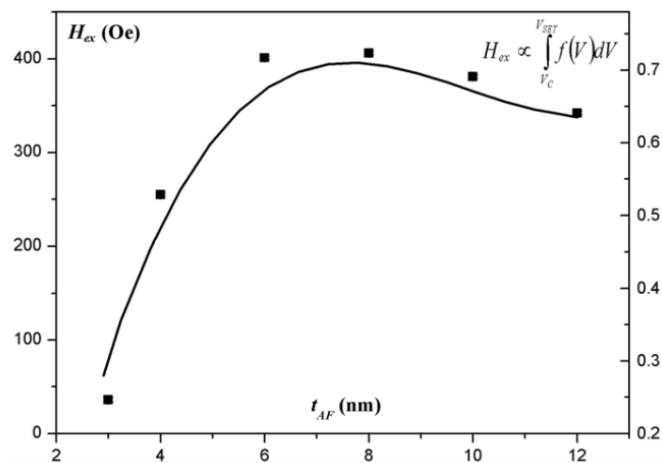
สำหรับช่วงแรกคือ กลุ่มของเกรนแม่เหล็ก AF ขนาดเล็ก (small AF grains) ที่มี $V < V_C$ ส่งผลทำให้ขาดเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกแสดงดังภาพประกอบ 4.29(ก) ช่วงที่สองคือกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก AF ที่กำหนดทิศทางได้ (setting AF grains) ซึ่งมี $V_C < V < V_{SET}$ โดยกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก AF ที่มีปริมาตรอยู่ในช่วงดังกล่าวจะถูกกำหนดทิศทางด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ [134] แสดงดังภาพประกอบ 4.5(ข) นอกจากนี้ยังพบว่าเกรนแม่เหล็กที่มีค่าอยู่ในช่วง $V_C < V < V_{SET}$ เป็นตัวกำหนดลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น ช่วงสุดท้ายคือกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก AF ขนาดใหญ่ (large AF grains) ซึ่งมี $V > V_{SET}$ โดยกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก AF ที่มีปริมาตรสูงจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กส่งผลทำให้เกรนแม่เหล็กกลุ่มนี้มีทิศทางที่แน่นอนตามทิศแกนง่ายและผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น

วัสดุไม่สามารถเหนี่ยวนำทำให้เกรนแม่เหล็กกลุ่มนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้ (thermally stable AF volume) แสดงดังภาพประกอบ 4.5(ค) ความสัมพันธ์ดังกล่าวนำไปสู่การนำเสนอกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป



ภาพประกอบ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของปริมาณของเกรนแม่เหล็ก AF ภายหลังจากกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในช่วง (ก) $V < V_c$ (ข) $V_c < V < V_{SET}$ และ (ค) $V > V_{SET}$ ตามลำดับ [25]

นอกจากนี้เฟอร์นันเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [135] ยังได้ทำการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน Si/Cu(10nm)/CoFe(2.5nm)/IrMn(t_{film})/Ta(10nm) ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 3 nm ถึง 12 nm ณ อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าค่า $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเพิ่มขึ้นโดยปริมาณ $|H_{EB}|$ จะมีค่าสูงสุดในกรณีที่ $t_{film} = 8$ nm และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อ $t_{film} > 8$ nm สอดคล้องกับสมการ (4.5) ได้เป็นอย่างดีแสดงดังภาพประกอบ 4.6



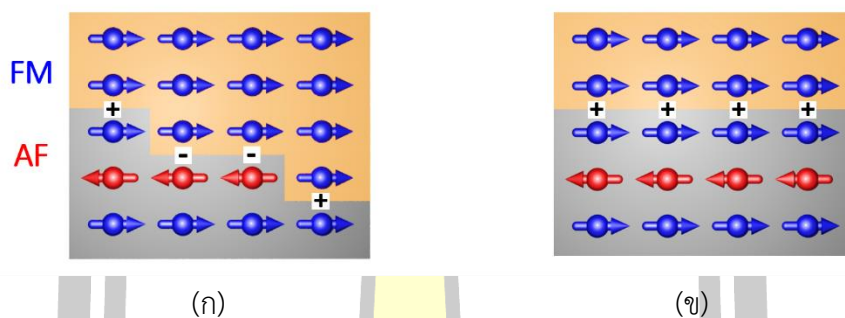
ภาพประกอบ 4.6 ผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาของชั้นฟิล์ม AF เปรียบเทียบกับสมการ (4.5) [135]

4.1.2.2 รอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็ก

ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่มีลักษณะและคุณสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างกัน จะแสดงปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่แตกต่างกันซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย โดยหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนคือ ลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กที่ส่งผลต่อการจัดเรียงทิศทางของสปินหรือแมกนีไทเซชันของชั้น AF ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ โดยทั่วไปการจัดเรียงทิศทางของสปินจะถูกจำแนกออกเป็นสองรูปแบบหลักคือ สปินที่ชดเชยกันได้ (compensated spins) และสปินที่ชดเชยกันไม่ได้ (uncompensated spins) [18], [19] ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณสปินรวมที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF แสดงดังตัวอย่างในภาพประกอบ 4.7 เมื่อกำหนดให้เครื่องหมายบวกแทนคู่ทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและเครื่องหมายลบแทนคู่ทิศทางของแมกนีไทเซชันที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

สำหรับกรณีที่ชั้น AF ที่มีปริมาณแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อรวมเท่ากับศูนย์ $M = 0$ จะถูกพิจารณาเป็นระบบสปินที่ชดเชยกันได้แสดงดังภาพประกอบ 4.6(ก) ซึ่งมีการจัดเรียงทิศทางของคู่แมกนีไทเซชันทั้งสองประเภทแทนด้วยเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบเท่ากัน กล่าวคือ แมกนีไทเซชันใน AF สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM ในทิศทางตรงกันข้ามด้วยปริมาณที่เท่ากันส่งผลทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบดังกล่าว โดยระบบสปินที่ชดเชยกันได้อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่รอยต่อระหว่างชั้นวัสดุมีลักษณะไม่ราบเรียบ (roughed interface) เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (sputtering)

process) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน (easy axis distribution) ภายในชั้น AF และชั้น FM [39] สำหรับกรณีที่ชั้น AF ที่มีปริมาณแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อรวมไม่เท่ากับศูนย์ $M \neq 0$ จะถูกพิจารณาเป็นระบบสปินที่ซัดเซยกันไม่ได้ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ เนื่องจากแมกนีไทเซชันรวมในชั้น AF สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้ซึ่งแทนด้วยเครื่องหมายบวกในภาพประกอบ 4.6(ข)



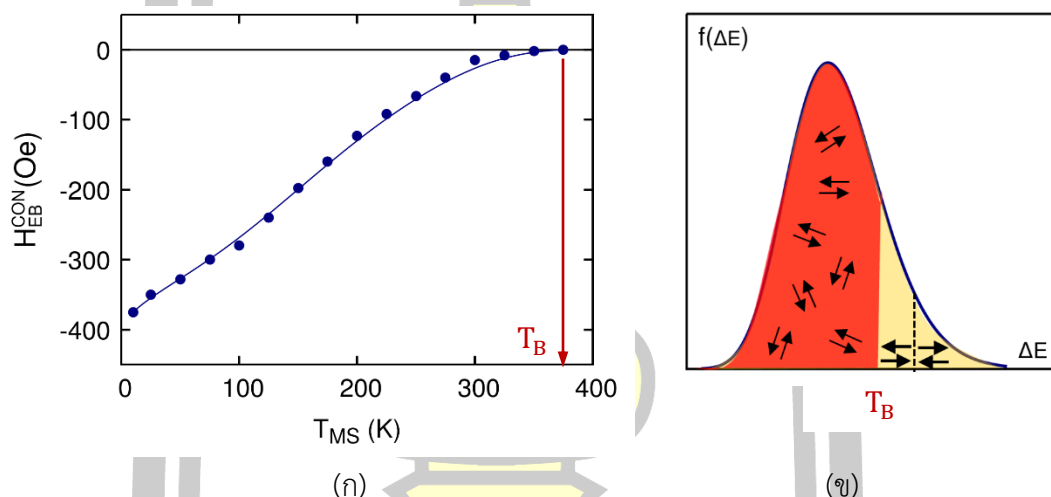
ภาพประกอบ 4.7 การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อใน (ก) ระบบสปินที่ซัดเซยกันไม่ได้และ (ข) ระบบสปินที่ซัดเซยกันไม่ได้

4.1.2.3 อุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น เมื่อทำการวัดลูบวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (conventional measurement procedure) โดยการเพิ่มอุณหภูมิการวัด (measurement temperature, T_{MS}) อย่างต่อเนื่องจะพบว่า ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่แกนสมมาตรส่งผลทำให้ขนาดของค่า H_{EB} มีแนวโน้มลดลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยค่าอุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ทำให้ปริมาณ H_{EB} มีค่าเท่ากับศูนย์ถูกเรียกว่า อุณหภูมิกีดกัน (blocking temperature, T_B) กล่าวคือ ($H_{EB}(T_B) = 0$) [17] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความสามารถในการทนต่อความร้อนหรือเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [36], [134] นอกจากนี้แล้วยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [36], [133]

ตัวอย่างการวัดค่า H_{EB} และค่า T_B ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.8(ก) โดยพบว่าเมื่อ T_{MS} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ขนาด

ของค่า H_{EB} มีแนวโน้มลดลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่ค่าศูนย์ที่ $T_{MS}(T) = T_{MS}(T_B) = 375$ K เนื่องจากผลกระทบทางความร้อนส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ส่วนใหญ่ที่มีค่าพลังงานการรักษาทิศทางต่ำและแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกเนื่องจากแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่ม ในขณะที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF บางส่วนที่มีค่าพลังงานการรักษาทิศทางสูงจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามอย่างสมบูรณ์ซึ่งส่งผลทำให้ผลรวมของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังภาพประกอบ 4.8(ข) ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ไว้ได้ นำไปสู่การเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสกลับไปยังแกนสมมาตรและทำให้ปริมาณ H_{EB} มีแนวโน้มลดลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

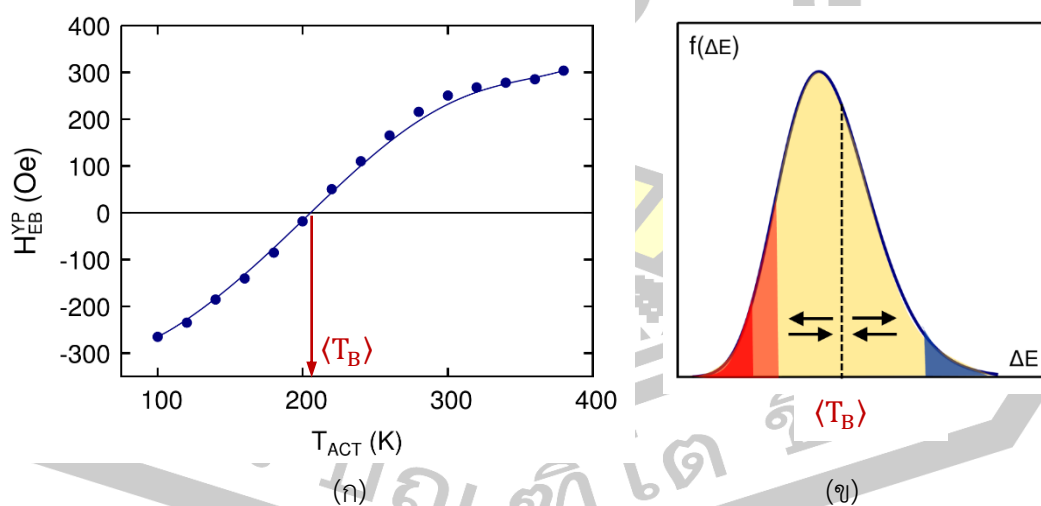


ภาพประกอบ 4.8 (ก) ผลการวัดค่า T_B ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม [25] และ (ข) พฤติกรรมของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในขณะ $T_{MS} = T_B$

จากภาพประกอบ 4.8(ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อ $T_{MS} = T_B$ ทำให้ค่า H_{EB} มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากมีแมกนีไทเซชันของชั้น AF เพียงบางส่วนเท่านั้นที่ได้รับกระตุ้นด้วยผลของความร้อนและไม่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกโดยจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามอย่างสมบูรณ์ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน แต่เมื่อ $T_{MS} > T_B$ จะพบว่าค่า H_{EB} ยังคงมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่วัดได้เป็นการแสดงพฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เท่านั้น ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น AF ทั้งหมดแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกและไม่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกส่งผลทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ดังนั้นการพิจารณาค่า T_B ของระบบโดย

อาศัยวิธีการวัดแบบดั้งเดิมจะไม่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายอิทธิพลของความร้อนต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกต้องและมีนัยสำคัญทางฟิสิกส์ได้

จากข้อจำกัดของการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและค่า T_B ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม โอเกรดีและคณะ (K. O'Grady *et al.*) [25] ได้นำเสนอวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสรูปแบบใหม่ที่ไม่มีผลของอุณหภูมิในการวัดเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งถูกเรียกว่า York protocol การเลือกใช้ York protocol จะช่วยให้สามารถวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสได้เท่ากันเสมอแม้ว่าจะทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิเดิมซ้ำหลายครั้ง เนื่องจากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะถูกวัดในช่วงอุณหภูมิการวัดที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องของ T_{MS} และแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีทิศทางตรงข้ามกับทิศการป้อนสนามเริ่มต้น จากนั้นทำการลดอุณหภูมิในการวัดลงให้มีค่าเท่ากับ T_{MS} อีกครั้งเพื่อให้วัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่สมบูรณ์ได้ด้วยวิธีการดังกล่าวแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อน (AF free of thermal activation) ทำให้สามารถพิจารณาค่า H_{EB} และค่ากลางของอุณหภูมิกีดกัน (median blocking temperature, $\langle T_B \rangle$) ที่แน่นอนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้ แม้ว่าจะมีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสซ้ำอีกหลายครั้งดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1



ภาพประกอบ 4.9 (ก) ผลการวัดค่า $\langle T_B \rangle$ ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ด้วย York protocol [25] และ (ข) พฤติกรรมของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในขณะ $T_{ACT} = \langle T_B \rangle$

ตัวอย่างการวัดค่า H_{EB} ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ด้วย York protocol และการพิจารณาค่า $\langle T_B \rangle$ ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe ถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.9(ก) โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $T_{ACT} = \langle T_B \rangle \sim 210$ K เนื่องจากผลการกระตุ้นทางความร้อนด้วยอุณหภูมิ $T_{ACT} = \langle T_B \rangle$ ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามอย่างสมบูรณ์ด้วยจำนวนที่เท่ากันซึ่งส่งผลทำให้ผลรวมของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังภาพประกอบ 4.9(ข) ทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ไว้ได้นำไปสู่การเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอริซิสกลับไปยังแกนสมมาตร แต่เมื่อ $T_{ACT} > \langle T_B \rangle$ จะสามารถวัดค่า H_{EB} ที่มีค่าเป็นบวกได้เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF ที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังภาพประกอบ 4.9(ก)

สำหรับชั้น AF ที่มีโครงสร้างฟิล์มแบบพหุผลึก (polycrystalline film) พบว่า T_B จะมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กซึ่งแปรผันตรงกับปริมาตรของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก V_{AF} และค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก K_{AF} [32], [133], [134] เนื่องจากการเพิ่มค่า V_{AF} จะช่วยให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF มีความสามารถทนต่อความร้อนได้ดียิ่งขึ้น การพิจารณาค่าอุณหภูมิ T_B สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (4.4) [36]

$$T_B = \frac{K_{AF} V_{AF}}{25k_B} \quad (4.6)$$

เมื่อ k_B คือค่าคงที่โบลซ์มาน จากความสัมพันธ์ในสมการ (4.6) พบว่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาหาค่าคงที่ของชั้น AF ที่ถูกต้องได้ โดยในกรณีของค่า $\langle T_B \rangle$ ที่พิจารณาได้จาก York protocol สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า K_{AF} ได้ดังสมการ

$$K_{AF}(\langle T_B \rangle) = \frac{\ln(tf_0)}{V_{AF}} k_B \langle T_B \rangle \quad (4.7)$$

เมื่อ t คือ ระยะเวลาในการให้อุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 นาที หรือ 1800 s f_0 คือ ค่าคงที่ของการสั่นหรือค่าความถี่ทดลอง (attempt frequency) ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{10} Hz [117], [118]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมีลักษณะที่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความหนาของชั้นวัสดุแต่ละชนิด ลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ และค่าอุณหภูมิที่ใช้ทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิส เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนแสดงพฤติกรรมการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่แตกต่างกันออกไปและยากต่อการที่จะเข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายใน

วัสดุ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการนำเสนอหลากหลายทฤษฎีเพื่ออธิบายผลการเกิดปรากฏการณ์โบส-แลกเปลี่ยน แต่พบว่ายังไม่มีทฤษฎีใดที่ได้รับการยอมรับและนำมาใช้ในการอธิบายถึงผลของการเกิดปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นโบสแลกเปลี่ยนเพื่อใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างชั้นโบสแลกเปลี่ยนโดยรายละเอียดของแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นโบสแลกเปลี่ยนจะถูกอธิบายถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

4.2 แบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก [17], [19], [25] ทำให้ปรากฏการณ์ดังกล่าวได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการทดลองและด้านทฤษฎี [19], [25] โดยทั่วไปผลการศึกษาปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนในทางทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อใช้อธิบายกลไกทางฟิสิกส์ของปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนภายในวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนได้อย่างครอบคลุมแม้ว่าจะมีการศึกษาและนำเสนอทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนออกมาในหลากหลายสมมติฐาน เนื่องจากความซับซ้อนของปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยน ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงแบบจำลองทางทฤษฎีที่สำคัญซึ่งถูกนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวภายใต้สมมติฐานที่แตกต่างกันออกไปเพื่อสร้างพื้นฐานความเข้าใจให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองแกรนูลาร์ที่ถูกนำเสนอขึ้นในงานวิจัยได้

4.2.1 แบบจำลองเบื้องต้นของไมเคิลเจอร์นและบิน

แบบจำลองทางทฤษฎีอย่างง่ายสำหรับการอธิบายปรากฏการณ์โบสแลกเปลี่ยนถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยไมเคิลเจอร์นและบินในปี ค.ศ. 1962 [94] ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดปริมาตรของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้นมีค่าเท่ากันและกำหนดให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก M_{FM} และแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก M_{AF} มีลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวที่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้พิจารณาให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางแบบพร้อมเพรียงกัน (coherent rotation) ตามทฤษฎีของ Stoner – Wohlfarth [100] ดังนั้นพลังงานต่อหน่วยปริมาตร (energy per unit volum, E) ของระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นแสดงดังสมการ

$$E = -HM_{FM}t_{FM}\cos(\theta - \beta) + K_{AF}t_{AF}\sin^2(\alpha) - J_K\cos(\beta - \alpha) \quad (4.8)$$

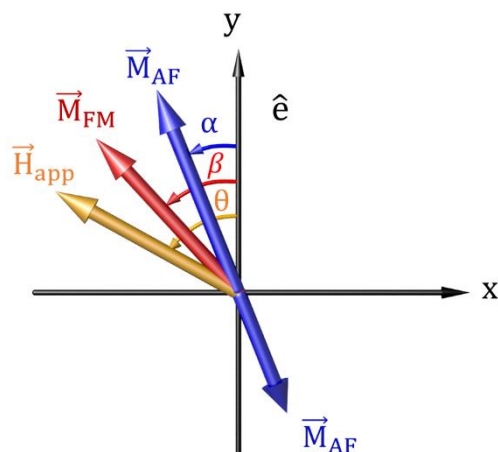
- เมื่อ H คือ สนามแม่เหล็กภายนอก
- K_{AF} คือ ค่าแอนไอโซโทรปีผลึกของชั้น AF
- t_{FM} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม FM
- t_{AF} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม AF
- J_K คือ ค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยนต่อหน่วยปริมาตร (exchange anisotropy energy per unit volume) ของชั้น FM
- β คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น FM กับทิศแกนง่าย \hat{e}
- α คือ มุมระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF กับทิศแกนง่าย \hat{e}
- θ คือ มุมระหว่างทิศการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อทิศแกนง่าย \hat{e} ของแมกนีไทเซชันในชั้น AF และชั้น FM ซึ่งกำหนดให้อยู่ในแนวแกน y แสดงดังภาพประกอบ 4.10

เทอมแรกในสมการ (4.8) เป็นการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM ในขณะที่เทอมที่สองและเทอมที่สามถูกใช้สำหรับการอธิบายผลของพลังงานแอนไอโซโทรปีที่เกิดขึ้นภายในชั้น FM และชั้น AF ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่น้อยที่สุดของระบบจากมุม α และ β ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่า H_{EB} ได้ดังสมการ

$$H_{EB} = \frac{J_{int}}{M_{FM}t_{FM}} \quad (4.9)$$

จากการศึกษาพบว่าปริมาณ H_{EB} ที่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองอย่างง่ายนี้ได้ให้ผลอยู่ในช่วงที่แตกต่างจากผลการทดลองเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องจากการกำหนดสมมติฐานอย่างง่ายและได้ละเลยผลของปัจจัยอื่นๆ ที่อาจจะส่งผลต่อการคำนวณค่า H_{EB} ได้ ยกตัวอย่างเช่น ผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กและผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย เป็นต้น

พูน ปรณ ทิโต ชีวะ



ภาพประกอบ 4.10 การพิจารณาทิศทางของแกนนี้ไทเซชันและสนามแม่เหล็กภายนอกภายในระบบที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนของไมเคิลเจอร์นและป็น [94]

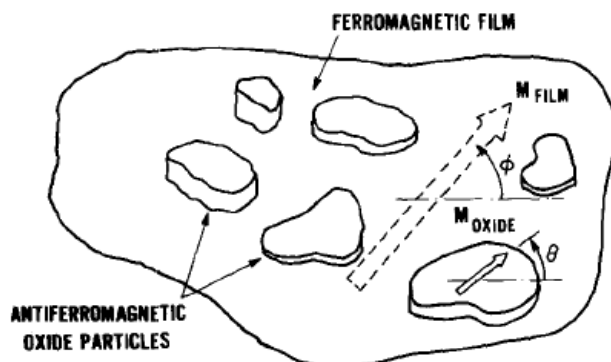
4.2.2 แบบจำลองแกรนูลาร์ของฟิล์มเมอร์และซาราป

สำหรับแบบจำลองที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้เป็นอย่างดีได้ถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1972 โดยฟิล์มเมอร์และซาราป (Fulcomer and Charap) [34] ซึ่งได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุ AF ที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกันซึ่งไม่เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนต่อกันเชื่อมติดกับแผ่นฟิล์ม FM ต่อเนื่องแสดงดังภาพประกอบ 4.11 โดยพิจารณาให้ค่าพลังงานรวมของชั้น AF ของเกรนแม่เหล็ก AF แต่ละเกรนมีรูปแบบเป็นพลังงานของ Stoner – Wohlfarth [100] แสดงดังสมการ

$$E_{AF} = -adK_{AF}\sin^2(\theta - \varphi) - J_s\cos(\theta - \phi) \quad (4.10)$$

- เมื่อ θ คือ มุมระหว่างโมเมนต์ของเกรนแม่เหล็ก AF และทิศแกนง่าย \hat{e} ของชั้น FM
 ϕ คือ มุมระหว่างโมเมนต์ของเกรนแม่เหล็ก FM และทิศแกนง่าย \hat{e}
 φ คือ มุมระหว่างทิศแกนง่าย \hat{e} ของชั้น AF และชั้น FM
 K_{AF} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้น AF
 J_s คือ ค่าคงที่แลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อ
 a คือ พื้นที่ของเกรนแม่เหล็ก AF
 d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม
 c คือ ค่าคงที่การเชื่อมติดกันของเกรนแม่เหล็ก AF และ FM

ค่าพลังงานรวมของชั้น AF ในสมการ (4.10) จะถูกนำไปใช้ในการพิจารณาโอกาสในการผันกลับทิศทางของเกรนแม่เหล็ก AF เมื่อถูกกระตุ้นทางความร้อน

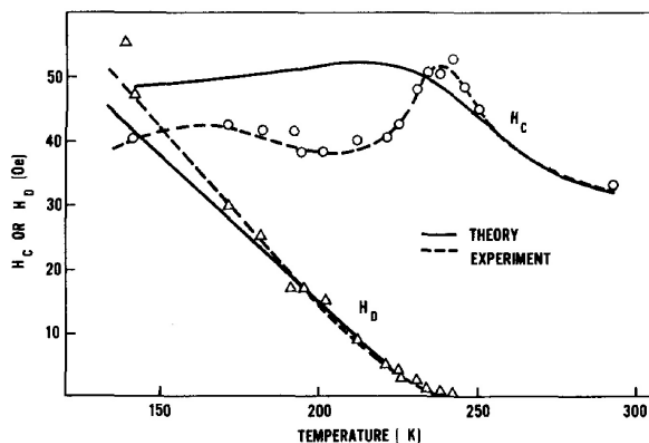


ภาพประกอบ 4.11 แผนภาพเกรนแม่เหล็กของชั้น AF ที่เชื่อมติดกันกับชั้นฟิล์ม FM ต่อเนื่องที่ถูกศึกษาในแบบจำลองของฟิล์มเมอร์และซาราป [34]

ฟิล์มเมอร์และซาราปได้ทำการคำนวณปริมาณ H_{EB} และค่า H_C ของระบบเกรนโคบอลต์เชื่อมติดกับเกรนแม่เหล็กโคบอลต์ออกไซด์ (Co/CoO) โดยอาศัยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองวัดค่า H_{EB} และค่า H_C ของระบบฟิล์มบาง Co/CoO ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่าปริมาณ H_{EB} มีค่าลดลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นและมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออุณหภูมิในการคำนวณมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ติดกันสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี [136] ในขณะที่ค่า H_C มีการเปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิและแสดงจุดยอดในช่วงอุณหภูมิที่ปริมาณ H_{EB} มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังภาพประกอบ 4.12 เนื่องจากผลของความร้อนทำให้เกรนแม่เหล็ก AF เกิดการผันกลับทิศทางนำไปสู่การลดลงของค่า H_{EB} นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเช่นเดียวกัน

แบบจำลองของฟิล์มเมอร์และซาราปยังถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์ที่ถูกเสนอขึ้นในภายหลังโดยนิชิโอะกะและคณะ (K. Nishioka *et al.*) [27], [28], [137] เพื่อใช้สำหรับการศึกษาผลกระทบของขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กนิเกิลไอรอนที่เชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กไอรอนแมงกานีส NiFe/FeMn [27] และการศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของชั้นฟิล์ม AF ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ที่เชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กโครเมียมแมงกานีสแพลตทินัม Co/CrMnPt [28] รวมไปถึง

ถึงการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุ Co/CrMnPt [137] เช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ 4.12 ผลการคำนวณค่า H_{EB} และค่า H_C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยอาศัยแบบจำลองทางทฤษฎีของฟิล์มเมอร์และซาราปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [34]

4.2.3 แบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างง่ายของเฟอร์รอนาเดซ

แบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างง่าย (simple numerical model) สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นถูกนำเสนอขึ้นโดยเฟอร์รอนาเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [38] ภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดมีลักษณะเป็นโดเมนเดียวและพิจารณาให้มีการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ในลักษณะของฟังก์ชันการกระจายตัวเป็นแบบปกติสองสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กจริงในระบบที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอร์แบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกสร้างขึ้นโดยละเอียดการพิจารณาผลของค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กในชั้น FM และค่าสนามแม่เหล็กหักล้างภายในชั้น FM โดยที่เกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF แต่ละเกรนจะมีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กดังสมการ

$$\Delta E_{AF} = K_{AF} V_{AF} \left[1 - \frac{H^*}{H_K} \right]^2 \quad (4.11)$$

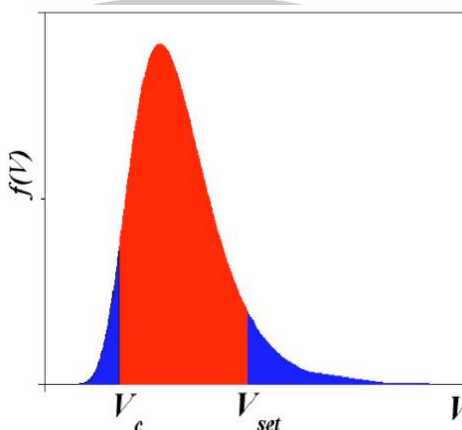
เมื่อ V_{AF} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF

K_{AF} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF

H^* คือ สนามไบอัสแลกเปลี่ยนจากชั้น FM ที่กระทำต่อชั้น AF

H_K^* คือ สนามแอนไอโซโทรปีที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (pseudo anisotropy field) [101]

ในแบบจำลองนี้ได้พิจารณาให้เกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF ถูกแบ่งสถานะออกเป็นสามช่วงระหว่างปริมาตรวิกฤต (critical volume, V_C) และปริมาตรการเซต (setting volume, V_{SET}) แสดงดังภาพประกอบ 4.13 เมื่อพิจารณาปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ในกรณีที่ $V < V_C$ พบว่าเกรนแม่เหล็กนั้นมีปริมาตรที่น้อยมากทำให้ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กมีค่าน้อยจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF ตามทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM ไว้ได้ ภายหลังจากกระบวนการให้สนามความเย็น เรียกว่า เกรนที่ขาดเสถียรภาพทางความร้อน (unthermally stable AF grains) ซึ่งมีผลทำให้เกรนเหล่านี้ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้ แต่ในกรณีที่ $V > V_{SET}$ กลับพบว่าเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF จะไม่สามารถจัดเรียงตัวตามทิศทางของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น FM ภายหลังจากกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ได้เนื่องจากเกรนแม่เหล็กเหล่านี้มีปริมาตรที่สูงเกินไปซึ่งยากต่อการเหนี่ยวนำทำให้เปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนได้ เรียกว่า เกรนที่ไม่ถูกกำหนดทิศทาง (unset AF grains)



ภาพประกอบ 4.13 การกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [38]

จากลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ที่มีปริมาตรอยู่ในช่วงระหว่างปริมาตรวิกฤตและปริมาตรการเซต $V_C < V < V_{SET}$ จะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ากรณีอื่นๆ และเป็นตัวกำหนดปริมาณ H_{EB} ในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้น กล่าวคือ H_{EB} จะมีค่าแปรผันตามปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ที่มีเสถียรภาพทาง

ความร้อน (thermally stable AF grains) ซึ่งอยู่ในช่วง $V_C < V < V_{SET}$ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของการหาปริพันธ์ได้ดังสมการ (4.12)

$$H_{EB} \propto \int_{V_C}^{V_{SET}} f(V) dV \quad (4.12)$$

เมื่อ H_{EB} คือ ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของลูบวงปิดฮิสเทอรีซิส
 $f(V)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF

เมื่อนำเอาแบบจำลองอย่างง่ายที่ถูกนำเสนอขึ้นนี้มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่า H_{EB} สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม AF พบว่าค่า H_{EB} มีแนวโน้มลดลงตามขนาดความหนาของชั้นฟิล์ม AF เพิ่มสูงขึ้นและให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองได้ แต่เนื่องจากการละเลยการพิจารณาผลของค่าอันตรกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก รวมไปถึงผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของเกรนแม่เหล็ก ส่งผลทำให้แบบจำลองดังกล่าวนี้ขาดความเสมือนจริงในการอธิบายปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

4.2.4 แบบจำลองแกรนูลาร์ของซูและแคร็ก

แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้น AF และชั้น FM ถูกพัฒนาขึ้นโดยซู (D. Choo *et al.*) [35] และแคร็ก (B. Craig *et al.*) [36] เพื่อใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน แบบจำลองของซูและแคร็กมีพื้นฐานตามแบบจำลองของฟิลคัมเมอร์และซาราบดิงที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.2 ซึ่งเป็นการจำลองโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในระดับจุลภาค (microscale) ที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากโดยที่เกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในระบบแทนด้วยแมกนีไทเซชันหนึ่งตัว สำหรับแบบจำลองของซูและแคร็กได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอยในการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็ก โดยพิจารณาให้เกรนแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชนิดจัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน มีลักษณะเป็นแท่งเกรนเชื่อมติดกันแบบแท่งเกรน (columnar stack) สำหรับการจำลองโครงสร้างของชั้น FM จะมีพื้นฐานอยู่บนวิธีการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแบบมาตรฐาน (standard micromagnetic model) ที่อาศัยสมการ LLG ในการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชัน ในขณะที่สถานะของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF สามารถควบคุมได้โดยอาศัยกระบวนการกระตุ้นทางความร้อน (thermally activated process) ดังนั้นระเบียบวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo Method) จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายโอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF

แบบจำลองนี้ได้พิจารณาให้ค่าพลังงานการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น AF และชั้น FM (interlayer exchange energy, E_{exch}) มีค่าดังสมการ

$$E_{\text{exch}} = -J_s a c \hat{m}_{\text{FM}} \cdot \hat{m}_{\text{AF}} \quad (4.13)$$

- เมื่อ J_s คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนบริเวณพื้นผิววัสดุ (interfacial exchange constant)
 a คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็ก
 c คือ ค่าแฟคเตอร์ที่ใช้แสดงถึงการเชื่อมติดกันของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนระหว่างชั้นวัสดุ (contact fraction)
 \hat{m}_{FM} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM
 \hat{m}_{AF} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF

ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field, $\vec{H}_{\text{ex}}^{\text{int}}$) สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณค่าอนุพันธ์ของค่าพลังงานแลกเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อ E_{exch} ในสมการ (4.13) เทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก $\vec{\mu}_{\text{FM}}$ ดังนี้

$$\vec{H}_{\text{ex}}^{\text{int}} = \frac{\partial E_{\text{exch}}}{\partial \vec{\mu}_{\text{FM}}} = \frac{J_s c \hat{m}_{\text{AF}}}{M_{\text{stFM}}} = H_{\text{ex}}^{\text{int}} \hat{m}_{\text{AF}} \quad (4.14)$$

- โดยที่ $\vec{\mu}_{\text{FM}} = M_S V \cdot \hat{m}_{\text{FM}}$ เมื่อ
 M_S คือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัวของชั้น FM
 V คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนซึ่งมีค่าเป็น $V = a t_{\text{FM}}$
 t_{FM} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม FM

จากสมการ (4.14) จะเห็นได้ว่าปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF ออกแรงกระทำต่อชั้น FM จะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field strength, $H_{\text{ex}}^{\text{int}}$) ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์ที่มีค่าดังสมการ

$$H_{\text{ex}}^{\text{int}} = \frac{J_s c}{M_{\text{stFM}}} \quad (4.15)$$

โดยปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ $H_{\text{ex}}^{\text{int}}$ ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.14) จะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ด้วยวิธีการ LLG เพื่อให้สามารถพิจารณาผลการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กได้ นอกจากนี้ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่ถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น

AF โดยอาศัยเทคนิคมอนติคาร์โลจะสามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีในชั้น AF และค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุจากสมการ (4.13) แสดงดังสมการ

$$E_{AF} = -adK_{AF}(\hat{e} \cdot \hat{m}_{AF})^2 - J_{sac}\hat{m}_{FM} \cdot \hat{m}_{AF} \quad (4.16)$$

เมื่อ \hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และ d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม AF

แบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการทำนายลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM และชั้น AF ได้ และให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลอง [32]

4.3 แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

จากการศึกษาปริทัศน์เอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับแบบจำลองทางทฤษฎีสำหรับปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2 พบว่าแบบจำลองทั้งหมดที่ถูกพัฒนาขึ้นได้มีการกำหนดสมมติฐานของการจำลองโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นยังคงมีข้อจำกัดในการกำหนดสมมติฐานที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เช่น การกำหนดให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแบบสมบูรณ์และละเลยผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเนื่องจากความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จะได้นำเอาแบบจำลองดังกล่าว [35], [36] มาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนในงานวิจัยนี้ให้ระบบมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยการพิจารณาผลของอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็ก ผลของสนามแม่เหล็กหักล้าง และผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเนื่องจากความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อร่วมด้วย เพื่อให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นได้โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM ในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการจำลองระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นให้มีความเสมือนจริงโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอย (Voronoi construction) เพื่อใช้สำหรับการพิจารณากระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (magnetization reversal process) และนำไปสู่การศึกษาผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการ

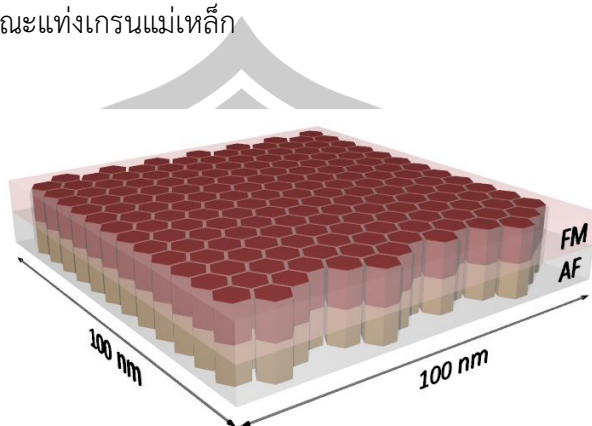
เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ กระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM จะถูกคำนวณด้วยเทคนิควิธีการที่แตกต่างกันเนื่องจากวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation timescale) ที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะได้เลือกใช้เทคนิควิธีการมอนติคาร์โลสำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และเลือกใช้สมการแลนดอว์ - ลิฟชิตส์ - กิลเบิร์ต (Landau – Lifshitz – Gilbert equation) สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM แบบจำลองการนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนมีรายละเอียดของดังต่อไปนี้

4.3.1 การกำหนดโครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

โครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM ซึ่งภายในชั้นฟิล์มแต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากจะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย การเลือกใช้โปรแกรมไวโรนอยจะช่วยให้สามารถกำหนดตัวแปรควบคุม (input parameters) ของการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กได้ เช่น ขนาดของระบบ (system size) ขนาดของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain size) ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (grain spacing) และการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก (grain size distribution) เป็นต้น การประมวลผลของโปรแกรมไวโรนอยด้วยตัวแปรควบคุมที่ถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรมจะทำให้ได้ตัวแปรตาม (output parameters) หรือชุดข้อมูลของระบบที่ถูกสร้างขึ้น ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งของเกรนแม่เหล็ก จำนวนและตำแหน่งของเกรนแม่เหล็กข้างเคียง (nearest neighbor grains) และค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน (relative exchange field strength) เป็นต้น โดยข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลและสมการ LLG เพื่อให้ได้ผลของคุณสมบัติแม่เหล็กใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.2

การจำลองระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอยจะเริ่มจากการจำลองโครงสร้างของชั้น AF ชั้นเป็นลำดับแรก เมื่อได้ชุดข้อมูลโครงสร้างของชั้น AF แล้วทำการจำลองโครงสร้างของชั้น FM โดยเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF และชั้น FM ที่มีลำดับตรงกันจะถูกพิจารณาให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากันและอยู่ในตำแหน่งเดียวกันเพื่อให้การจัดเรียงตัวของเกรนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบแท่งเกรนคล้ายคลึงกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจริง ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลขนาดเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ที่กำหนดให้ค่ากลางของเกรนแม่เหล็ก (median diameter, D_m) มีค่าเท่ากับ 8 nm ซึ่งมีความหนาของชั้นฟิล์มแต่ละชั้นเท่ากับ 4 nm ในกรณีที่ไม่พิจารณาลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.14

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกรนแม่เหล็กทั้งสองชั้นที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันจะมีขนาดที่เท่ากันและมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันอย่างสมบูรณ์ในลักษณะแท่งเกรนแม่เหล็ก



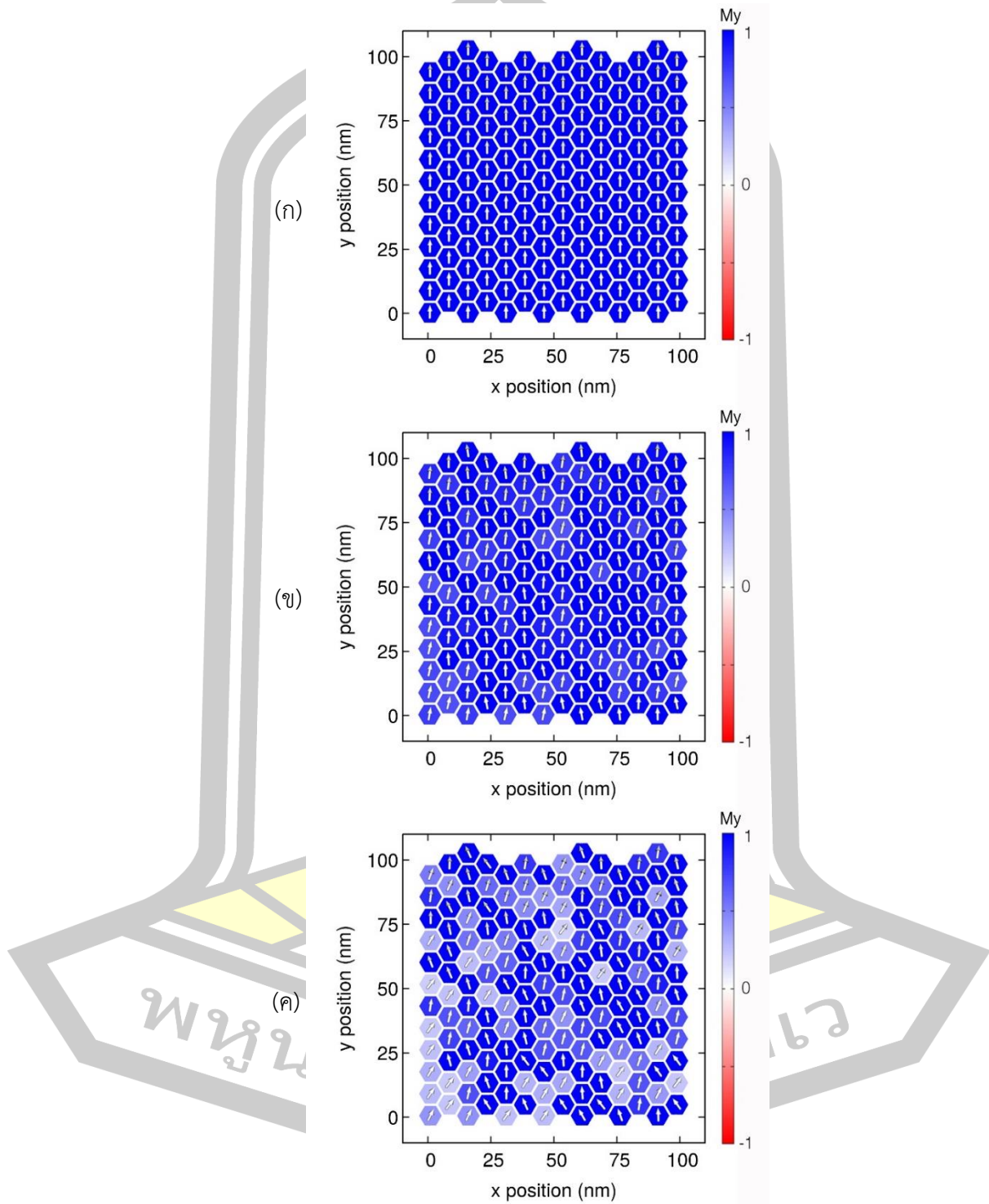
ภาพประกอบ 4.14 ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นของวัสดุ AF (ด้านล่าง) และวัสดุ FM (ด้านบน) ขนาด 100x100 nm² ที่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอย

หลังจากขั้นตอนการจำลองระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะได้ทำการกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM เพื่อใช้สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในลำดับต่อไป โดยแบบจำลองที่นำเสนอสามารถพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM ได้โดยอาศัยฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution function) สำหรับแบบจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะได้กำหนดให้ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุทั้งสองชั้นมีการกระจายตัวแบบสุ่มอยู่ในระนาบ $\pm xy$ โดยการกระจายตัวของทิศแกนง่ายดังกล่าวจะถูกกำหนดจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมการกระจายตัว (σ_ϕ) สำหรับทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM ในแนวแกน x y และ z สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.17)

$$\begin{aligned}\hat{m}_i^x &= \sin\phi_i \\ \hat{m}_i^y &= \cos\phi_i \\ \hat{m}_i^z &= 0\end{aligned}\quad (4.17)$$

เมื่อ \hat{m}_i^x คือ ทิศทางเริ่มต้นของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF และชั้น FM ลำดับที่ i ในแนวแกน x
 \hat{m}_i^y คือ ทิศทางเริ่มต้นของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF และชั้น FM ลำดับที่ i ในแนวแกน y
 \hat{m}_i^z คือ ทิศทางเริ่มต้นของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF และชั้น FM ลำดับที่ i ในแนวแกน z
 ϕ_i คือ มุมการกระจายตัวระหว่างทิศแกนง่ายและทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็ก AF และ FM ลำดับที่ i ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับ σ_ϕ

จากสมการ (4.17) จะสังเกตเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันในแนวแกน z ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อ บังคับให้แมกนีไทเซชันมีทิศทางการกระจายตัวอยู่ในระนาบ xy เท่านั้น



ภาพประกอบ 4.15 ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF แบบสองมิติในกรณี (ก) $\sigma_\phi = 0^\circ$ (ข) $\sigma_\phi = 15^\circ$ และ (ค) $\sigma_\phi = 45^\circ$

ตัวอย่างการกำหนดมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ในระบบที่ไม่คิดผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก $\sigma_{\text{IND}} = 0^\circ$ ถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.15 โดยในกรณีที่มีมุมการกระจายตัวมีค่าเป็นศูนย์ $\sigma_\phi = 0^\circ$ พบว่าแมกนีไทเซชันทั้งหมดภายในระบบจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันอย่างสมบูรณ์ (perfect alignment state) ตามแนวแกน +y ซึ่งแสดงลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวดังภาพประกอบ 4.15(ก) แต่เมื่อมุมการกระจายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น $\sigma_\phi = 15^\circ$ จะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันภายในระบบจะมีทิศทางที่เบี่ยงเบนออกจากแกน +y ไปตามแนวแกน $\pm x$ แบบสุ่มด้วยขนาดของมุมด้านละ 15° แสดงดังภาพประกอบ 4.15(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันที่แคบ (narrow distribution) สำหรับกรณีที่มีมุมการกระจายตัวมีค่าสูงเป็น $\sigma_\phi = 45^\circ$ พบว่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันจะมีลักษณะที่กว้าง (wide distribution) แสดงดังภาพประกอบ 4.15(ค) โดยแมกนีไทเซชันภายในระบบจะมีทิศทางที่เบี่ยงเบนออกจากแกน +y แบบสุ่มไปตามแนวแกน $\pm x$ ด้วยขนาดของมุมด้านละ 45° ซึ่งจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากทิศทางของลูกศรและความเข้มสีของเกรนแม่เหล็กที่ถูกใช้แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแนวแกน +y

4.3.2 การคำนวณพลวัตของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์

แบบจำลองในระดับจุลภาคที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนได้อาศัยเทคนิควิธีการที่แตกต่างกันสำหรับการอธิบายคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกันของวัสดุแต่ละประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะเวลา (timescale) ที่แมกนีไทเซชันภายในวัสดุแต่ละประเภทใช้สำหรับกระบวนการกลับทิศทาง เมื่อชั้น AF มีลักษณะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวน่าได้ยากเนื่องจากมีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่ค่อนข้างสูง $K_{\text{AF}} \sim 10^6 \text{ erg/cm}^3$ [18], [25] เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM และทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นส่งผลทำให้วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้มีระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่ค่อนข้างยาวนาน (long-term calculation) ซึ่งมีความจำเป็นจะต้องอาศัยกระบวนการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation process) เพื่อช่วยในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นเทคนิคมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo) เป็นวิธีการที่ถูกเลือกใช้สำหรับการพิจารณาลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF ในระยะยาว แต่สำหรับชั้น FM จะมีลักษณะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวน่าได้ง่ายโดยที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันจะขึ้นอยู่กับปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลเป็นหลักส่งผลทำให้ชั้น FM สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่าชั้น AF

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการจำลองในระดับจุลภาคแบบมาตรฐานที่อาศัยสมการ LLG สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM

การศึกษาพฤติกรรมของการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยเทคนิคมอนติคาร์โลเชิงจลน์ โดยค่าพลังงานเริ่มต้นหรือพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (AF energy barrier, ΔE_{AF}) ที่ใช้เพื่อป้องกันการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะถูกอธิบายอยู่ในรูปของค่าพลังงานอิสระ (free energy) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้น AF ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF รวมไปถึงค่าสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็ก AF (AF total local field, \vec{H}_T^{AF}) ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF (interlayer exchange field on AF layer, \vec{H}_{exch}^{AF-FM}) กล่าวคือ $\vec{H}_T^{AF} = \vec{H}_{exch}^{AF-FM}$ ปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุดังกล่าวนี้จะถูกใช้เพื่อพิจารณาการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กที่ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงความไม่อิสระต่ออุณหภูมิของค่าคงที่แอนไอโซโทรปีและแมกนีไทเซชันของชั้น AF โดยอาศัยทฤษฎีของคัลเลน - คัลเลน (Callen - Callen theory) [66] $K(T) = K(0)[M(T)/M(0)]^n$ เมื่อ $K(0)$ และ $M(0)$ คือค่าแอนไอโซโทรปีและค่าแมกนีไทเซชันรวมที่อุณหภูมิมิค่าเท่ากับ 0 K ตามลำดับ $M(T)$ คือค่าแมกนีไทเซชันรวมที่อุณหภูมิใดๆ ที่ต้องการพิจารณาและ n คือเลขชี้กำลังที่มีค่าเฉพาะขึ้นกับประเภทของวัสดุแม่เหล็กซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าเท่ากับ 3 สำหรับวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [36]

แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีพื้นฐานการคำนวณตามแบบจำลองของชู [35] และเคร็ก [36] ซึ่งพิจารณาลักษณะการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุซึ่งเป็นจุดกำเนิดของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมาจากค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange energy, E_{exch}) ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.4 โดยค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{exch} = -J_s a c \hat{m}_{AF} \cdot \hat{m}_{FM} \quad (4.18)$$

- เมื่อ J_s คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนบริเวณพื้นผิววัสดุ (interfacial exchange constant)
 a คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็ก
 c คือ ค่าแฟคเตอร์ที่ใช้แสดงถึงการเชื่อมติดกันของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนระหว่างชั้นวัสดุ (contact fraction)
 \hat{m}_{AF} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF และ
 \hat{m}_{FM} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM ตามลำดับ

ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันชั้นในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก \vec{H}_{ex}^{AF-FM} สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณค่าอนุพันธ์ของค่า E_{exch} ในสมการ (4.18) เทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก $\vec{\mu}_{AF}$ ดังนี้

$$\vec{H}_{exch}^{AF-FM} = -\frac{\partial E_{exch}}{\partial \vec{\mu}_{AF}} = \frac{J_S c \hat{m}_{FM}}{M_S t_{AF}} = z H_{ex}^{int} \frac{A}{A_{avg}} \hat{m}_{FM} \quad (4.19)$$

โดยที่ $\vec{\mu}_{AF} = M_S V_{AF} \cdot \hat{m}_{AF}$ เมื่อ

- M_S คือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัวของชั้น AF
- V_{AF} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ซึ่งมีค่าเท่ากับ $V_{AF} = A t_{AF}$
- z คือ ค่าสัดส่วนความหนาของชั้นฟิล์มซึ่งมีค่าเท่ากับ $z = t_{FM}/t_{AF}$
- t_{AF} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม AF
- t_{FM} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม FM
- A คือ พื้นที่ของเกรนแม่เหล็ก AF ที่พิจารณา
- A_{avg} คือ พื้นที่เฉลี่ยของเกรนแม่เหล็ก AF ทั้งหมดภายในระบบ

จากสมการ (4.19) จะเห็นได้ว่าค่า \vec{H}_{exch}^{AF-FM} จะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันชั้นในชั้น FM ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF (interlayer exchange field strength, H_{ex}^{int}) ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์ที่มีค่าดังสมการ

$$H_{ex}^{int} = \frac{J_S c}{M_S t_{AF}} \quad (4.20)$$

นอกจากนี้ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ΔE_{AF} ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันโดยอาศัยเทคนิคมอนติ-คาร์โลจะสามารถคำนวณได้จากผลต่างของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีในชั้น AF และค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุจากสมการ (4.18) แสดงดังสมการ

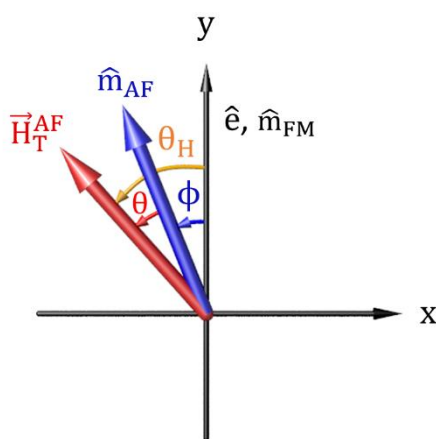
$$\Delta E_{AF} = -adK_{AF}(\hat{e} \cdot \hat{m}_{AF})^2 - J_S c \hat{m}_{AF} \cdot \hat{m}_{FM} \quad (4.21)$$

- เมื่อ \hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศแกนง่ายของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF
- d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม AF

โดยเทอมแรกในสมการ (4.21) แทนค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้น AF และเทอมที่สองแทนค่าพลังงานสนามแม่เหล็กรวมที่พิจารณาจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น FM ที่ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF ตามลำดับ การพิจารณาผลการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุในสมการ (4.21) จะสามารถพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ได้ สำหรับการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อระบบถูกกระตุ้นทางความร้อนที่มีค่าสูงกว่าค่าพลังงานกีดกันในช่วงระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation time, τ) ตามกฎของอาร์เร็นเนียส-นีลส์ (Arrhenius-Néel law) [103] ดังสมการ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp \left[-\frac{\Delta E_{AF}}{k_B T} \right] \quad (4.22)$$

โดยค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กต่ำที่สุดที่เกรนแม่เหล็ก AF ใช้สำหรับการป้องกันการกลับทิศทางเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนหรือปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติกภายในระยะเวลาการคลายตัวเท่ากับ 100 s ด้วยค่าคงที่ในการสั่น $f_0 = 10^9$ Hz [102] จะต้องมีค่าเท่ากับ $\Delta E_{AF} = 25k_B T$ หากเกรนแม่เหล็ก AF มีค่าพลังงาน $\Delta E_{AF} < 25k_B T$ ซึ่งแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก จะถูกพิจารณาโอกาสในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันโดยอาศัยสมการความน่าจะเป็น $P = e[-\Delta E_{AF}/k_B T]$ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3



ภาพประกอบ 4.16 ระบบพิกัดสองมิติของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่มีการกระจายตัวออกจากทิศแกนง่าย

สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก \hat{e} กระทำมุมใดๆ กับทิศทางของสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก \vec{H}_T^{AF} กล่าวคือ $\theta_H \neq 0$ แสดงดังภาพประกอบ 4.16 พบว่าจะไม่

สามารถทำการคำนวณปริมาณพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ได้โดยตรง เนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณ ทำให้มีความจำเป็นจะต้องนำเอาวิธีการประมาณเชิงตัวเลข [120] มาใช้ในการพิจารณาโดยค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็ก AF ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก H_T^{AF} และมุม θ_H แสดงดังสมการ

$$\Delta E_{AF}(H_T^{AF}, \theta_H) = KV \left[1 - \frac{|\vec{H}_T^{AF}|}{g(\theta_H)} \right]^{\kappa(\theta_H)} \quad (4.23)$$

เมื่อ $g(\theta_H) = [\cos^{2/3}\theta_H + \sin^{2/3}\theta_H]^{-3/2}$ และ $\kappa(\theta_H) = 0.86 + 1.14g(\theta_H)$ เป็นรูปแบบการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ $\theta_H \neq 0$ [120] สำหรับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.23) จะถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่แต่ละสถานะพลังงานแสดงดังสมการ

$$\tau^{-1}(H_T^{AF}, \theta_H) = f_0 \exp \left[\frac{-\Delta E_{AF}(H_T^{AF}, \theta_H)}{k_B T} \right] \quad (4.24)$$

เมื่อ $E_{AF}(H_T^{AF}, \theta_H)$ คือ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กรวมที่ต้องใช้สำหรับการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันและ θ_H คือ มุมระหว่างทิศแกนง่าย \hat{e} และทิศทางของสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก \vec{H}_T^{AF} ภายหลังจากนั้นผลรวมของระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันของระบบที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะที่มีพลังงานต่ำที่สุดสองสถานะ กล่าวคือ $\tau^{-1} = \tau_{12}^{-1} + \tau_{21}^{-1}$ จะถูกคำนวณเพื่อที่จะได้นำไปใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ดังสมการ

$$P_t = (1 - e^{-t_m/\tau}) \quad (4.25)$$

เมื่อ t_m คือระยะเวลาที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10^{-8} s [138] จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าโอกาสในการเปลี่ยนสถานะ P_t กับตัวเลขสุ่ม x ที่ถูกกำหนดให้มีค่าระหว่าง $0 < x < 1$ ถ้าค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะมีค่ามากกว่าตัวเลขสุ่ม $P_t > x$ แมกนีไทเซชันจะสามารถกลับทิศทางได้ แต่ถ้า $P_t < x$ แมกนีไทเซชันในระบบจะไม่สามารถผันกลับทิศทางได้ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันอีกครั้งจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดและวิธีการคำนวณในลักษณะนี้จะดำเนินไปจนกว่าเกรนแม่เหล็ก AF ทุกเกรนภายในระบบสามารถผันกลับทิศทางได้อย่างสมบูรณ์ โดยผลรวมของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF จะมีค่าเท่ากับผลเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็ก AF ทุกเกรนภายในระบบ

4.3.3 การคำนวณพลวัตของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโดยอาศัยสมการ LLG

ในแบบจำลองที่ได้นำเสนอขึ้นนี้ได้เลือกใช้วิธีการจำลองโครงสร้างแม่เหล็กระดับจุลภาคแบบมาตรฐานในการคำนวณพลวัตของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกด้วยสมการ LLG ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดและวิธีการประยุกต์ใช้สมการ LLG และเทคนิควิธีการเชิงตัวเลข (numerical technique) ในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field) ที่เป็นผลรวมของสนามแม่เหล็กประเภทต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ สนามแอนไอโซโทรปี สนามแลกเปลี่ยน สนามสนามแม่เหล็กหักล้าง สนามแม่เหล็กภายนอก และสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ เป็นต้น และในลำดับสุดท้ายจะได้อธิบายถึงเทคนิควิธีการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการ LLG ในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้น FM ตามลำดับ

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นอ้างอิงสัญญาณในหัวอ่านข้อมูลจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวน่าได้ง่าย ยกตัวอย่างเช่น โคบอลต์ไอรอนและนิกเกิลไอรอน เป็นต้น วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้จะมีระยะเวลาในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่ค่อนข้างเร็วในช่วงเฟมโตวินาที (10^{-15} s) ถึงพิโควินาที (10^{-12} s) [138] และเหมาะแก่การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันโดยการประยุกต์ใช้สมการ LLG ซึ่งเป็นสมการที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาใดๆ เนื่องจากแรงบิดหรือทอร์กที่สนามแม่เหล็กประสิทธิผลกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชัน โดยสมการ LLG มีรูปแบบสมการดังนี้

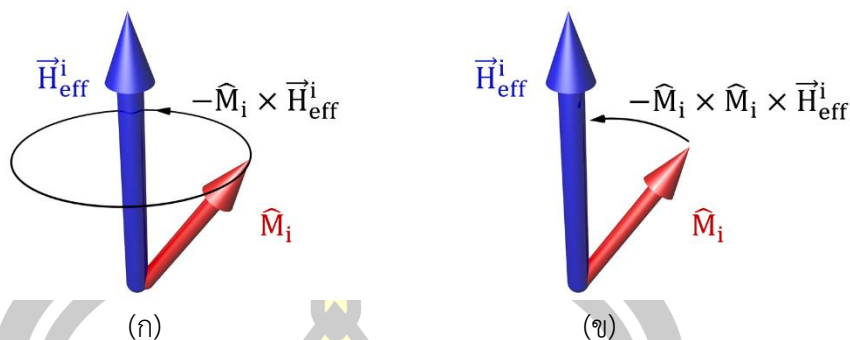
$$\frac{\partial \vec{M}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \vec{M}_i \times \vec{H}_{\text{eff}}^i - \frac{\gamma\alpha}{(1 + \alpha^2)} [\vec{M}_i \times (\vec{M}_i \times \vec{H}_{\text{eff}}^i)] \quad (4.26)$$

เมื่อ γ คือ ค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (absolute gyromagnetic ratio) ซึ่งเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1.7608596×10^7 ต่อวินาทีเออร์สเทด ($\text{s}^{-1}\text{Oe}^{-1}$)

α คือ ค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant)

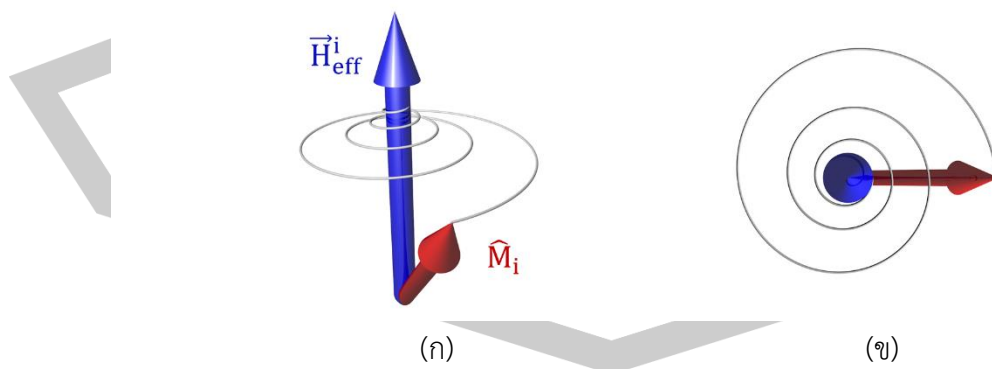
\vec{M}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i ในชั้น FM

\vec{H}_{eff}^i คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในระบบ



ภาพประกอบ 4.17 แนวโน้มการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็ก (ก) แบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและ (ข) แบบหน่วงเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล [95]

สมการ (4.26) แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเวลาซึ่งประกอบด้วยสองเทอม โดยเทอมแรกอธิบายการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวน (precessional motion) รอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลแสดงดังภาพประกอบ 4.17(ก) เมื่อลูกศรสีน้ำเงินแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล \vec{H}_{eff}^i และลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันที่พิจารณา \vec{M}_i และเทอมที่สองอธิบายการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหน่วง (damping motion) เข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล เนื่องจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผลออกแรงบิดหรือทอร์กกระทำต่อแมกนีไทเซชันส่งผลทำให้เกิดแนวโน้มการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันตามทิศของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลแสดงดังภาพประกอบ 4.17(ข) โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแรงของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและค่าคงที่การหน่วง α ซึ่งเป็นคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะมีลักษณะเป็นแบบก้นหอยแสดงดังภาพประกอบ 4.18(ก) และ (ข)



ภาพประกอบ 4.18 แนวโน้มการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กแบบหมุนวนเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (ก) ภาพด้านข้างและ (ข) ภาพด้านบน [95]

ปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสามารถพิจารณาได้จากพลังงานรวมในระบบวัสดุซึ่งอธิบายโดยอาศัยรูปแบบสมการพลังงานแอมิลโทเนียนของไฮน์เซนเบิร์ก พลังงานรวมภายในวัสดุแม่เหล็ก \mathcal{H} จะประกอบด้วยสามส่วนสำคัญได้แก่ พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy, $\mathcal{H}_{\text{anis}}$) พลังงานแลกเปลี่ยน (exchange energy, $\mathcal{H}_{\text{exch}}$) และพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก (demagnetizing หรือ dipolar energy, \mathcal{H}_{dip}) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_{\text{anis}} + \mathcal{H}_{\text{exch}} + \mathcal{H}_{\text{dip}} \quad (4.27)$$

การคำนวณปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในระบบวัสดุแม่เหล็กสามารถทำได้โดยพิจารณาส่วนต่างของค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ \mathcal{H} ในสมการ (4.27) เทียบกับปริมาณโมเมนต์แม่เหล็กในชั้น FM $\vec{\mu}_{\text{FM}}$ ทำให้สามารถเขียนค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็กซึ่งเป็นผลรวมของค่าสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field, \vec{H}_{anis}^i) ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก (exchange field between grains, $\vec{H}_{\text{exch}}^{ij}$) และค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing หรือ dipolar field, \vec{H}_{dip}^i) ได้ดังสมการ

$$-\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{\mu}_{\text{FM}}} = \vec{H}_{\text{anis}}^i + \vec{H}_{\text{exch}}^{ij} + \vec{H}_{\text{dip}}^i \quad (4.28)$$

โดยที่ $\vec{\mu}_{\text{FM}} = M_S V_{\text{FM}} \hat{m}_{\text{FM}}$ เมื่อ

- M_S คือ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก
- \hat{m}_{FM} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันในชั้น FM
- V_{FM} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนในชั้น FM แทนด้วย $V_{\text{FM}} = a_{\text{FM}} t_{\text{FM}}$
- a_{FM} คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็ก FM
- t_{FM} คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม FM

อย่างไรก็ตามการพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กรวมในชั้น FM ที่เชื่อมติดกับชั้น AF จำเป็นจะต้องคิดผลของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (interlayer exchange field on FM layer, $\vec{H}_{\text{exch}}^{\text{FM-AF}}$) ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก (applied field, \vec{H}_{app}) และค่าสนามความร้อน (thermal field, \vec{H}_{th}^i) ร่วมด้วย ทำให้สามารถเขียนค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำกับชั้น FM ในขณะที่เชื่อมติดกับชั้น AF ได้ดังนี้

$$\vec{H}_{\text{eff}}^i = \vec{H}_{\text{anis}}^i + \vec{H}_{\text{exch}}^{ij} + \vec{H}_{\text{dip}}^i + \vec{H}_{\text{exch}}^{i,\text{FM-AF}} + \vec{H}_{\text{app}}^i + \vec{H}_{\text{th}}^i \quad (4.29)$$

สำหรับค่าสนามแอนไอโซโทรปี \bar{H}_{anis} ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันและเป็นตัวกำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติภายในวัสดุแม่เหล็กดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดแล้วในหัวข้อ 2.3.1 สามารถพิจารณาเพื่อใช้ในแบบจำลองแกรนูลาร์ได้ดังนี้

$$\bar{H}_{anis}^i = \frac{2K(T)}{M(T)} (\hat{m}_i \cdot \hat{e}) \hat{e} \quad (4.30)$$

เมื่อ $K(T)$ คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งถูกพิจารณาจากทฤษฎีของคัลเลน-คัลเลน [66] เช่นเดียวกันกับกรณีของแผ่นบันทึกข้อมูลดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.3

\hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน

\hat{m}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ที่ถูกพิจารณา

การพิจารณาค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก \bar{H}_{exch}^{ij} ซึ่งแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกันจะถูกนำมาจากค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแรงของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ติดกัน f_{ij} ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย โดยการคำนวณค่าสนามแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นกับเกรนแม่เหล็กที่ถูกพิจารณา i เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนกับเกรนแม่เหล็กข้างเคียง j ทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{H}_{exch}^{ij} = H_{exch} \sum_{i \neq j}^{nn} f_{ij} \hat{m}_j^{FM} \quad (4.31)$$

โดยที่ $H_{exch} = J_m L_m / t^2 M_s A_m$ และ $f_{ij} = \left(\frac{J_{ij}}{J_m} \right) \left(\frac{L_{ij}}{L_m} \right) \left(\frac{A_m}{A_i} \right)$ [110] เมื่อ

f_{ij} คือ ความแรงของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็ก FM ที่อยู่ข้างเคียงกัน

\hat{m}_j^{FM} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของเกรนแม่เหล็กข้างเคียง j ในชั้น FM

t คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม FM

J_{ij} คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (exchange constant between grains)

J_m คือ ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (median exchange constant)

L_{ij} คือ ระยะความยาวที่เชื่อมติดกันระหว่างเกรน (contact length between grains)

L_m คือ ค่าเฉลี่ยของระยะความยาวที่เชื่อมติดกัน (median contact length)

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของเกรนอ้างอิง i (crosssectional area of grain i)

A_m คือ ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดของเกรนในระบบ (median crosssectional area)

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุประเภทสุดท้ายคือ ค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง \bar{H}_{dip}^i ซึ่งเป็นการพิจารณาการลดทอนสภาพความแม่เหล็กภายในตัววัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้ทำ

การพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กหักล้างโดยแบ่งเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i และเกรนแม่เหล็กข้างเคียง j ออกเป็นเซลล์ลูกบาศก์จำนวน N เซลล์เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กหักล้างที่เกิดขึ้นกับเซลล์ลูกบาศก์แต่ละเซลล์ในเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา $\vec{H}_{\text{dip}}^{i\text{-cube}}$ แสดงดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{dip}}^{i\text{-cube}} = M_S V \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{m}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij} - \hat{m}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \quad (4.32)$$

- เมื่อ M_S คือ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของวัสดุ
 V คือ ปริมาตรของเซลล์หรือเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา
 \hat{m}_j คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งแสดงทิศทางของเกรนข้างเคียง
 \hat{r}_{ij} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางระหว่างเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j ซึ่ง
 มีค่าเท่ากับ $\hat{r}_{ij} = \vec{r}_{ij}/|\vec{r}_{ij}|$
 \vec{r}_{ij} คือ เวกเตอร์ระหว่างเกรนอ้างอิง i และเกรนข้างเคียง j
 $|\vec{r}_{ij}|$ คือ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{r}_{ij}

ดังนั้นค่าสนามแม่เหล็กหักล้างที่เกิดขึ้นภายในเกรนแม่เหล็กที่ถูกพิจารณา i สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{dip}}^i = \frac{1}{N} \sum_{i\text{-cube}} \vec{H}_{\text{dip}}^{i\text{-cube}} \quad (4.33)$$

การคำนวณค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่เกิดขึ้นในชั้น FM เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF ออกแรงกระทำต่อชั้น FM เพื่อนำมาใช้สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในแบบจำลองนี้สามารถทำได้โดยพิจารณาค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันของวัสดุทั้งสองชั้นในสมการ (4.18) หรือ

$$E_{\text{exch}} = J_S a c \hat{m}_{\text{FM}} \cdot \hat{m}_{\text{AF}} \quad (4.34)$$

- เมื่อ J_S คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อ (interfacial exchange constant)
 a คือ พื้นที่ของเกรน (grain area)
 c คือ อัตราส่วนของการเชื่อมติดกันระหว่างเกรน (contact fraction)
 \hat{m}_{FM} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM
 \hat{m}_{AF} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF

สำหรับค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM (interlayer exchange field on FM layer, $\vec{H}_{\text{exch}}^{\text{FM-AF}}$) สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ E_{exch} ในสมการ (4.34) เทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก \vec{m}_{FM} ทำให้สามารถเขียนค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ $\vec{H}_{\text{exch}}^{\text{FM-AF}}$ ได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{exch}}^{\text{FM-AF}} = H_{\text{ex}}^{\text{int}} \frac{A_{\text{FM}}}{A_{\text{avg}}} \hat{m}_{\text{AF}} \quad (4.35)$$

โดยที่ค่าความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field, $H_{\text{ex}}^{\text{int}}$) ที่ชั้น AF กระทำต่อชั้น FM มีค่าเป็น $H_{\text{ex}}^{\text{int}} = J_{\text{sc}}/M_{\text{st}}$ เมื่อ

- A_{FM} คือ พื้นที่ของเกรนแม่เหล็กในชั้น FM ที่ถูกพิจารณา
- A_{avg} คือ พื้นที่ของเกรนเฉลี่ยภายในระบบ
- \hat{m}_{AF} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ที่ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM

สำหรับปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H}_{app} ที่ส่งผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กสามารถนิยามได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{app}} = H \hat{e}_y \quad (4.36)$$

- เมื่อ \hat{e}_y คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่ชั้น FM
- H คือ ขนาดของสนามแม่เหล็กที่ถูกป้อนเข้าสู่ชั้น FM เพื่อใช้สำหรับการคำนวณลูปวงปิด-ฮิสเทอรีซิส

สนามแม่เหล็กภายนอกประเภทสุดท้ายคือสนามความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิภายนอกซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการบวกรวมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM แต่เนื่องจากแบบจำลองนี้มีลักษณะเป็นแบบจำลองในระดับจุลภาคซึ่งจะพิจารณาผลของอุณหภูมิผ่านทางตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแทนการคำนวณด้วยสนามความร้อนโดยตรง อย่างเช่นปริมาณสนามแม่เหล็กชนิดอื่นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น โดยค่าสนามความร้อนจะถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของค่าสนามความร้อนแบบสุ่ม (random thermal field) ในลักษณะของฟังก์ชันการกระจายตัวของเกาส์เซียน (Gaussian distribution) แสดงดังสมการ

$$\vec{H}_{th} = \vec{\Gamma}(t) \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma M_S V_{FM} \Delta t}} \quad (4.37)$$

เมื่อ $\vec{\Gamma}(t)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของเกาส์เซียนแบบสุ่ม

α คือ ค่าคงที่ของการหน่วง

$k_B T$ คือ ค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยของระบบ

γ คือ ค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก

V_{FM} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก FM

Δt คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ถูกพิจารณาในสมการ LLG

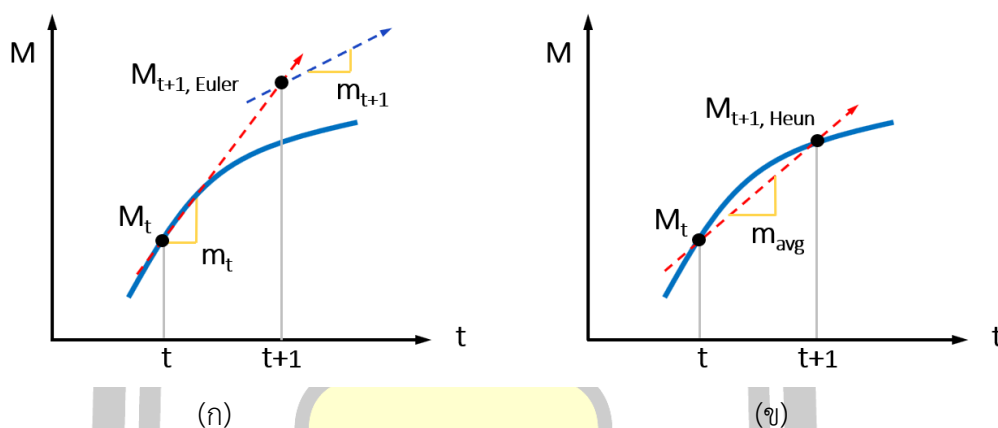
ดังนั้นค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณสนามแม่เหล็กภายในและภายนอกโครงสร้างวัสดุจากสมการ (4.29) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{H}_{eff}^i = & \frac{2K(T)}{M(T)} (\hat{m}_{FM} \cdot \hat{e}) \hat{e} + H_{exch} \sum_{i \neq j}^{nn} f_{ij} \hat{m}_j^{FM} + \frac{1}{N} \sum_{i-cube}^N \vec{H}_{dip}^{i-cube} \\ & + H_{ex}^{int} \frac{A_{FM}}{A_{avg}} \hat{m}_{AF} + H \hat{e}_y + \vec{\Gamma}(t) \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma M_S V_{FM} \Delta t}} \end{aligned} \quad (4.38)$$

ปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.38) จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM โดยอาศัยสมการ LLG ร่วมกับการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเพื่อจำลองการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM จะอาศัยเทคนิคการคำนวณข้อมูลเชิงตัวเลขเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณข้อมูลซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับต่อไป

สำหรับเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบสุ่มเนื่องจากอิทธิพลของ สนามความร้อนสุ่ม (random thermal field) ที่เกิดขึ้นภายในระบบ วิธีการของออยเลอร์ (Euler's method หรือ Euler integration) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ถูกนำมาประยุกต์ ใช้สำหรับการพิจารณา การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันหรือค่าอนุพันธ์ของแมกนีไทเซชันจากค่าคงที่เพียงค่าเดียวในทุก ช่วงเวลาแสดงดังภาพประกอบ 4.19(ก) โดยจะเห็นได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีการของออยเลอร์จะไม่สามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้อง ในภายหลังได้มีการพัฒนาเทคนิคการ คำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกเรียกว่า วิธีการแบบฮอยน์สกี (Heun scheme) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณ

ข้อมูลเชิงตัวเลข (numerical method) รูปแบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากวิธีการของออยล์เลอร์ โดยเทคนิคการคำนวณแบบฮอยน์สกีมีจะเริ่มจากการทำนายตำแหน่งเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันจากวิธีการของออยล์เลอร์ จากนั้นทำการพิจารณาหาตำแหน่งใหม่ของแมกนีไทเซชันโดยทำการคำนวณค่าความชันเฉลี่ยทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของเส้นโค้งที่สัมผัสกับเส้นตรงในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่งใหม่ของแมกนีไทเซชันที่มีความแม่นยำได้มากที่สุดแสดงดังภาพประกอบ 4.19(ข) การพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันด้วยเทคนิคฮอยน์สกีมีให้ผลที่แม่นยำกว่าการพิจารณาแบบออยล์เลอร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเอาเทคนิคฮอยน์สกีมีมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ด้วยสมการ LLG



ภาพประกอบ 4.19 เทคนิคการคำนวณข้อมูลเชิงตัวเลขแบบ (ก) ออยเลอร์ (predictor) และ (ข) ฮอยน์สกีมี (corrector) [95]

การประมาณค่าทิศทางใหม่ของแมกนีไทเซชันในช่วงเวลาถัดไปสามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคฮอยน์สกีมีที่เริ่มต้นจากวิธีการประมาณแบบออยล์เลอร์ซึ่งในขั้นตอนนี้ถูกเรียกว่าวิธีการเดาสุ่มทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชัน (predictor algorithm) ในภาพประกอบ 4.19(ก) แสดงดังสมการ

$$\hat{M}_{t+1,E} = \hat{M}_t + \Delta t \hat{M}'_t \quad (4.39)$$

โดยที่ $\Delta t = (t + 1) - t$ และค่าอนุพันธ์ของแมกนีไทเซชันที่เวลา t มีค่าดังสมการ

$$\hat{M}'_t = \frac{\partial \hat{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} [\hat{M}_t \times \vec{H}_{\text{eff}} + \alpha \hat{M}_t \times (\hat{M}_t \times \vec{H}_{\text{eff}})] \quad (4.40)$$

เมื่อได้แมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งใหม่ $\hat{M}_{t+1,E}$ จากนั้นสามารถพิจารณาค่าความชันหรือค่าอนุพันธ์ของแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งใหม่ได้ดังนี้

$$\hat{M}'_{t+1,E} = \frac{\partial \hat{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} [\hat{M}_{t+1,E} \times \bar{H}_{\text{eff}}^{\text{new}} + \alpha \hat{M}_{t+1,E} \times (\hat{M}_{t+1,E} \times \bar{H}_{\text{eff}}^{\text{new}})] \quad (4.41)$$

เมื่อ $\bar{H}_{\text{eff}}^{\text{new}}$ คือค่าสนามประสิทธิผลใหม่ที่คำนวณได้จากทิศทางใหม่ของแมกนีไทเซชัน จากนั้นทำการพิจารณาค่าอนุพันธ์เฉลี่ยของแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่ง \hat{M}_t และ $\hat{M}_{t+1,E}$ เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งใหม่ของแมกนีไทเซชันได้ดังนี้

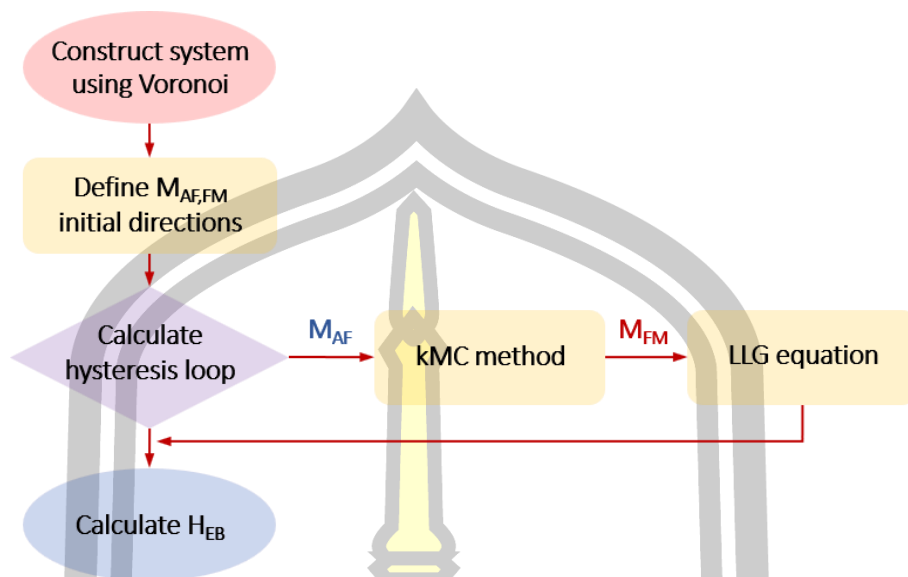
$$\hat{M}'_{\text{avg}} = \frac{1}{2} [\hat{M}'_t + \hat{M}'_{t+1,E}] \quad (4.42)$$

ในขั้นตอนสุดท้ายสำหรับเทคนิคฮอยน์สกีมถูกเรียกว่าวิธีการตรวจสอบ (corrector algorithm) ในขั้นตอนนี้จะสามารถคำนวณตำแหน่งใหม่ของแมกนีไทเซชันได้อย่างถูกต้องแสดงดังภาพประกอบ 4.19(ข) ดังนั้นตำแหน่งใหม่ของแมกนีไทเซชันจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\hat{M}_{t+1,H} = \hat{M}_t + \frac{\Delta t}{2} [\hat{M}'_t + \hat{M}'_{t+1,E}] \quad (4.43)$$

การคำนวณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันตามการวิวัฒนาการของเวลาของแมกนีไทเซชัน โดยการประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบฮอยน์สกีมโดยเริ่มจากสมการ (4.39) – (4.43) จะทำให้ได้ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบสุ่มของชั้น FM เนื่องจากอิทธิพลของสนามความร้อนได้อย่างแม่นยำและมีความถูกต้อง

อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้ได้อาศัยวิธีการที่แตกต่างกันในการอธิบายคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภท ทำให้มีความจำเป็นต้องพิจารณาความเชื่อมโยงของระยะเวลาในการคำนวณ (timescale) ระหว่างสองวิธีการ เพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันได้อย่างถูกต้อง เมื่อช่วงเวลาในการคำนวณ (time step) ซึ่งถูกใช้ในการคำนวณความมีเสถียรภาพทางความร้อนของแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีค่าเท่ากับ 10^{-8} s ในขณะที่ช่วงเวลาในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM มีค่าเท่ากับ 10^{-13} s [138] ดังนั้นการเชื่อมโยงช่วงเวลาในการคำนวณระหว่างสองวิธีการสามารถทำได้โดยพิจารณาให้ทิศทางแมกนีไทเซชันในชั้น FM ซึ่งถูกคำนวณด้วยสมการ LLG อยู่ในสถานะสมดุลสำหรับทุกช่วงเวลาในการคำนวณ ภายหลังจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสถานะของพลังงานในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โล ด้วยเทคนิคดังกล่าวจะทำให้สามารถพิจารณาความเชื่อมโยงกันของระยะเวลาในการคำนวณระหว่างสองวิธีการเพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้



ภาพประกอบ 4.20 แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปลำดับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้ดังแผนภาพในภาพประกอบ 4.20 โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุทั้งสองชั้นด้วยโปรแกรมโวโรนอย จากนั้นทำการกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้น AF และชั้น FM เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นด้วยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการ LLG ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้ ในลำดับสุดท้ายทำการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} จากอัตราการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตร เพื่อนำไปใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยภายในของวัสดุแม่เหล็กและปัจจัยทางโครงสร้างของชั้น AF และชั้น FM ที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.3.4 ผลการศึกษา

แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยและผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยพลวัตของแมกนีไทเซชันและลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะถูก

อธิบายผ่านรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส การคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias field, H_{EB}) และการคำนวณค่าเคอเออร์ซิวิตี (coercivity, H_c) เป็นต้น

ในการศึกษานี้จะได้เลือกใช้วัสดุอิริเดียมแมงกานีส (IrMn) และวัสดุโคบอลต์ไอรอน (CoFe) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ AF และวัสดุ FM ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุทั้งสองประเภทถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเป็นชั้นอ้างอิงภายในหัวอ่านข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน [132] โดยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กพื้นฐานของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ได้แก่ ค่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_C) ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_S) และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_U) รวมไปถึงปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field strength, H_{ex}^{int}) เป็นต้น ที่ถูกใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านนี้ถูกระบุดังตาราง 4.1 สำหรับปริมาณ H_{ex}^{int} จะมีลักษณะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ $H_{ex}^{int} = 250$ Oe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเบื้องต้น จากการศึกษาพบว่าผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองวัดค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้าง IrMn/CoFe [139]

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

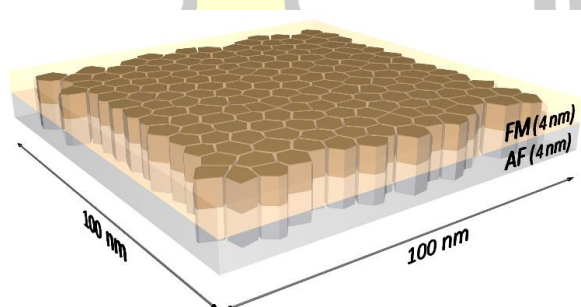
| พารามิเตอร์ | ชนิดของวัสดุ | |
|---|------------------------------|-------------------------|
| | IrMn | CoFe |
| ค่าอุณหภูมิวิกฤต T_C (K) | 690 [133] | 1300 [140] |
| ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี K_U (erg/cm ³) | 3×10^6 [133], [141] | 1.8×10^5 [140] |
| ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว M_S (emu/cm ³) | 1800 | 1800 [140] |
| ความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} (Oe) | 250 [139] | 250 [139] |

ตัวอย่างระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นแบบสามมิติที่ถูกจำลองขึ้นด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ในตาราง 4.2 ถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.21 จากภาพจะเห็นได้ว่าระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ถูกจำลองขึ้นจะมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนและมีการจัดเรียงตัวของเกรนแม่เหล็กแต่ละชั้นอยู่ในตำแหน่งตรงกัน ลักษณะแท่งเกรน โดยโครงสร้างนี้จะถูกนำมา

ประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทและลักษณะของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในลำดับต่อไป

ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

| พารามิเตอร์ | ชั้นวัสดุ | |
|--|-----------|-----------|
| | IrMn | CoFe |
| ความกว้างของระบบในแนวแกน x (nm) | 100 | 100 |
| ความยาวของระบบในแนวแกน y (nm) | 100 | 100 |
| ค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก D_m (nm) | 8 | 8 |
| ค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรน σ_{InD} | 0.2 [141] | 0.2 [141] |
| ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (nm) | 0.1 | 0.1 |
| ความหนาของชั้นฟิล์ม t_{film} (nm) | 4 | 4 |



ภาพประกอบ 4.21 โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ CoFe (ชั้นบน) และชั้นวัสดุ IrMn (ชั้นล่าง) ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยใช้โปรแกรมไวโรนอย

แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลของเสถียรภาพทางความร้อนของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่พิจารณาการกระจายตัวของทิศแกนง่ายและผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กร่วมด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างทางกายภาพที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น ได้แก่ ความหนาของชั้นฟิล์ม AF ความหนาของชั้นฟิล์ม FM ขนาดของเกรนแม่เหล็ก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF เป็นต้น ในการศึกษาเบื้องต้นนี้จะเริ่มจากการพิจารณาระบบที่ไม่คิดผล

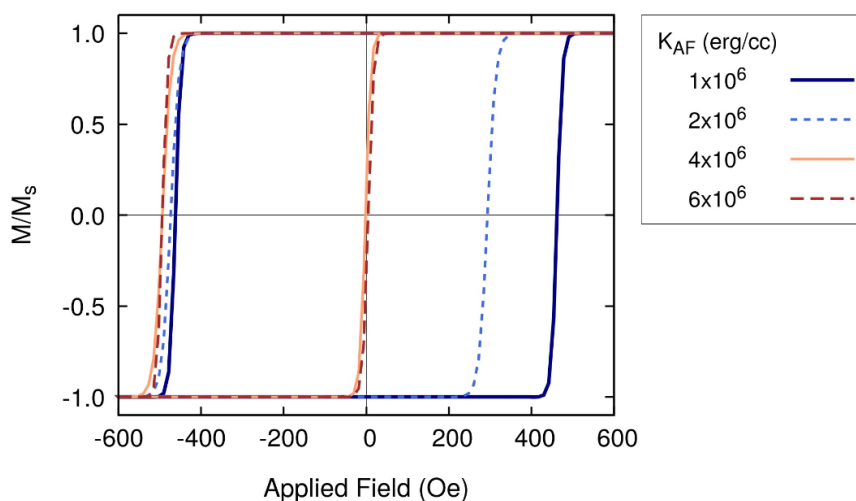
การกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวันดูแอนติเฟอร์โรแมกเนติก $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ ช่วงอุณหภูมิห้อง โดยพบว่าผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของเฟอร์นานเดซ และคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [101] อย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจะได้ศึกษาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายและผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน โดยผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายนั้นจะมีรูปแบบการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนซึ่งสามารถควบคุมทิศการกระจายตัวของทิศแกนง่ายได้ด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_{ϕ}

4.3.4.1 ผลกระทบของปัจจัยภายในและการออกแบบโครงสร้าง

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นของวัสดุ AF และ FM คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก K_{AF} ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพทางความร้อนของอุปกรณ์ที่มีการนำเอาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น เซ็นเซอร์หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และหน่วยความเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก เป็นต้น [26], [32], [36], [142] ดังนั้นในลำดับแรกจะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของค่า K_{AF} ที่ส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านการคำนวณปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ซึ่งถูกนิยามด้วย $H_{EB} = (H_C^- - H_C^+)/2$ [18] และปริมาณเคอเออร์ซีวิตี H_C ซึ่งถูกนิยามด้วย $H_C = (H_C^- + H_C^+)/2$ [18] เมื่อ H_C^+ และ H_C^- คือปริมาณ H_C ทางด้านซ้ายและด้านขวาของลูปปิดฮิสเทอรีซิสที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรตามลำดับ

ผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเมื่อกำหนดให้ K_{AF} มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1×10^6 erg/cm³ ถึง 6×10^6 erg/cm³ และค่าความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีค่าคงที่เท่ากับ $H_{ex}^{int} = 250$ Oe ถูกแสดงดังภาพประกอบ 4.22 โดยในกรณีที่ $K_{AF} = 1 \times 10^6$ erg/cm³ พบว่าจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสหรือปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน อย่างไรก็ตามปริมาณ H_C จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF มีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก $\Delta E_{AF} = K_{AF} V_{AF}$ ไม่เพียงพอสำหรับการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM แต่แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF กลับถูกเหนี่ยวนำด้วยปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกและแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM ส่งผลทำให้ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่คำนวณได้มีความสมมาตรและมีค่า H_C ที่สูงที่สุด แต่เมื่อ K_{AF} มีค่าเพิ่มมากขึ้นพบว่าค่า H_C มีแนวโน้มลดลงและเกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรไปทางด้านซ้าย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า K_{AF} ทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ต่อต้านการกลับทิศทางตามทิศของ

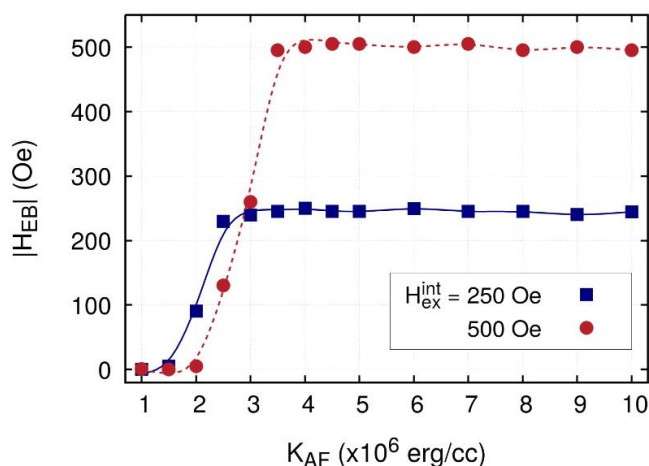
สนามแม่เหล็กภายนอกนำไปสู่การเกิดพลังงานแอนโซโทรปีแบบแกนเดียวซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในภาพประกอบ 4.22 จะมีลักษณะคล้ายรูปทรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก (no pinning sites)



ภาพประกอบ 4.22 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe เปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า K_{AF} [139]

ในลำดับต่อมาได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนสำหรับการพิจารณาค่า K_{AF} ที่ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe โดยการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนจากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในภาพประกอบ 4.22 โดยอาศัยความสัมพันธ์ $H_{EB} = (H_C^+ + H_C^-)/2$ เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{AF} ในแนวแกน x และขนาดของค่า H_{EB} ในแนวแกน y โดยเปรียบเทียบกันกรณีที่มีความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 250 Oe และ 500 Oe แสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีแดงตามลำดับในภาพประกอบ 4.23 พบว่าผลการคำนวณขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน $|H_{EB}|$ ทั้งสองกรณีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า K_{AF} โดยที่ $|H_{EB}|$ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดในลักษณะเส้นโค้งแบบเชิงเส้น (asymptotic curve) โดยการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเริ่มขึ้นเมื่อ K_{AF} มีค่าเท่ากับ 1.5×10^6 erg/cm³ และ 2.0×10^6 erg/cm³ สำหรับระบบที่ H_{ex}^{int} มีค่าเท่ากับ 250 Oe และ 500 Oe ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าค่า K_{AF} ที่ทำให้ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe แสดงพฤติกรรมของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะมีค่าประมาณ 3×10^6 erg/cm³ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองวัดค่า K_{AF} สำหรับโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe [141] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้กำหนดค่า K_{AF} ให้มีค่า

เท่ากับ 3×10^6 erg/cm³ เพื่อใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนซึ่งจะถูกกล่าวถึงในลำดับถัดไป



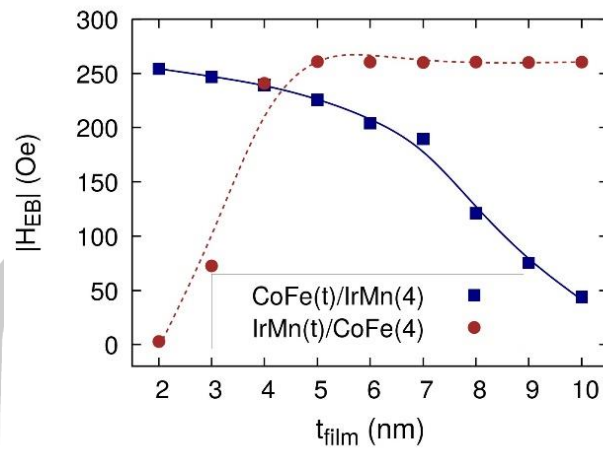
ภาพประกอบ 4.23 การเปลี่ยนแปลงขนาดของค่า $|H_{EB}|$ ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของค่า K_{AF} เปรียบเทียบกันในกรณีที่ $H_{ex}^{int} = 250$ Oe และ 500 Oe [139]

โดยทั่วไปแล้วผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของชั้น AF และชั้น FM ยกตัวอย่างเช่น ขนาดของเกรนแม่เหล็ก [135] และความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็ก [143] เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของวัสดุโดยตรง เพื่อศึกษาผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ในลำดับต่อมาได้ทำการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ในระบบที่ไม่พิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ การศึกษานี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กและผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนแม่เหล็ก โดยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กและค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ถูกอธิบายถึงรายละเอียดไว้ในตาราง 4.1 และตาราง 4.2 ตามลำดับ

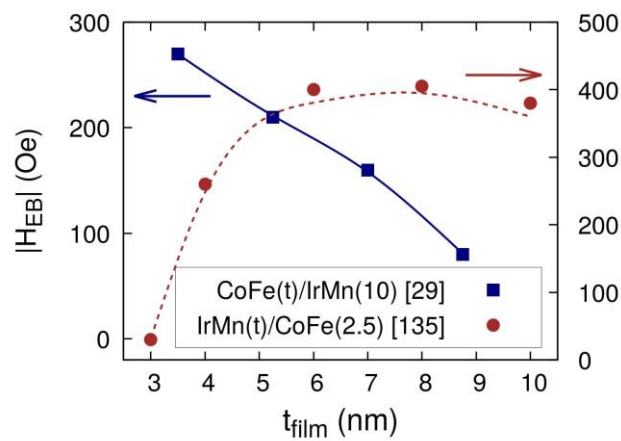
ผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็ก (film thickness, t_{film}) แต่ละชั้นต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ จะถูกศึกษาในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นฟิล์ม FM เมื่อกำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าคงที่เท่ากับ 4 nm หรือ IrMn(4nm)/CoFe(t_{film}) และระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF เมื่อกำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์ม FM มีค่าคงที่เท่ากับ 4 nm หรือ IrMn(t_{film})/CoFe(4nm) โดยที่ t_{film} มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2 nm ถึง 10 nm นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าคงที่เท่ากับ 8 nm ใน

ทุกกรณีศึกษา ภาพประกอบ 4.24(ก) แสดงผลการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นฟิล์มทั้งสองประเภท โดยในกรณีของชั้นฟิล์ม AF พบว่าค่า $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาของชั้นฟิล์ม AF และลู่อู่เข้าสู่ค่าสูงสุดเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่ามากกว่า 5 nm แต่ในระบบที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าต่ำกว่า 2 nm พบว่าเกรนแม่เหล็กในชั้น AF จะขาดเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกซึ่งแมกนีไทเซชันในชั้น AF ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้และทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัส-แลกเปลี่ยนในกรณีที่ชั้นฟิล์ม AF มีค่าความหนาน้อยกว่า 2 – 3 nm [25], [34] ในทางตรงกันข้ามพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม FM ส่งผลทำให้ค่า $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มลดลง โดยในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม FM มีค่ามากกว่า 5 nm พบว่าค่า $|H_{EB}|$ จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่แปรผกผันกับความหนาของชั้นฟิล์มแสดงถึงความสัมพันธ์ $|H_{EB}| \propto 1/M_{FM}t_{FM}$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [18]

จากการศึกษาผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม FM และชั้นฟิล์ม AF ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า $|H_{EB}|$ พบว่าให้ผลการคำนวณที่มีความสอดคล้องการผลการทดลอง โดยสามารถทำการเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า $|H_{EB}|$ ระหว่างผลการคำนวณในภาพประกอบ 4.24(ก) และผลการทดลองจากอ้างอิงที่ [135] และ [29] ในภาพประกอบ 4.24(ข) ได้เฟอร์นันเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [135] ได้ทำการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน Si/Cu(10 nm)/CoFe(2.5 nm)/IrMn(t_{film})/Ta(10 nm) ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 3 nm ถึง 12 nm ณ อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าค่า $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยปริมาณ $|H_{EB}|$ จะมีค่าสูงสุดในกรณีที่ $t_{film} = 8$ nm และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อ $t_{film} > 8$ nm แสดงดังเส้นกราฟสีแดงในภาพประกอบ 4.23(ข) ในขณะที่ลีและคณะ (J. Lee *et al.*) [29] ได้ทำการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน Ta/AlO_x/CoFe(t_{film})/IrMn(10nm)/NiFe/Ta ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม FM มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 3.5 nm ถึง 8.75 nm โดยพบว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ จะมีค่าแปรผกผันกับความหนาของชั้นฟิล์ม FM จากผลการทดลองของลีและคณะสามารถยืนยันได้ว่าผลการทำนายค่า $|H_{EB}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นฟิล์ม FM โดยใช้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและให้แนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลองแสดงดังเส้นกราฟสีแดงในภาพประกอบ 4.22(ก) และ (ข) ได้เป็นอย่างดี



(ก)

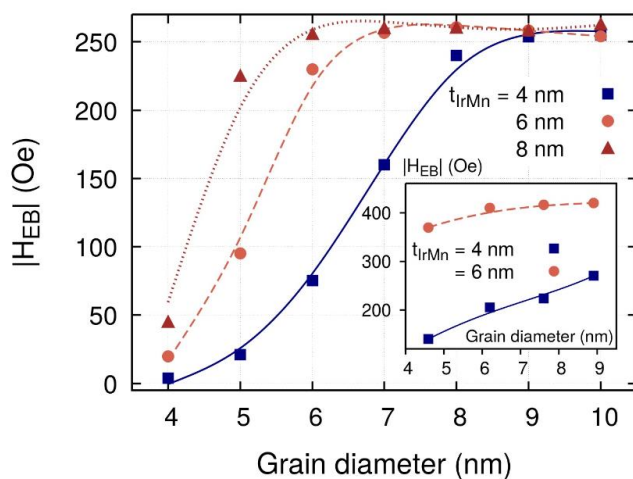


(ข)

ภาพประกอบ 4.24 (ก) ผลการคำนวณค่า $|H_{\text{EB}}|$ ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาชั้นฟิล์ม FM และความหนาของชั้นฟิล์ม AF [139] และ (ข) ผลการทดลองวัดค่า $|H_{\text{EB}}|$ ในลักษณะฟังก์ชันของความหนาชั้นฟิล์ม FM [29] และความหนาของชั้นฟิล์ม AF [135] แสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการศึกษาผลของขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า $|H_{\text{EB}}|$ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน สำหรับผลการคำนวณค่า $|H_{\text{EB}}|$ ในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก (median grain diameter, D_m) ในช่วง 4 nm ถึง 10 nm ในกรณีที่กำหนดให้ระบบมีค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF แตกต่างกันเท่ากับ $t_{\text{IrMn}} = 4, 6$ และ 8 nm ในขณะที่ความหนาของชั้นฟิล์ม FM ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 4 nm แสดงดังภาพประกอบ 4.25 การศึกษาผลกระทบของขนาดของเกรนแม่เหล็กนี้สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดค่า $|H_{\text{EB}}|$ ของชั้น

ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบไฮดรัสสปีดเตอริง (HiTUS sputtering system) ได้ [25] โดยพบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก D_m ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกัน [135] แสดงดังภาพด้านในภาพประกอบ 4.25



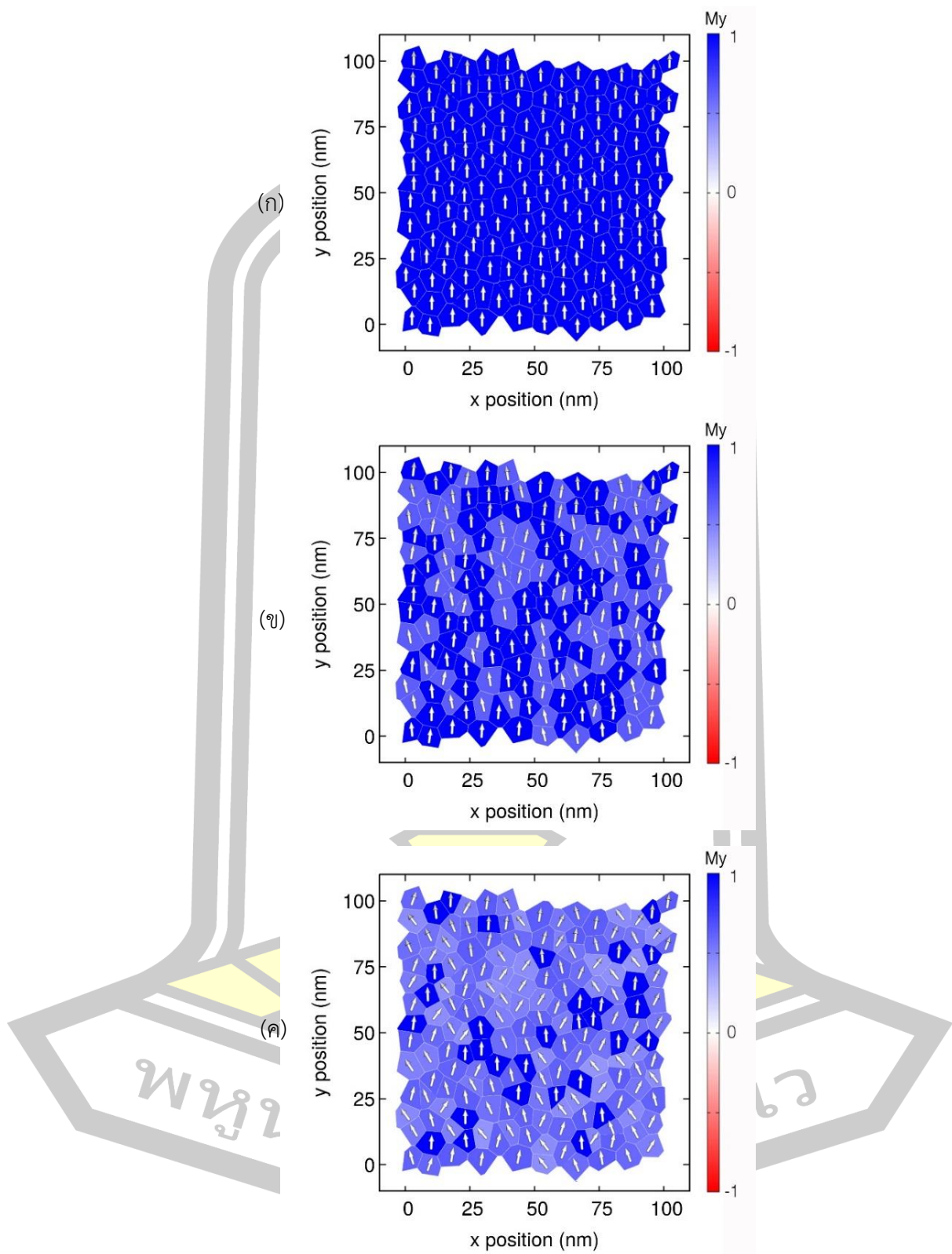
ภาพประกอบ 4.25 ผลการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $t_{IrMn} = 4$ 6 และ 8 nm [139] และภาพด้านในแสดงผลการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $t_{IrMn} = 4$ และ 6 nm [135]

สำหรับระบบที่เกรนแม่เหล็กมีขนาดเล็กเท่ากับ $D_m = 4$ nm และความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเท่ากับ 4 nm จะไม่สามารถคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ได้เนื่องจากไม่เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีศึกษา นี้ แต่ในระบบที่เกรนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าสูงขึ้นพบว่าค่า $|H_{EB}|$ จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงมากขึ้นและค่อนข้างคงที่เมื่อเกรนในระบบมีขนาดใหญ่ $D_m > 6$ nm จากผลการคำนวณพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า $|H_{EB}|$ ที่เป็นฟังก์ชันของขนาดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากการเพิ่มขนาดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์ม AF เป็นการเพิ่มค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ที่เป็นตัวกำหนดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนสำหรับการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM

4.3.4.2 ผลกระทบของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้น AF

ในระหว่างกระบวนการปลูกฟิล์มบางของชั้น AF ที่เชื่อมติดกับชั้น FM เพื่อสร้างเป็นชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนจะต้องทำการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบเพื่อเหนี่ยวนำทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น FM และเพื่อกำหนดให้ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF กระบวนการดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนได้ [144], [145] นอกจากนี้ยังพบว่าข้อบกพร่องของฟิล์มบางแบบพหุผลึก ได้แก่ ความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ และการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็ก เป็นต้น สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกันในระหว่างกระบวนการปลูกฟิล์มบาง โดยปัจจัยเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้น [39] ผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ถูกพบว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้เกิดแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนโดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น [146], [147] และลดลง [148] ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลกระทบต่อค่า H_{EB} ยังคงมีลักษณะที่ไม่ชัดเจนและแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองเกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในการศึกษาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} นอกจากนี้ยังจะได้แสดงภาพจำลองลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองประเภทที่เกิดขึ้นเมื่อมีการพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF

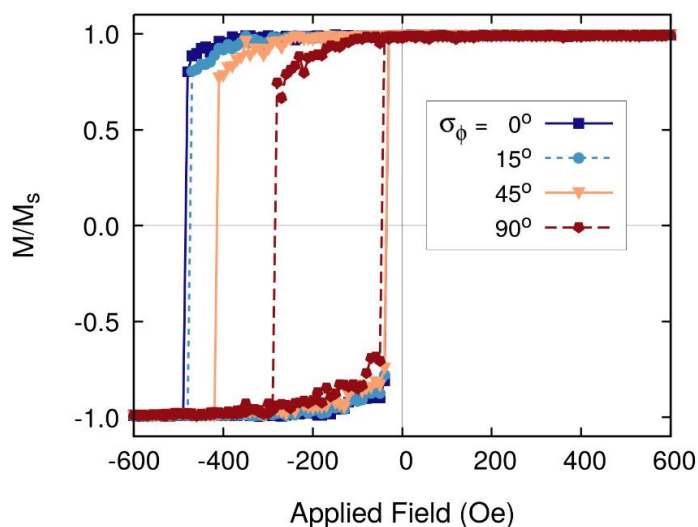
ในกรณีศึกษานี้จะได้ทำการศึกษาผลกระทบของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} ในระบบโครงสร้างสองชั้น IrMn/CoFe ที่มีขนาดของระบบเท่ากับ $100 \times 100 \text{ nm}^2$ เมื่อค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ $D_m = 8 \text{ nm}$ และระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็กเท่ากับ 0.1 nm โดยการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\sigma_{IND} = 0.2$ [141] สำหรับความหนาของชั้นฟิล์ม AF และชั้น FM ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $t_{AF} = t_{FM} = 4 \text{ nm}$ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กดังแสดงในตาราง 4.1



ภาพประกอบ 4.26 ลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF แบบสองมิติในกรณีที่มีค่ามุมการกระจายตัวเท่ากับ (ก) $\sigma_\phi = 0^\circ$ (ข) $\sigma_\phi = 15^\circ$ และ (ค) $\sigma_\phi = 45^\circ$

ภาพประกอบ 4.26 แสดงตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์ม AF แบบสองมิติที่ถูกใช้สำหรับการศึกษาผลกระทบของของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} เมื่อการกระจายตัวของทิศแกนง่ายถูกควบคุมด้วยค่ามุมการกระจายตัว σ_{ϕ} โดยในกรณีที่มุมการกระจายตัวมีค่าเป็นศูนย์ $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ พบว่าแมกนีไทเซชันทุกตัวภายในระบบจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งมีลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยวแสดงดังภาพประกอบ 4.26(ก) และเมื่อมุมการกระจายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น $\sigma_{\phi} = 15^{\circ}$ พบว่าแมกนีไทเซชันภายในระบบจะมีทิศทางที่เบี่ยงเบนออกจากแกน $+y$ ไปตามแนวแกน $\pm x$ แบบสุ่มด้วยขนาดของมุมเท่ากับ 5° ในภาพประกอบ 4.26(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันที่แคบ สำหรับกรณีสุดท้ายคือกรณีที่มุมการกระจายตัวมีค่าสูงเป็น $\sigma_{\phi} = 45^{\circ}$ พบว่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันจะมีลักษณะที่กว้าง แสดงดังภาพประกอบ 4.26(ค) โดยแมกนีไทเซชันภายในระบบจะมีทิศทางที่เบี่ยงเบนออกจากแกน $+y$ แบบสุ่มไปตามแนวแกน $\pm x$ ด้วยขนาดของมุมเท่ากับ 45° ซึ่งจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากทิศทางของลูกศรและความเข้มสีของเกรนแม่เหล็กที่ถูกใช้แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแนวแกน $+y$

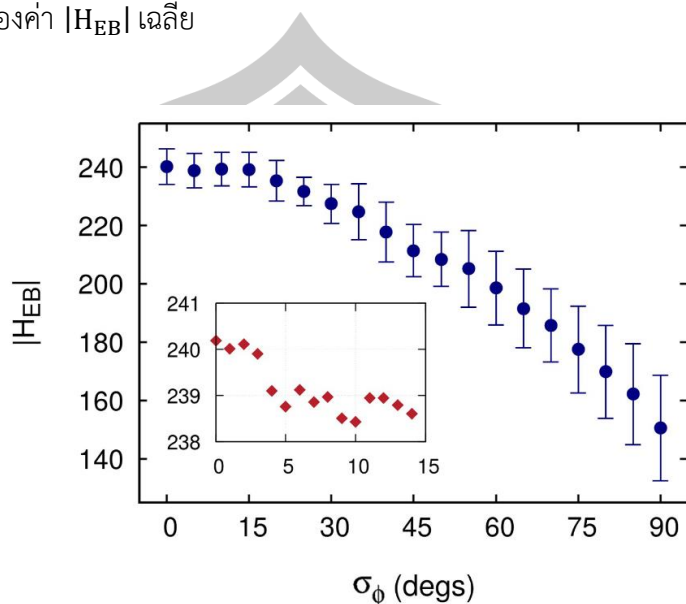
ในลำดับแรกจะได้ทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe เปรียบเทียบกันในกรณีที่มุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ 15° 45° และ 90° ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 4.27 โดยจะเห็นว่าในกรณีที่ $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีลักษณะที่กว้างและให้ค่า H_C ที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ให้อยู่ในทิศทางเดียวกันทั้งหมดได้ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อเอาชนะค่าพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FM สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้ แต่เมื่อมุมการกระจายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM รวมถึงค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นมีสัดส่วนที่ลดลง ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถผันกลับทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้แม้ว่าขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะมีค่าน้อยลง ดังนั้นปริมาณ H_C ที่สามารถคำนวณได้จากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะพยายามเคลื่อนที่กลับเข้าสู่แกนสมมาตรตามมุมของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันที่เพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 4.27



ภาพประกอบ 4.27 ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe เปรียบเทียบกันในกรณีที่มีค่าแตกต่างกันเป็น 0° 15° 45° และ 90° ตามลำดับ

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการศึกษาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} เพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทที่สำคัญของปัจจัยดังกล่าวซึ่งส่งผลต่อระบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนภายในหัวอ่านข้อมูล ในกรณีศึกษานี้จะได้กำหนดให้แกน x แทนด้วยค่ามุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF σ_ϕ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0° ถึง 90° โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5° และแกน y แทนด้วยค่า $|H_{EB}|$ ที่มุมการกระจายตัวค่าต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในภาพประกอบ 4.28 นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ในระบบโครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่กำหนดการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กเท่ากับ $\sigma_{ind} = 0.2$ โดยมีลักษณะการกระจายตัวที่แตกต่างกันทั้งหมด 50 ระบบ เพื่อให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ย (mean) และค่าคลาดเคลื่อน (standard error) ของค่า $|H_{EB}|$ ได้อย่างถูกต้องในเชิงสถิติ ผลการศึกษาในภาพประกอบ 4.28 แสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายน้อย $\sigma_\phi < 15^\circ$ จะให้ค่า $|H_{EB}|$ ที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น FM มีแนวโน้มในการผันกลับทิศทางอย่างพร้อมเพรียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการพิจารณาภาพด้านในภาพประกอบ 4.28 จะพบว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อมุมการกระจายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สำหรับกรณีที่มีมุมการกระจายตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น $\sigma_\phi > 15^\circ$ พบว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนนี เนื่องจากปริมาณความแรงของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM เพื่อยึดทิศทางมีลดต่ำลงเมื่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายที่ต้องการยึดไว้ทำให้เกรน

แม่เหล็กในชั้น AF ไม่สามารถออกแรงทอร์กสูงสุดในการยึดทิศทางของเกรนแม่เหล็ก FM ได้และนำไปสู่การลดลงของค่า $|H_{EB}|$ เฉลี่ย

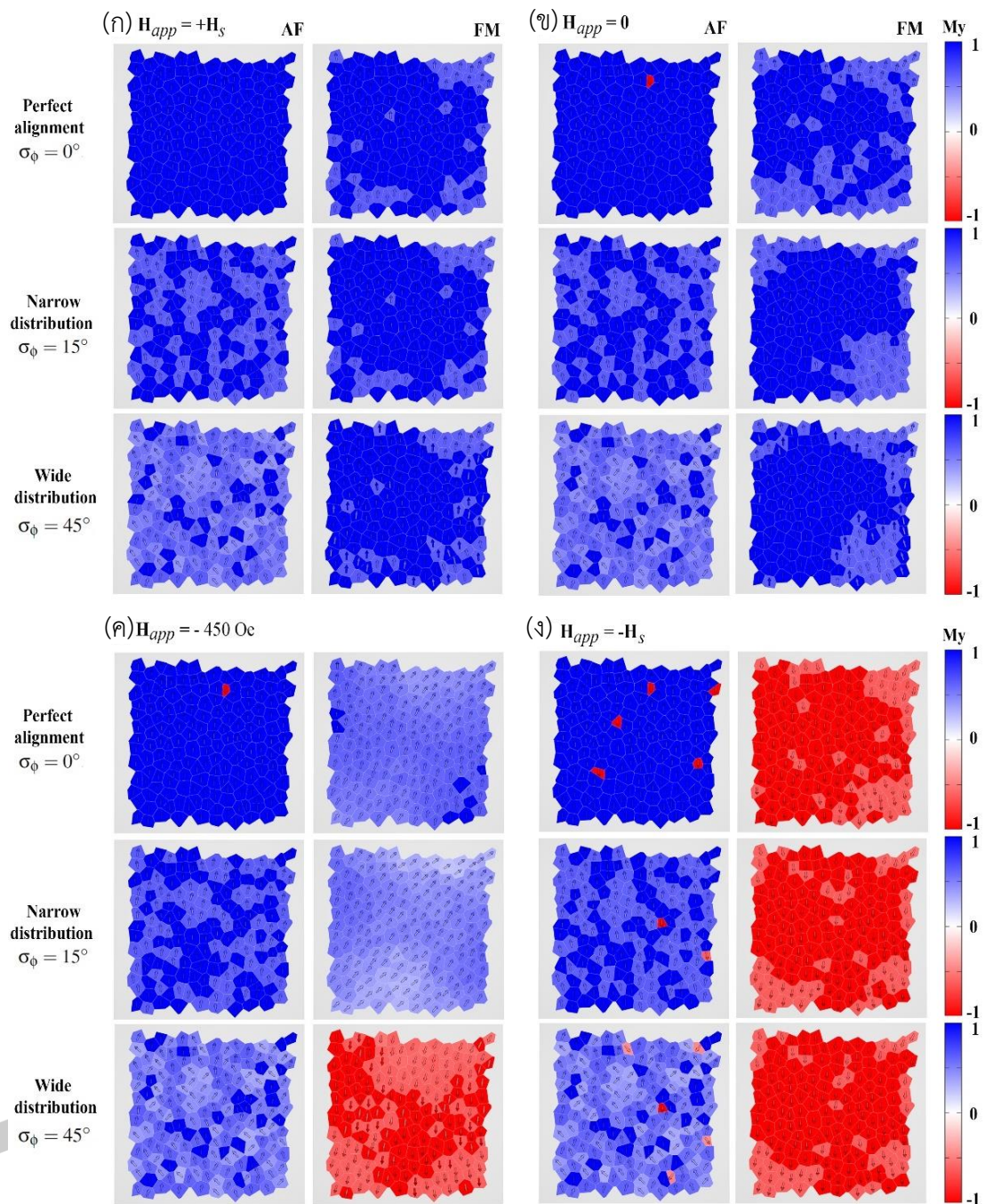


ภาพประกอบ 4.28 ผลการคำนวณขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน $|H_{EB}|$ ในลักษณะฟังก์ชันของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเท่ากับ $\sigma_\phi = 0^\circ - 90^\circ$ [139]

ในลำดับต่อมาจะได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายที่ทำให้เกิดแนวโน้มการลดลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ โดยการพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF และชั้น FM จะถูกพิจารณาที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ได้แก่ จุดที่สนามแม่เหล็กอิ่มตัวทางด้านบวก (positive saturation field, $H_{app} = +H_s$) จุดที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (zero applied field, $H_{app} = 0$) จุดที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กในทางด้านลบเท่ากับ 450 Oe ($H_{app} = -450$ Oe) และจุดที่สนามแม่เหล็กอิ่มตัวทางด้านลบ (negative saturation field, $H_{app} = -H_s$) แสดงดังภาพประกอบ 4.29(ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ ภาพจำลองลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF (ภาพทางด้านซ้ายมือ) และชั้น FM (ภาพทางด้านขวามือ) จากมุมมองด้านบน (top view) ในระบบที่มีขนาดเท่ากับ 100×100 nm² ในแนวแกน x และแนวแกน y โดยที่เกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนที่มีทิศทางใดๆ จะถูกแทนด้วยแถบสีน้ำเงินและสีแดงแสดงดังภาพประกอบ 4.29 โดยแบ่งการพิจารณาระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ออกเป็น 3 กรณีคือ ระบบที่ไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย (perfect alignment case, $\sigma_\phi = 0^\circ$) ระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบแคบ (narrow distribution case, $\sigma_\phi = 15^\circ$) และระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบกว้าง (wide distribution case, $\sigma_\phi = 45^\circ$) สำหรับค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของชั้นวัสดุ CoFe และชั้นวัสดุ IrMn ที่ถูกใช้ในกรณีศึกษาจะถูกแสดงดังตาราง 4.1

ภาพประกอบ 4.29(ก) แสดงโครงสร้างและทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้น AF และชั้น FM ณ จุด $H_{app} = +H_s$ ในทิศทาง $+y$ โดยจะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็ก FM ส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวไปในแนวแกน $+y$ เนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น AF จะมีลักษณะการจัดเรียงทิศทางที่แตกต่างกันตามผลของการกำหนดมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในระนาบ xy ได้แก่ ระบบที่ไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย $\sigma_\phi = 0^\circ$ ระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบแคบ $\sigma_\phi = 15^\circ$ และระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบกว้าง $\sigma_\phi = 45^\circ$ ในลำดับต่อมาเมื่อพิจารณา ระบบ ณ จุด $H_{app} = 0$ จะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FM จะมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงทิศทางออกจากแนวแกน $+y$ ในทุกกรณีศึกษา ดังแสดงในภาพประกอบ 4.29(ข)

เมื่อทำการพิจารณาลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ณ จุด $H_{app} = -450$ Oe ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้เกิดกระบวนการผันกลับของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ดังภาพประกอบ 4.29(ค) จะเห็นได้ว่าทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะมีแรงแรงมากและต่อต้านการผันกลับทิศทางเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยในกรณีที่ระบบมีค่ามุมการกระจายตัวที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF มีการจัดเรียงทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบและส่งผลต่อการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM อย่างไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ระบบมีค่ามุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบกว้าง $\sigma_\phi = 45^\circ$ จะทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถผันกลับทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าเกรนแม่เหล็ก FM จะมีการจัดเรียงทิศทางที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ระบบมีค่ามุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบกว้าง $\sigma_\phi = 45^\circ$ แสดงดังแถบสีแดงที่แตกต่างกันในภาพประกอบ 4.29(ค) การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ในกรณีดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่เป็นไปอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน (incoherent reversal) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเกรนแม่เหล็กในชั้น FM จะมีการตอบสนองต่อปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแบบสุ่มจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF เนื่องจากผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งนำไปสู่ลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM อย่างไม่เป็นระเบียบและกระบวนการกลับทิศทางที่เป็นไปอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน (noncoherent reversal mechanism)



ภาพประกอบ 4.29 ลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่แต่ละสถานะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเปรียบเทียบกับ 4 จุด ได้แก่ (ก) จุดที่สนามแม่เหล็กอิ่มตัวทางด้านบวก (ข) จุดที่ไม่มีการบ่อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ค) จุดที่มีการบ่อนสนามแม่เหล็กในทางด้านลบเท่ากับ 450 Oe และ (ง) จุดที่สนามแม่เหล็กอิ่มตัวทางด้านลบ โดยระบบที่นำมาพิจารณาจะมีขนาดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF แตกต่างกันไปเท่ากับ $\sigma_\phi = 0^\circ$ 15° และ 45° ตามลำดับ [139]

นอกจากนี้พฤติกรรมการณ์กลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ในระบบที่ไม่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่าย $\sigma_{\phi} = 0^{\circ}$ จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางที่ขนานกันในระหว่างกระบวนการผันกลับทิศทางซึ่งแสดงถึงโหมดการกลับทิศทางที่เป็นอย่างพร้อมเพรียงกัน (coherent reversal mode) แต่ในระบบที่มีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายแบบแคบ $\sigma_{\phi} = 15^{\circ}$ จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางอย่างต่อเนื่องจากแถบสีน้ำเงินไปเป็นสีน้ำเงินสว่างดังภาพประกอบ 4.28(ค) จากภาพจำลองลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF และชั้น FM จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นของมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดโหมดการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ที่เป็นไปอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน โดยผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะนำไปสู่การลดลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.28 ในลำดับสุดท้ายเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ณ จุด $H_{app} = -H_s$ ในทิศทาง $-y$ จะพบว่าเกรนแม่เหล็ก FM จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างสมบูรณ์ในทุกกรณีศึกษาแสดงดังแถบสีแดงในภาพประกอบ 4.29(ง) นอกจากนี้ยังจะสังเกตเห็นได้ว่ามีจำนวนของเกรนแม่เหล็ก AF บางส่วนที่เกิดการหมุนกลับทิศทางไปในแนวแกน $-y$ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากผลของปริมาณสนามแลกเปลี่ยนที่เกรนแม่เหล็ก FM ที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็ก AF

แบบจำลองเกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาคูสมบัติทางแม่เหล็กและพฤติกรรมการณ์กลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe ที่เชื่อมติดชั้นวัสดุ IrMn สำหรับแบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นนี้มีพื้นฐานการคำนวณที่พิจารณาความเชื่อมโยงกันของระยะเวลาในการคำนวณ (timescale) ระหว่างสองวิธีการเพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายและผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบพร้อมด้วยเพื่อให้แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความเสมือนจริงมากที่สุด

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กและลักษณะโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้น เช่น ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุ IrMn ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็ก และผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ IrMn เป็นต้น ช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทที่สำคัญของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้เป็นอย่างดีซึ่งนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขในการสร้างโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีเสถียรภาพทางความร้อนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน

ในชั้นวัสดุ IrMn ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการยึดทิศทางของ แมกนีไทเซชันในชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนหรือการลดลงของปริมาณ H_{EB} แต่ยังส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe เช่นเดียวกันดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในส่วนของภาพจำลองการกระบวนการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันข้างต้น ผลการศึกษานี้สามารถยืนยันได้ว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ IrMn เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กและปริมาณ H_{EB} ในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

4.4 แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยภายในและปัจจัยทางโครงสร้างของชั้น AF และชั้น FM ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3 เป็นลักษณะการจำลองโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนอย่างง่ายโดยไม่พิจารณาผลของกระบวนการยึดทิศทางระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM เมื่อมีการให้อุณหภูมิการกำหนดทิศทาง (setting temperature, T_{SET}) และสนามแม่เหล็กภายนอกขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (setting process) [25], [132] อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF เพื่อให้สามารถกำหนดลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ตามทิศทางที่ต้องการไบอัส (biasing direction, \hat{n}) ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 ดังนั้นในหัวข้อศึกษานี้จะได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบที่มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

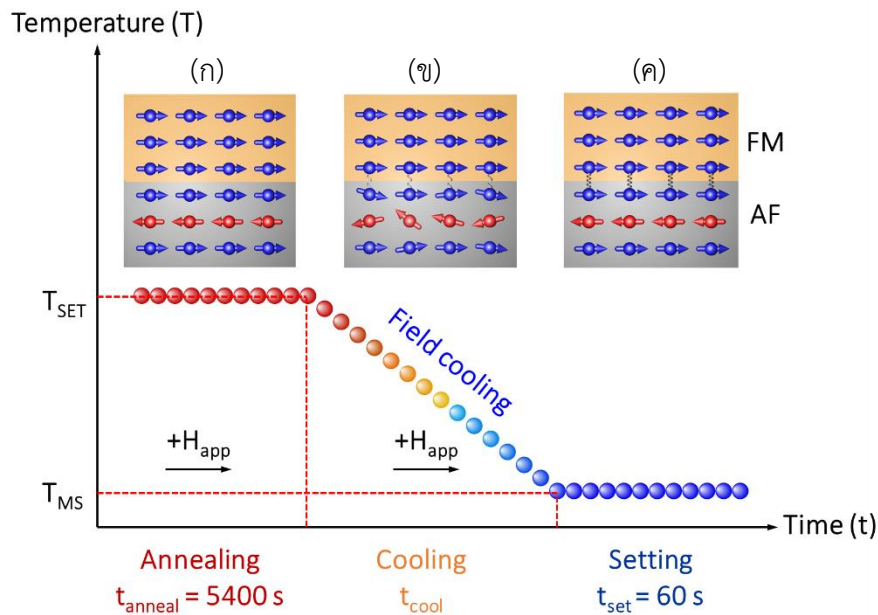
4.4.1 กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF

จากการศึกษาของเฟอร์นันเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [133] ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยนมีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (setting fraction, f_{SET}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF (AF grain volume, V) โดยผลการกระจายตัวของปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในชั้น AF ถูกนำมาใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมการณ์ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน

ในชั้น AF ซึ่งถูกแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงสำคัญด้วยปริมาตรวิกฤติของเกรนแม่เหล็ก AF ของเกรนขนาดเล็ก (critical AF grain volume, V_C) และปริมาตรวิกฤติของเกรนแม่เหล็ก AF ของเกรนขนาดใหญ่ (unset AF grain volume, V_{SET}) ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1.2.1 การพิจารณาผลของปริมาตรวิกฤตดังกล่าวนำไปสู่การนำเสนอกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งถูกใช้เพื่อกำหนดทิศทางของเกรนแม่เหล็ก AF ที่มีปริมาตรอยู่ในช่วง $V_C < V < V_{SET}$ ให้มีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ต้องการไบอัส ก็ จะถูกแบ่งออกเป็นสามช่วงเวลาสำคัญ ได้แก่ เวลาการให้ความร้อน (annealing time, t_{anneal}) เวลาการลดอุณหภูมิ (cooling time, t_{cool}) และเวลาการกำหนดทิศทาง (setting time, t_{set}) แสดงดังภาพประกอบ 4.30(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยในช่วงเวลา t_{anneal} ระบบจะถูกให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิการกำหนดทิศทาง (setting temperature, T_{SET}) ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก $+H_{app}$ เป็นระยะเวลา 5400 s [25], [132] เพื่อให้แมกนีไทเซชันในชั้น FM และชั้น AF มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกแสดงดังภาพประกอบ 4.30(ก) โดยค่าอุณหภูมิ T_{SET} จะถูกกำหนดให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติหรืออุณหภูมินิล T_N ของวัสดุ AF เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลของความร้อนทำลายลักษณะโครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน จากนั้นในช่วงเวลา t_{cool} ทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส (measurement temperature, T_{MS}) หรืออุณหภูมิตดลอง (experiment temperature, T_{EXP}) ในขณะที่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก $+H_{app}$ เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้น AF มีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุหรือปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนแสดงดังภาพประกอบ 4.30(ข) และในช่วงเวลา t_{set} และปล่อยระบบทิ้งไว้เป็นเวลา 60 s เพื่อให้เกรนแม่เหล็ก AF ที่มีปริมาตรอยู่ในช่วง $V_C < V < V_{SET}$ จัดเรียงตัวในทิศทางที่ต้องการไบอัส ก็ ตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น FM อย่างสมบูรณ์ก่อนเริ่มขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ T_{MS} แสดงดังภาพประกอบ 4.30(ค)

พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพประกอบ 4.30 กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสามช่วงเวลาได้แก่ (ก) ช่วงเวลาการให้ความร้อน (ข) ช่วงเวลาการลดอุณหภูมิ และ (ค) ช่วงเวลาการกำหนดทิศทาง ตามลำดับ

4.4.2 การจำลองกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ก่อนเริ่มขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา โดยทั่วไปแล้วพลวัตของแมกนีไทเซชันจะเกิดขึ้นโดยมีรูปแบบของระยะเวลาเป็นแบบลอการิทึม (logarithmic timescale) [149], [150] ดังนั้นจะพิจารณาระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันเพื่อกำหนดช่วงเวลาย่อยสำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์โดยทำการแบ่งเวลาในช่วงเวลาจริงที่พิจารณา (timestep) $t_i < t < t_f$ ออกเป็นจำนวน N ช่วงเวลาซึ่งกำหนดให้มีความเท่ากับ 100 เมื่อ t_i คือเวลาเริ่มต้นและ t_f คือเวลาสุดท้ายที่พิจารณา การคำนวณลำดับเวลาย่อยที่ n ใดๆ t_n ในรูปแบบลอการิทึมสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$t_n = \frac{(t_f - t_i)}{(e - 1)}(e^{n/N} - 1) + t_i \quad (4.44)$$

เมื่อ e คือค่าคงที่ซึ่งเป็นฐานของค่าลอการิทึมธรรมชาติที่มีค่าเท่ากับ 2.7182818 สำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันของระยะเวลาแบบลอการิทึมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ในช่วงเวลา t_{anneal} ได้กำหนดเวลา t_i ให้มีค่าเท่ากับ 1 s และกำหนดเวลา t_f ให้มีค่าเท่ากับช่วงเวลาของการให้ความร้อน $t_f = t_{\text{anneal}} = 5400$ s โดยอุณหภูมิของระบบจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ T_{SET} จากนั้นทำการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในช่วงเวลาย่อยใดๆ t_n ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.44)
2. ในช่วงเวลา t_{cool} ได้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิของระบบ T_n ที่เวลา t_i และ t_f มีค่าเท่ากับ T_{SET} และ $T_{\text{SET}} - T_{\text{MS}}$ ตามลำดับ เพื่อให้สามารถพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในช่วงเวลาย่อยใดๆ t_n ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.44) ในขณะที่อุณหภูมิของระบบ T_n มีการลดลงแบบเชิงเส้นจาก T_{SET} ถึง T_{MS} ได้แสดงดังสมการ

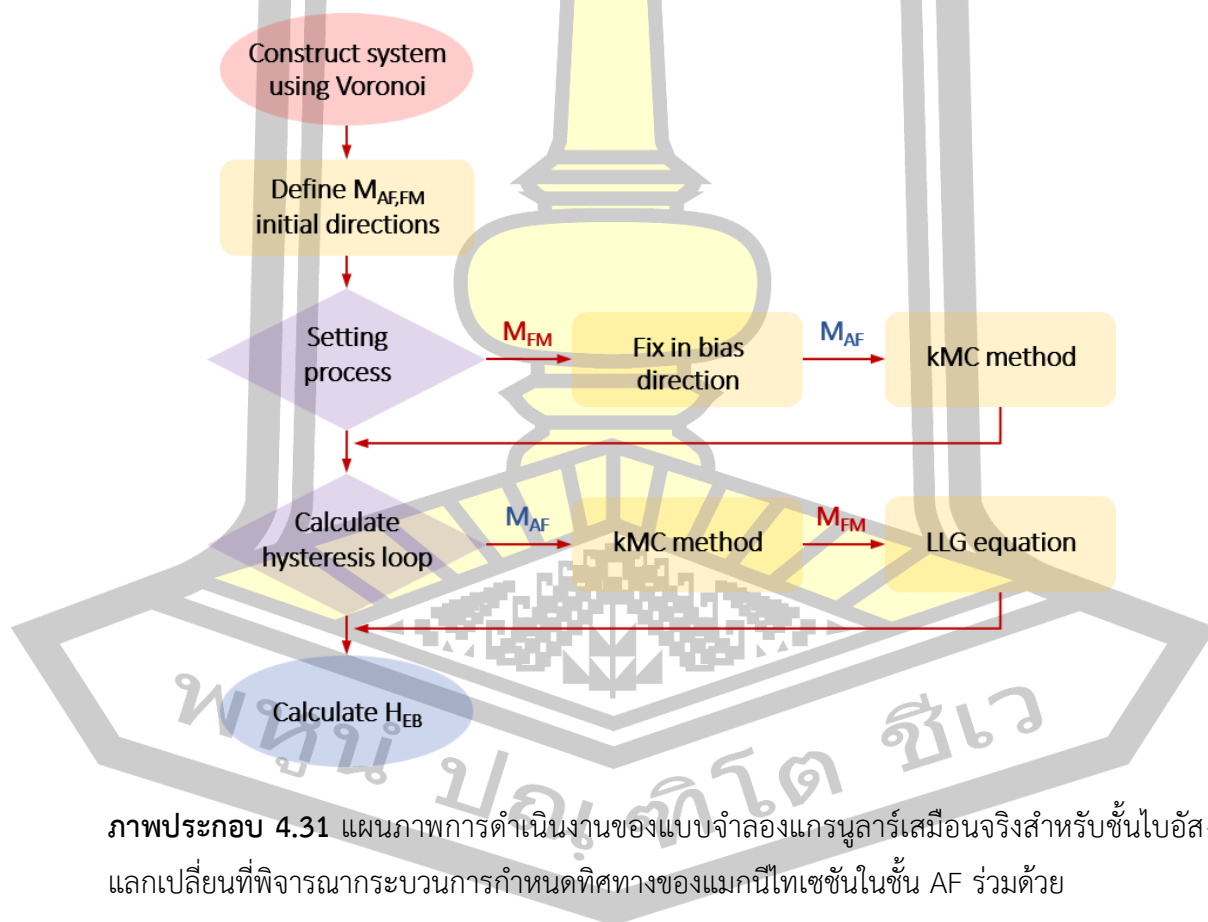
$$T_n = T_{\text{SET}} - \frac{(T_{\text{SET}} - T_{\text{MS}})}{T_{\text{cool}}}(t_n - t_{\text{anneal}}) \quad (4.45)$$

3. ในช่วงเวลา t_{set} ภายหลังจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในช่วงเวลา t_{anneal} และ t_{cool} จะทำการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF อีกครั้งที่อุณหภูมิ T_{MS} เป็นเวลา 1 นาที่ เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลก่อนเริ่มขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน โดยกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะถูกคำนวณโดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ในขณะที่พลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM จะถูกคำนวณจากสมการ LLG เช่นเดียวกับกับแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.3.3

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปลำดับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น

AF ได้ตั้งแผนภาพในภาพประกอบ 4.31 โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุทั้งสองชั้นด้วยโปรแกรม Voronoi จากนั้นกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันเพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในระหว่างกระบวนการกำหนดทิศทางในขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM ถูกพิจารณาให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามเหล็กภายนอกในแนวแกน +y แล้วทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์เชื่อมโยงกับสมการ LLG ในลำดับสุดท้ายจะได้ทำการคำนวณค่า H_{EB} จากลักษณะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตร เพื่อนำไปใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยภายในของวัสดุแม่เหล็กและปัจจัยทางโครงสร้างของชั้น AF และชั้น FM ที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในระบบที่มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบ 4.31 แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนที่พิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ร่วมด้วย

4.4.3 ผลการศึกษา

แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยภายในที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน ได้แก่ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี ความหนาของชั้นฟิล์ม AF ความหนาของชั้นฟิล์ม FM และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ เป็นต้น สำหรับลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะถูกอธิบายผ่านรูปร่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและการคำนวณค่า H_{EB} นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งนำไปสู่การพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ถูกเรียกว่า อุณหภูมิกีดกัน (blocking temperature, T_B) ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงเลือกใช้วัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กและค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ

ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

| พารามิเตอร์ | ชนิดของวัสดุ | |
|---|--------------------------|-------------------------|
| | IrMn | CoFe |
| ค่าอุณหภูมิวิกฤติ T_C (K) | 690 [133] | 1300 [140] |
| ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี K_U (erg/cm ³) | 5.56×10^6 [134] | 1.8×10^5 [140] |
| ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว M_S (emu/cm ³) | 1800 | 1800 [140] |
| ความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} (Oe) | 250 [139] | 250 [139] |
| อุณหภูมิการกำหนดทิศทาง T_{SET} (K) | 600 | - |
| อุณหภูมิการจัดลูป T_{MS} (K) | 300 | 300 |
| เวลาการให้ความร้อน t_{anneal} (s) | 5400 | 5400 |
| เวลาการกำหนดทิศทาง t_{set} (s) | 60 | 60 |

ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

| พารามิเตอร์ | ชั้นวัสดุ | |
|--|-----------|-----------|
| | IrMn | CoFe |
| ความกว้างของระบบในแนวแกน x (nm) | 100 | 100 |
| ความยาวของระบบในแนวแกน y (nm) | 100 | 100 |
| ค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก D_m (nm) | 8 | 8 |
| ค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรน σ_{InD} | 0.2 [141] | 0.2 [141] |
| ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (nm) | 0.1 | 0.1 |
| ความหนาของชั้นฟิล์ม t_{film} (nm) | 8 | 4 |

4.4.3.1 ผลกระทบของปัจจัยภายในและการออกแบบโครงสร้าง

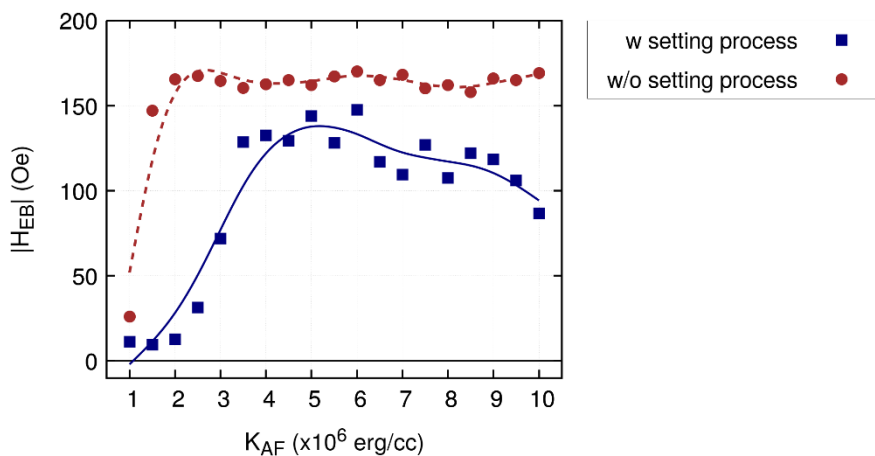
ในลำดับแรกของหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นของวัสดุ AF และ FM นั่นคือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก K_{AF} ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพทางความร้อนของอุปกรณ์ที่มีการนำเอาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น เซ็นเซอร์หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และหน่วยความเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก เป็นต้น [26], [32], [36], [142] ดังนั้นในลำดับแรกจะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของค่า K_{AF} ที่ส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านการคำนวณปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ซึ่งถูกนิยามด้วย $H_{EB} = (H_C^- - H_C^+)/2$ [18] และปริมาณเคอเออร์ซิวิตี H_C ซึ่งถูกนิยามด้วย $H_C = (H_C^- + H_C^+)/2$ [18] เมื่อ H_C^- และ H_C^+ คือปริมาณ H_C ทางด้านซ้ายและด้านขวาของลูปปิดฮิสเทอรีซิสที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรตามลำดับ

แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนถูกนำมาใช้สำหรับการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์ทางการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ ในการศึกษาผลกระทบของค่า K_{AF} ได้กำหนดให้ K_{AF} มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1×10^6 erg/cm³ ถึง 6×10^6 erg/cm³ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5×10^6 erg/cm³ โดยจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนแสดงดัง

ภาพประกอบ 4.32 เพื่อแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ทำให้สามารถศึกษาลักษณะปรากฏการณ์ไบอัสที่มีความเสมือนจริงได้

จากผลการศึกษาในภาพประกอบ 4.32 พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ ของระบบที่ไม่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่า K_{AF} โดยที่ $|H_{EB}|$ จะลู่อเข้าสู่ค่าสูงสุดในลักษณะเส้นโค้งแบบเชิงเส้น (asymptotic curve) เมื่อ K_{AF} มีค่าเท่ากับ 2.0×10^6 erg/cm³ และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คงที่เมื่อ K_{AF} มีค่ามากกว่า 2.0×10^6 erg/cm³ เนื่องจากในระบบดังกล่าวถูกจำลองขึ้นภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้เกรนแม่เหล็ก AF ทั้งหมดภายในระบบมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการไบอัส (biasing direction, \hat{n}) ในลักษณะของเกรนแม่เหล็กเดี่ยวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีค่า K_{AF} ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาระบบที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยอุณหภูมิกำหนดทิศทางเท่ากับ $T_{SET} = 600$ K กลับพบว่าในกรณีที่มีค่า K_{AF} ต่ำกว่า 2.0×10^6 erg/cm³ จะไม่ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสทำให้ไม่สามารถคำนวณปริมาณ $|H_{EB}|$ ได้เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กไม่เพียงพอต่อการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM จากนั้นในกรณีที่มีค่า K_{AF} เพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นไปยังจุดสูงสุดและลดต่ำลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ K_{AF} มีค่าสูง จากผลการคำนวณจะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ ในกรณีที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางในทุกช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า K_{AF} เนื่องจากผลของกระบวนการกำหนดทิศทางทำให้สัดส่วนของเกรนแม่เหล็กที่ทำหน้าที่ยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM มีปริมาณที่ลดลงและนำไปสู่การลดลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริง

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 4.32 ผลการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของค่า K_{AF} เปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF แสดงดังเส้นกราฟสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ

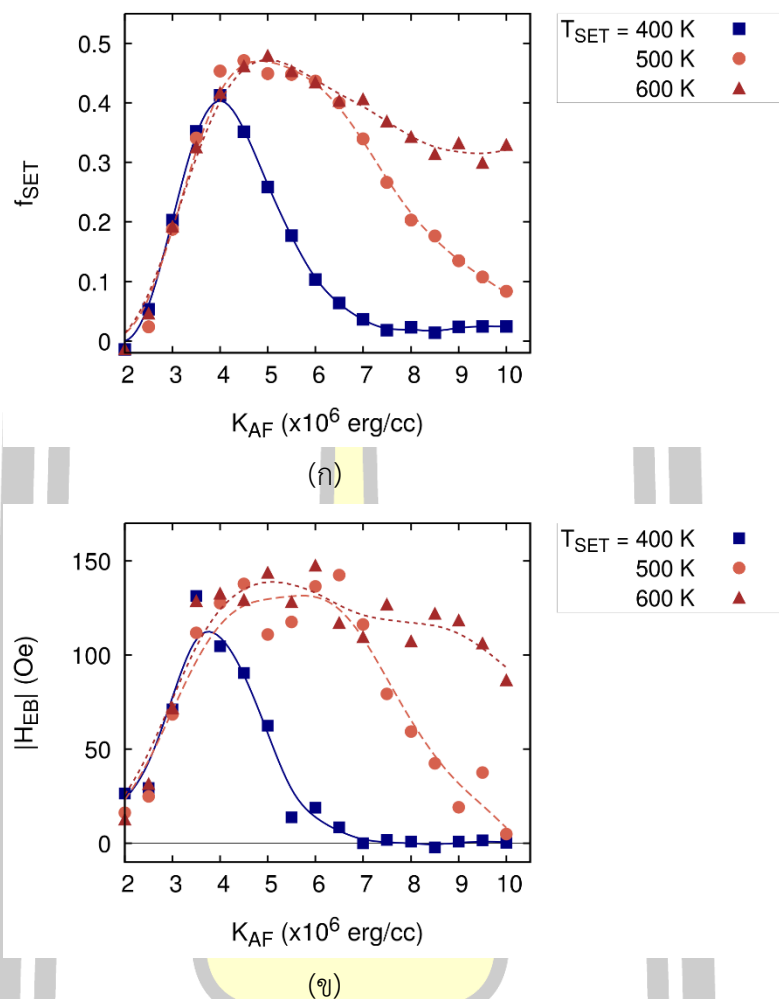
โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการไบอัส \hat{n} จะขึ้นอยู่กับความแรงของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ทำให้สามารถนิยามค่า H_{EB} ในเทอมของทิศทางเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่ใช้กำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ตามทิศทางที่ต้องการไบอัสได้ กล่าวคือ $H_{EB} \propto \sum \hat{n} \cdot \hat{m}_{AF}$ โดยบาร์คเกอร์และคณะ (J. Barker *et al.*) [37] ได้ทำการพิจารณาค่าสัดส่วนการกำหนดทิศทาง (set fraction, f_{SET}) ที่ระบบใช้ในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM จากทิศทางเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF โดยค่าสัดส่วนการกำหนดทิศทาง f_{SET} ดังกล่าวถูกพบว่ามีลักษณะขึ้นอยู่กับผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ผลของความไม่อิสระของอนุกรมิตต่อค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้น AF และค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็ก AF กล่าวคือ $\Delta E = K_{AF} V_{AF}$

เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของการกำหนดทิศทางและปริมาณ H_{EB} ได้ทำการคำนวณผลกระทบของปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก K_{AF} ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า f_{SET} และขนาดของค่า H_{EB} ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น IrMn/CoFe ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์ทางการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอนุกรมิตการกำหนดทิศทางให้มีค่าเท่ากับ $T_{SET} = 400 \text{ K}$, 500 K และ 600 K แสดงดังภาพประกอบ 4.33(ก) และ (ข) ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ค่าคงที่ K_{AF} มีค่าต่ำกว่า $4 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$

แนวโน้มของค่า f_{SET} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าคงที่ K_{AF} ที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ T_{SET} ซึ่งถูกใช้อ้างอิงถึงเกรนแม่เหล็กบางส่วนของชั้น AF ที่แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยเกรนเหล่านี้ถูกนิยามให้เป็นเกรนที่ขาดเสถียรภาพทางความร้อน (unthermally stable AF grains) [133], [134]

เมื่อพิจารณาค่า f_{SET} ในช่วงที่ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีเพิ่มสูงขึ้นพบว่าในกรณีที่อุณหภูมิ T_{SET} มีค่าเท่ากับ 400 K จะไม่สามารถทำให้เกิดการกระตุ้นทางความร้อนต่อเกรนแม่เหล็กทั้งหมดภายในระบบได้และในช่วงที่ค่าคงที่ K_{AF} มีค่าสูงกว่า $7 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ พบว่าค่าสัดส่วนในการกำหนดทิศทางจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากเกรนที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสูงจะมีพลังงานในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันสูงทำให้ผลของความร้อนไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันที่มีค่าพลังงานสูงนี้ได้และเกรนเหล่านี้ถูกนิยามให้เป็นเกรนที่ไม่สามารถกำหนดทิศทางได้ (unset AF grains) [133], [134] โดยจุดยอดของค่าสัดส่วนการกำหนดทิศทางที่เกิดขึ้นจะแสดงถึงเกรนบางส่วนที่สามารถกำหนดทิศทางได้ด้วยอุณหภูมิ T_{SET} ซึ่งเป็นเกรนที่ระบบใช้ในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM และในกรณีที่อุณหภูมิ T_{SET} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 500 K และ 600 K พบว่าค่าสัดส่วนการกำหนดทิศทางจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.5 ด้วยค่าคงที่แอนไอโซโทรปีเท่ากับ $5.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ สอดคล้องกับผลการคำนวณ [37] และผลการทดลอง [134] ซึ่งหมายความว่าจำนวนเกรนแม่เหล็ก AF เพียงครึ่งหนึ่งจากจำนวนเกรนทั้งหมดภายในระบบเท่านั้นที่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้เนื่องจากผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ก่อนเริ่มกระบวนการกำหนดทิศทางและความผันผวนทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบทำให้เกรนแม่เหล็ก AF ขนาดเล็กขาดเสถียรภาพทางความร้อนและเกรนแม่เหล็ก AF ขนาดใหญ่ไม่ถูกกำหนดทิศทางตามทิศทางที่ต้องการไบอัส

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า f_{SET} และ $|H_{\text{EB}}|$ มีความสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้ทำการคำนวณปริมาณ $|H_{\text{EB}}|$ โดยกำหนดอุณหภูมิการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ให้มีค่าเท่ากับ $T_{\text{SET}} = 600 \text{ K}$ และกำหนดให้ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้น AF มีค่าเท่ากับ $5.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ สำหรับทุกกรณีศึกษาซึ่งจะได้อธิบายในลำดับต่อไป



ภาพประกอบ 4.33 ผลกระทบของปริมาณค่าคงที่แอนไอโซโทรปีต่อการเปลี่ยนแปลงของ (ก) ค่า f_{SET} และ (ข) ปริมาณ $|H_{\text{EB}}|$ เปรียบเทียบกันในกรณีที่อุณหภูมิ T_{SET} มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 400 K ถึง 600 K

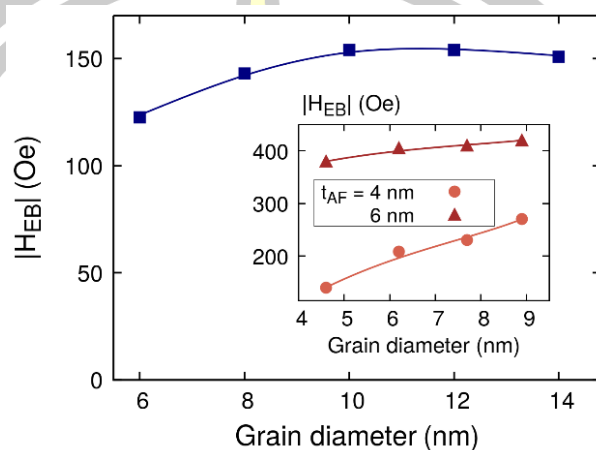
ในลำดับต่อมาจะได้ทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากลักษณะกายภาพของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน ได้แก่ ขนาดของเกรนแม่เหล็ก และขนาดความหนาของชั้นฟิล์ม AF เนื่องจากปริมาณทั้งสองเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของระบบเช่นเดียวกัน ในลำดับแรกจะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของขนาดของเกรนเฉลี่ยต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ $|H_{\text{EB}}|$ ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์ทางการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ

เพื่อให้สามารถศึกษาผลกระทบของขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อค่า $|H_{EB}|$ ในลำดับต่อมา ได้ทำการคำนวณปริมาณ $|H_{EB}|$ ในกรณีที่ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 6 nm ถึง 14 nm โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 nm แสดงดังภาพประกอบ 4.34(ก) จากการศึกษาพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ $|H_{EB}|$ มีการเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อขนาดของเกรนมีค่าเท่ากับ 12 nm เนื่องจากเกรนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาตรของเกรนและค่าพลังงานอุปสรรคที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF ใช้ในการรักษาทิศทางแสดงถึงความสัมพันธ์ $E_{AF} = K_{AF}V_{AF}$ เมื่อ V_{AF} คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ที่มีค่าเท่ากับผลคูณของขนาดของเกรนเฉลี่ย D_m และความหนาของชั้นฟิล์ม t_{AF} แต่เมื่อขนาดของเกรนมีค่าเท่ากับ 14 nm จะทำให้ขนาดของค่า H_{EB} ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของขนาดของเกรนส่งผลให้ค่าพลังงานอุปสรรคเพิ่มขึ้นและทำให้จำนวนเกรนที่ไม่สามารถกำหนดทิศทางได้เพิ่มมากขึ้นนำไปสู่การลดลงของค่า $|H_{EB}|$ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นกับผลการทดลองของเฟอร์นันเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) [135] ที่ทำการทดลองวัดค่า $|H_{EB}|$ ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน Si/Cu(10 nm)/CoFe(2.5nm)/IrMn(t_{film})/Ta(10 nm) ในกรณีที่ขนาดของเกรนมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 4.65 nm ถึง 8.9 nm เมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเท่ากับ $t_{film} = 4$ nm และ 6 nm แสดงดังภาพด้านในของภาพประกอบ 4.34(ก) โดยพบว่าผลการคำนวณให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ $t_{film} = 6$ nm

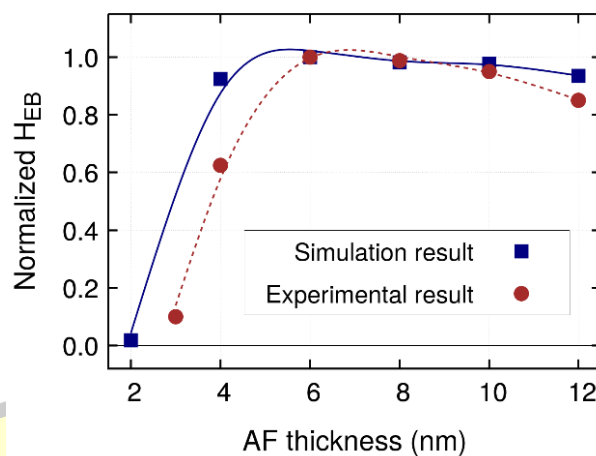
ผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF เป็นอีกหนึ่งปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน ดังนั้นจึงได้ทำการพิจารณาผลของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $|H_{EB}|$ ในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้น IrMn/CoFe ที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ร่วมด้วย โดยที่ข้อมูลของโครงสร้างรวมถึงค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ถูกสรุปไว้ดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ

ภาพประกอบ 4.34(ข) แสดงผลการคำนวณค่า $|H_{EB}|$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ตั้งแต่ 2 nm ถึง 12 nm โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 nm ซึ่งถูกนอโมไลซ์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [135] เพื่อพิจารณาแนวโน้มและความสอดคล้องระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการทดลอง จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าน้อยกว่า 4 nm ปริมาณ $|H_{EB}|$ จะมีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้น AF มีพลังงานอุปสรรคที่ใช้ในการรักษาทิศทางต่ำทำให้ผลของความร้อนเข้ามาครอบคลุมระบบและทำให้ไม่เกิดการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM แต่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่า

เพิ่มสูงขึ้นพบว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีที่เกรนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ปริมาณ $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มที่ลดลงสอดคล้องกับผลการทดลองเนื่องจากผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4.34 (ก) ผลกระทบของขนาดของเกรนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่า $|H_{EB}|$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง [135] และ (ข) ผลกระทบของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $|H_{EB}|$ ซึ่งถูกทำการนอร์มอลไลซ์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [135]

จากผลการศึกษาในหัวข้อนี้สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกนำเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณปริมาณ $|H_{EB}|$ ในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ได้อย่างถูกต้องและให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับทฤษฎีและผลการ

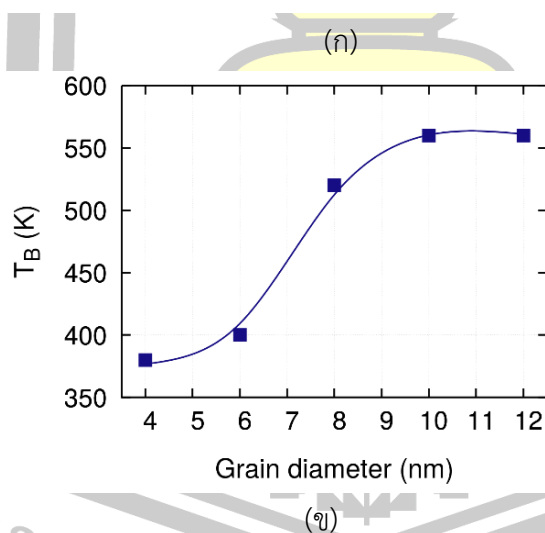
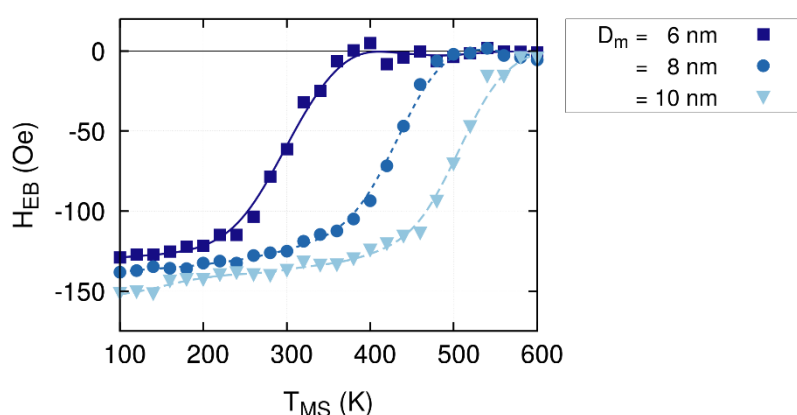
ทดลอง ดังนั้นจะได้นำเอาแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้สำหรับการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

4.4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิกีดกัน (blocking temperature, T_B) จะพบว่าค่า H_{EB} จะมีค่าเป็นศูนย์ $H_{EB}(T_B = 0)$ กล่าวคือ ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดออกจากแกนสมมาตร เนื่องจากค่าอุณหภูมิกีดกันมีผลทำให้วัสดุ AF แสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกส่งผลทำให้พลังงานความร้อนจะสามารถเอาชนะค่าพลังงานอุปสรรคที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF ใช้ในการรักษาทิศทางให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการไบอัสได้ เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าสูงกว่าค่า T_B พบว่าแมกนีไทเซชันในชั้น AF ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ได้ซึ่งแสดงถึงการขาดเสถียรภาพทางความร้อนของระบบ ดังนั้นค่า T_B จึงถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของระบบโดยอาศัยการคำนวณค่า H_{EB} ที่ใช้อ้างอิงถึงอัตราการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนหรือผลกระทบทางความร้อนต่อโครงสร้างชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยทำการคำนวณปริมาณ H_{EB} ที่อุณหภูมิการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส T_{MS} ใดๆ ที่ต้องการศึกษา ในลำดับแรกของหัวข้อนี้จะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก ค่าพารามิเตอร์ทางการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างแสดงดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ ในการศึกษานี้ได้ทำการกำหนดระบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ให้มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 6, 8 และ 10 nm โดยทำการวัดปริมาณ H_{EB} ในช่วงอุณหภูมิการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส T_{MS} มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 K ถึง 680 K โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 K แสดงดังภาพประกอบ 4.35(ก) จากภาพจะเห็นว่าปริมาณ $|H_{EB}|$ จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ เนื่องจากเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาตรและค่าพลังงานอุปสรรคที่ใช้ในการรักษาทิศทางสูง อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิจะทำให้ระบบที่มีขนาดของเกรนเล็กเท่ากับ 6 nm สูญเสียความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ซึ่งจะเห็นได้จากแนวโน้มการลดลงของขนาดของค่า H_{EB} เข้าสู่ศูนย์ก่อนระบบที่มีขนาดของเกรนเท่ากับ 8 nm และ 10 nm ตามลำดับ

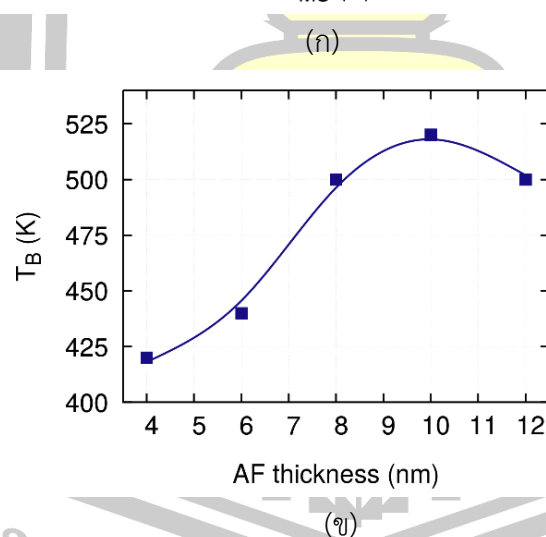
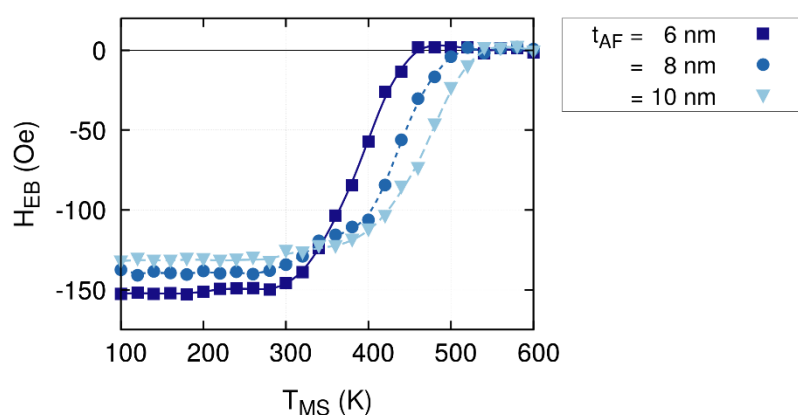
จากความสัมพันธ์ในภาพประกอบ 4.35(ก) นำไปสู่การพิจารณาค่า T_B ของระบบโครงสร้างวัสดุที่มีขนาดของเกรนแตกต่างกันได้ เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเฉลี่ยที่มีค่าตั้งแต่ 4 nm ถึง 12 nm และค่า T_B ในแนวแกน x และแกน y ดังภาพประกอบ 4.35(ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของค่า T_B เพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T_B = K_{AF}V_{AF}/25k_B$ [25] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF จะมีผลทำให้เกรนแม่เหล็กมีความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นระบบที่มีขนาดของเกรนแม่เหล็กขนาดใหญ่จะมีความสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าระบบที่มีเกรนแม่เหล็กขนาดเล็ก



ภาพประกอบ 4.35 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} ในกรณีที่ D_m มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 6 nm ถึง 10 nm และ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มี D_m แตกต่างกัน

ในลำดับต่อมาได้ทำการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนในโครงสร้างชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของชั้นฟิล์ม AF โดยคำนวณค่า H_{EB} ที่อุณหภูมิการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิส T_{MS} ตั้งแต่ 100 K ถึง 680 K โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 K

เปรียบเทียบระหว่างระบบโครงสร้างวัสดุที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF เท่ากับ 6 8 และ 10 nm เมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 8 nm แสดงดังภาพประกอบ 4.36(ก) จากภาพจะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 350 K ปริมาณ $|H_{EB}|$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 350 K พบว่าผลของอุณหภูมิจะทำให้ระบบที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF เท่ากับ 6 nm สูญเสียความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ซึ่งจะเห็นได้จากแนวโน้มการลดลงของขนาดของค่า H_{EB} เข้าสู่ศูนย์ก่อนระบบที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF เท่ากับ 8 nm และ 10 nm ตามลำดับ



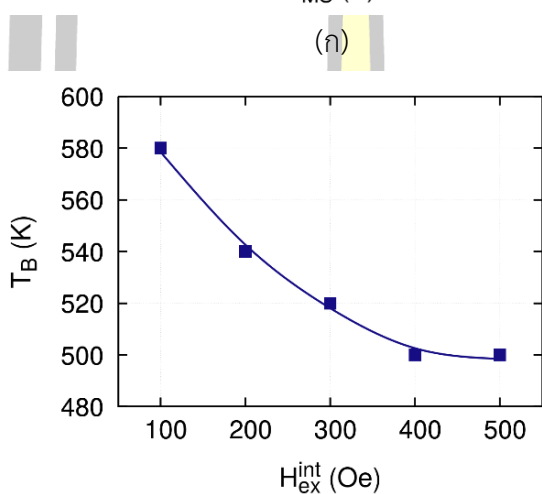
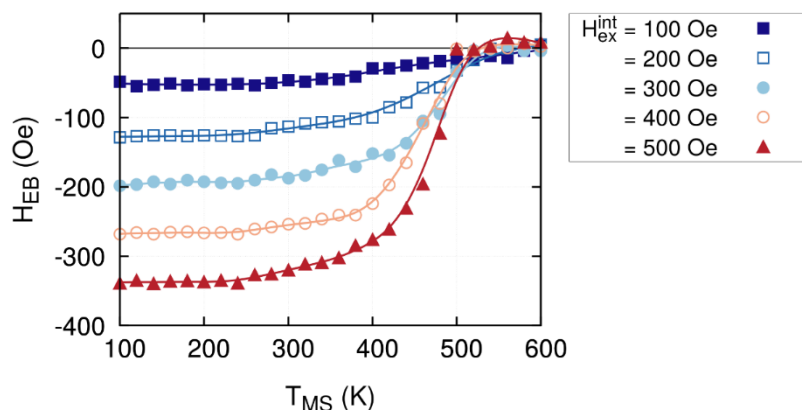
ภาพประกอบ 4.36 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ H_{EB} ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF แตกต่างกัน

จากความสัมพันธ์ในภาพประกอบ 4.36(ก) ทำให้พิจารณาค่า T_B ของระบบโครงสร้างวัสดุที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม AF แตกต่างกันได้แสดงดังภาพประกอบ 4.36(ข) เมื่อทำการพล็อต

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์ม AF ตั้งแต่ 4 nm ถึง 12 nm และค่า T_B ในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของค่า T_B เพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T_B = K_{AF}V_{AF}/25k_B$ [25] สอดคล้องกับผลการคำนวณในส่วนของขนาดของเกรนแม่เหล็กดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} เมื่อปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันเพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทของปริมาณ H_{ex}^{int} ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นได้ ในกรณีนี้ได้ทำการคำนวณค่า H_{EB} ที่อุณหภูมิ T_{MS} ใดๆ ตั้งแต่ 100 K จนถึง 680 K โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 K เมื่อกำหนดให้ปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 Oe จนถึง 500 Oe และเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 Oe จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณ H_{EB} จะมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณ H_{ex}^{int} แสดงดังภาพประกอบ 4.37(ก) เนื่องจากระบบที่มีค่า H_{ex}^{int} สูงจะแสดงถึงความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้น เมื่อต้องการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM จำเป็นต้องใช้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีขนาดเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเอาชนะอันตรกิริยาระหว่างชั้นวัสดุดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณค่า T_B ที่ค่า H_{ex}^{int} ต่างๆ และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองโดยที่แกน x แทนค่า H_{ex}^{int} และแกน y แทนค่า T_B แสดงดังภาพประกอบ 4.37(ข) พบว่าในกรณีที่ระบบมีปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า T_B ลดลงโดยผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของแคร็กและคณะ (B. Craig *et al.*) [36]

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยภายในและปัจจัยทางกายภาพของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe โดยใช้แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่รวมผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF แสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่า H_{EB} และค่า T_B ซึ่งถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนให้แนวโน้มที่มีความถูกต้องสอดคล้องกับผลการทดลอง [29], [135] และสามารถอธิบายผลการคำนวณตามทฤษฎี [36], [37] ของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้เป็นอย่างดี ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ซึ่งถูกนำเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสามารถนำมาใช้ในการทำนายลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้



ภาพประกอบ 4.37 (ก) ผลกระทบของอุณหภูมิ T_{MS} ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ H_{EB} ในกรณีที่ ปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า T_B ในระบบที่มีปริมาณ H_{ex}^{int} แตกต่างกัน

แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของ กระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ร่วมด้วยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษา ผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างของชั้น AF และชั้น FM และผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อ ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนดังที่อธิบายข้างต้น จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถ ทำนายพฤติกรรมการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้อย่างถูกต้องสอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐาน และผลการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ยังคงมีข้อจำกัดในส่วนของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัส- แลกเปลี่ยน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและปริมาณ H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชัน ของอุณหภูมิที่มีลักษณะเป็นวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (conventional measurement procedure)

โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณ H_{EB} จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ด้วยอุณหภูมิที่ค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิโนลของชั้น AF

นอกจากนี้ยังพบว่า การคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสตามวิธีการวัดแบบดั้งเดิมยังทำให้ไม่สามารถทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสและค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนซ้ำเดิมได้ (non-reproducible exchange bias) เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่รบกวนระบบขณะทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสหรือปรากฏการณ์เทรนนิ่ง (training effect) [131] ข้อจำกัดดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้โดยการประยุกต์ใช้ York protocol [25] ในการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 ดังนั้นในลำดับถัดไปจะได้นำเสนอวิธีการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนให้มีความสอดคล้องตาม York protocol และประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวสำหรับการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

4.5 แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol

York protocol [25] เป็นวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกลำเสนอขึ้นเพื่อให้สามารถทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้โดยปราศจากผลกระทบของอุณหภูมิที่เข้ามารบกวนระบบ จากการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วย York protocol [36], [133] พบว่าสามารถวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสได้เท่ากันเสมอแม้ว่าจะทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่อุณหภูมิเดิมซ้ำหลายครั้ง เนื่องจากลูปวงปิดฮิสเทอริซิสจะถูกวัดในช่วงอุณหภูมิที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง (non-activation temperature, T_{NA}) ซึ่งแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อน (AF free of thermal activation) ทำให้สามารถพิจารณาค่า H_{EB} และค่ากลางของอุณหภูมิกีดกัน (median blocking temperature, $\langle T_B \rangle$) ที่แน่นอนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 นอกจากนี้ยังพบว่า การวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้างวัสดุสองชั้น AF/FM ด้วย York protocol ยังช่วยให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้โดยไม่ต้องทำการกระตุ้นการจลน์ทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของชั้น AF ซึ่งจะไม่ทำลายลักษณะโครงสร้างบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ [132] การพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1 York protocol

การวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วย York protocol สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิการวัด (measurement temperature, T_{MS}) ที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องและขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) ที่ต้องการพิจารณาซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่า T_{ACT} และการพิจารณาหาค่ากลางของอุณหภูมิที่ติดกัน (T_B) ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

สำหรับรายละเอียดการพิจารณาหาค่า T_{MS} ที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 และสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการให้ความร้อนต่อชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยอุณหภูมิการกำหนดทิศทาง (setting temperature, T_{SET}) ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H เป็นเวลา 90 นาที
2. ทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{NA} ใดๆ ในขณะที่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H
3. เมื่อลดอุณหภูมิของระบบลงจนมีค่าเท่ากับ T_{NA} ใดๆ ให้ทำการให้สนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีลูปที่หนึ่ง
4. จากนั้นให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-2 และให้สนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 30 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีลูปที่สอง
5. หากลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีลูปที่หนึ่งและลูปที่สองยังไม่เกิดการซ้อนทับกันให้ทำการวัดลูปวงปิดอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิ T_{NA} ใดๆ ที่มีค่าลดต่ำลงและทำซ้ำกระบวนการเดิม (trial and error) จนกระทั่งลูปวงปิดทั้งสองเกิดการซ้อนทับกัน

เมื่อใดก็ตามที่เกิดการซ้อนทับกันของลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีลูปที่หนึ่งและลูปที่สอง ค่าอุณหภูมิ T_{NA} ที่ทำให้ลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีทั้งสองซ้อนทับกันจะถูกพิจารณาเป็นอุณหภูมิ T_{MS} ที่ไม่มีผลกระทบของความร้อนภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อใช้สำหรับการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีในลำดับถัดไป สำหรับรายละเอียดการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้นซึ่งถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการให้ความร้อนต่อชิ้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยอุณหภูมิ T_{SET} ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก $+H$ เป็นเวลา 90 นาที
2. ทำการลดอุณหภูมิของระบบให้ค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{MS} ที่พิจารณาได้
3. ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ $-H$ เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสลูป
4. เพิ่มอุณหภูมิที่ต้องการพิจารณาซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิที่มีการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) เป็นระยะเวลา 30 นาที
5. ลดอุณหภูมิของระบบให้กลับเข้าสู่ T_{MS} อีกครั้งและเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนอีกครั้งจนเกิดเป็นลูปวงปิดฮิสเทอริซิส

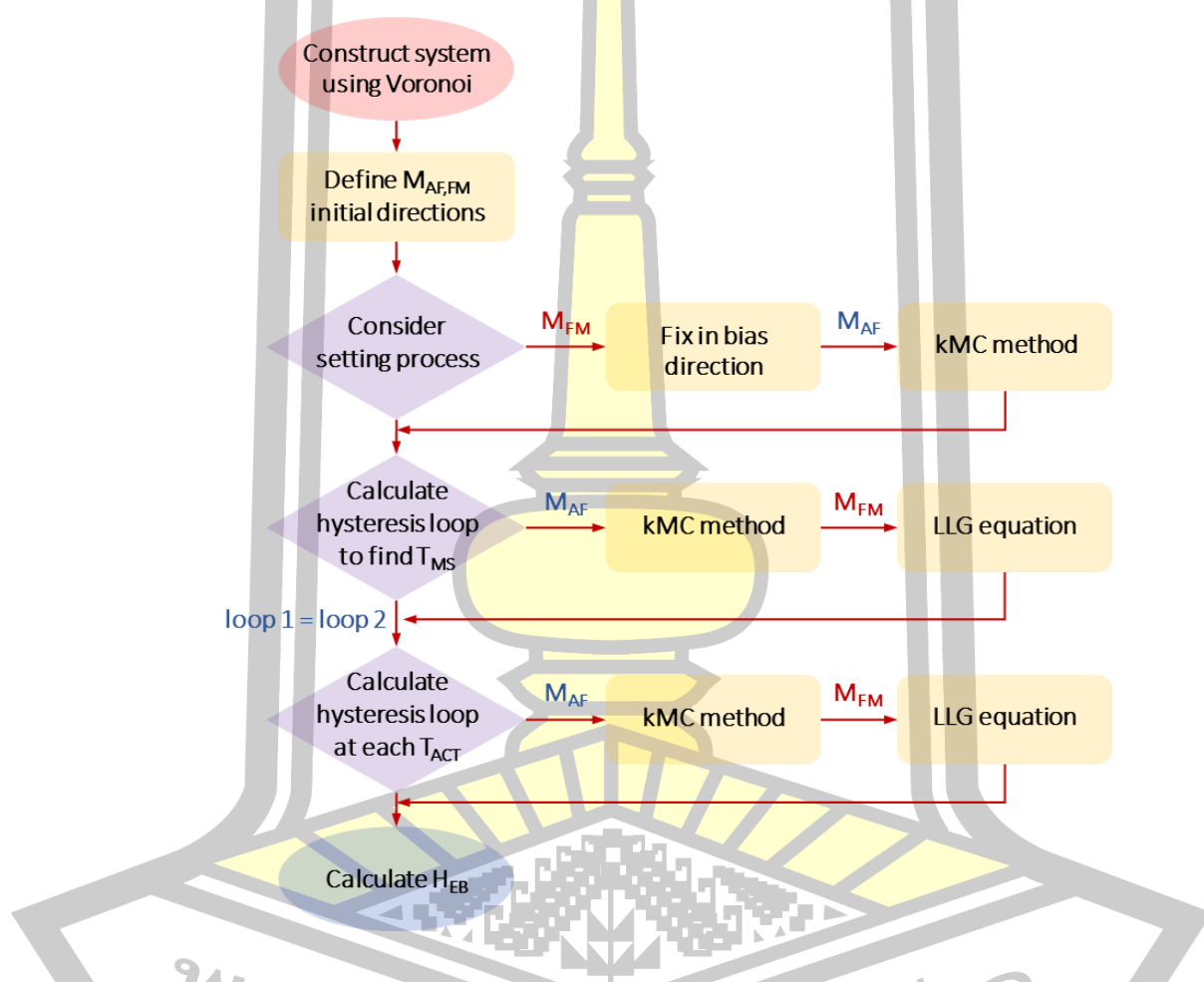
การวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสตาม York protocol พบว่าแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อน (AF free of thermal activation) ทำให้สามารถพิจารณาค่า H_{EB} ที่แน่นอนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้แม้ว่าจะมีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสซ้ำอีกหลายครั้ง

4.5.2 การจำลองวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสตาม York protocol

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงจำลองวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสตาม York protocol เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาลักษณะทางความร้อนของโครงสร้างชิ้นไบอัสแลกเปลี่ยน โดยนำเอาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชิ้นไบอัสแลกเปลี่ยนดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4 มาพัฒนาโดยเพิ่มลำดับการคำนวณให้มีความสอดคล้องกับวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิสตาม York protocol

ภาพประกอบ 4.38 แสดงลำดับการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชิ้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุทั้งสองชั้นด้วยโปรแกรมโวลโรนอย จากนั้นกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันเพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในระหว่างกระบวนการกำหนดทิศทางในขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM ถูกพิจารณาให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน $+y$ จากนั้นเริ่มขั้นตอนการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิการวัดลูปวงปิดฮิสเทอริซิส T_{MS} ที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของชิ้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์เชื่อมโยงสมการ LLG ซึ่งรายละเอียดการคำนวณถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.2 และ

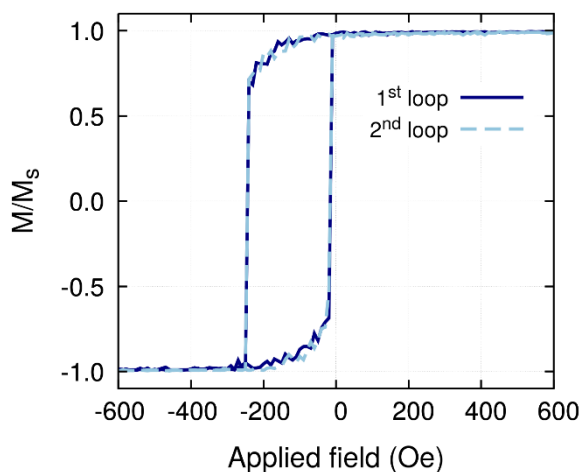
หัวข้อ 4.3.3 ตามลำดับ ภายหลังจากที่สามารถพิจารณาหาค่าอุณหภูมิ T_{MS} ได้แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ด้วยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์เชื่อมโยงกับสมการ LLG จากนั้นในลำดับสุดท้ายจะได้ทำการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} จากลูปวงปิดฮิสเทอริซิสที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาหาค่ากลางของอุณหภูมิก็ตักัน (T_B) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.38 แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนตามวิธี York protocol

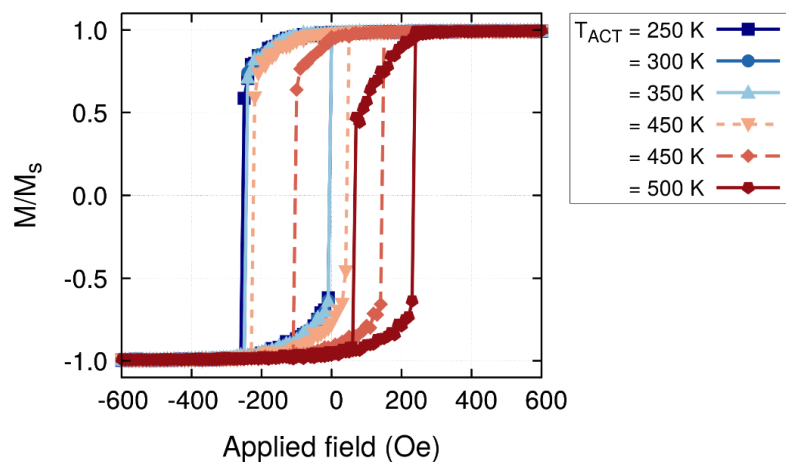
ในลำดับแรกจะเริ่มการพิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยอุณหภูมิการกำหนดทิศทางเท่ากับ $T_{SET} = 600$ K เป็นเวลาเท่ากับเวลาการให้ความร้อน $t_{anneal} = 5400$ s จากนั้นทำการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิการวัดที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง T_{MS} ซึ่งนิยามจากการซ้อนทับกันของลูปวงปิดฮิสเทอริซิส กล่าวคือ ลูปวงปิดฮิสเทอริซิส

ที่สามารถคำนวณได้ทั้งสองลูปมีปริมาณเคอเออร์ชีวิตในทางด้านซ้ายและทางด้านขวาเท่ากัน ภาพประกอบ 4.39 แสดงตัวอย่างการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน IrMn/CoFe โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กและค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างซึ่งได้สรุปไว้ในตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ จากผลการคำนวณพบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสทั้งสองลูปเกิดการซ้อนทับกันมีค่าเท่ากับ $T_{MS} = 100$ K ดังนั้นในขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} สำหรับกรณีศึกษานี้จะได้กำหนดค่าอุณหภูมิในการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสให้มีค่าเท่ากับ $T_{MS} = 100$ K เพื่อกำจัดผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อนที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF



ภาพประกอบ 4.39 ผลการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้าง IrMn/ CoFe สองลูปที่ซ้อนทับกัน ณ อุณหภูมิที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเท่ากับ $T_{MS} = 100$ K

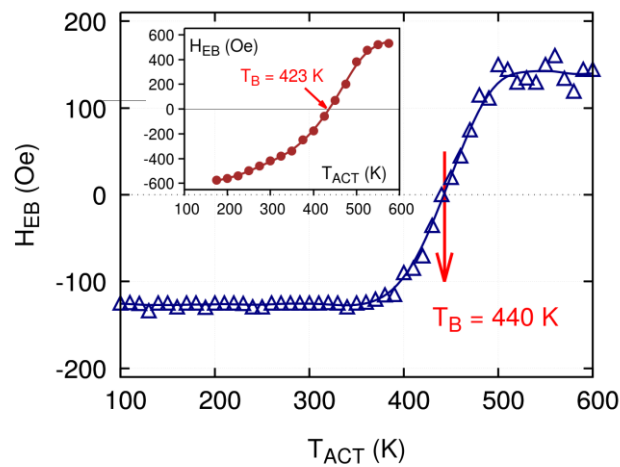
ในลำดับต่อมาทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่เป็นฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ใดๆ ณ ค่าอุณหภูมิ $T_{MS} = 100$ K ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} และค่ากลางของอุณหภูมิวิกฤต (T_B) ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีความถูกต้องได้ ภาพประกอบ 4.40 แสดงผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ตั้งแต่ 250 K ถึง 500 K โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 K จากภาพจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเท่ากับ 250 K ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปในทิศทาง $-H$ และเมื่อค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าลูปวงฮิสเทอรีซิสจะมีแนวโน้มการเคลื่อนที่กลับเข้าสู่แกนสมมาตรและเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปในทิศทาง $+H$ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น AF เกิดการกลับทิศทางไปในทิศตรงกันข้ามกับทิศทางเริ่มต้น



ภาพประกอบ 4.40 ผลการเปรียบเทียบลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้าง IrMn(8nm)/CoFe(4nm) ที่ทำการวัดด้วยอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ที่แตกต่างกัน

ผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอริซิสของโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยน IrMn(8nm)/CoFe(4nm) ที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ใดๆ ในภาพประกอบ 4.40 ทำให้สามารถยกตัวอย่างการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ได้ดังภาพประกอบ 4.41 จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าต่ำกว่า 440 K ปริมาณ H_{EB} จะค่าติดลบและมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าบวกเมื่ออุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้น AF ที่ได้รับการกระตุ้นทางความร้อนด้วยค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับค่ากลางของอุณหภูมิวิกฤต (T_B) ของระบบจะสามารถพิจารณาได้จากจุดตัดแกน x หรือค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ที่ส่งผลทำให้ปริมาณ H_{EB} ของโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ $H_{EB} = 0$ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยน IrMn(8nm)/CoFe(4nm) ที่มีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กแสดงดังตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ ได้ให้ค่า $\langle T_B \rangle = 440$ K ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยนดังกล่าวนี้มีความสามารถทนต่ออิทธิพลทางความร้อนได้เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 440 K

นอกจากนี้ยังพบว่าผลการคำนวณค่า $\langle T_B \rangle$ ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบออสแลกเปลี่ยนตาม York protocol ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองวัดค่า $\langle T_B \rangle$ ในโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยน NiFe(30nm)/Ru(1nm)/IrMn(6nm)/CoFe(5nm)/Ta(3nm) ด้วย York protocol โดย G. Vallejo-Fernandez และคณะ [133], [135] ดังภาพเล็กด้านใน (inset) ของภาพประกอบ 4.41 ซึ่งพบว่าสามารถวัดค่า $\langle T_B \rangle = 423$ K



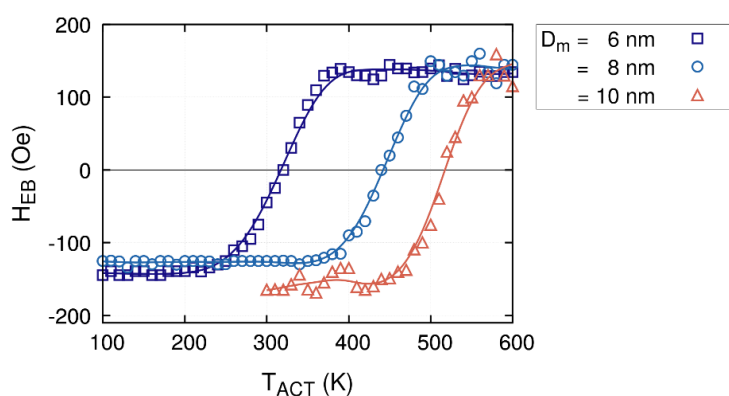
ภาพประกอบ 4.41 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า H_{EB} ตาม York protocol กับผลการทดลองวัดค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} [133], [135]

4.5.3 ผลการศึกษา

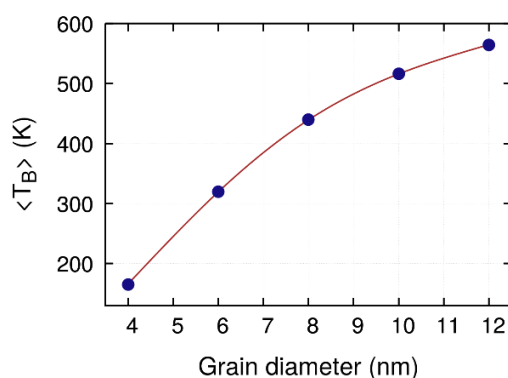
แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol จะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยภายในและผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน ได้แก่ ค่าความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ความหนาของชั้น AF ความหนาของชั้น FM ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ เป็นต้น ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} และค่า $\langle T_B \rangle$ ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับชั้น AF ที่ถูกพิจารณาในการศึกษานี้ยังคงเลือกใช้วัสดุ IrMn ในขณะที่ชั้น FM จะได้เลือกใช้วัสดุ CoFe โดยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กและโครงสร้างของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ที่ใช้สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวข้อนี้ถูกสรุปไว้ในตาราง 4.3 และตาราง 4.4 ตามลำดับ

ในลำดับแรกจะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของการออกแบบขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ภาพประกอบ 4.42(ก) แสดงผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 K ถึง 600 K โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 K เปรียบเทียบกันในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6 8 และ 10 nm เมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม AF ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 8 nm จากภาพจะเห็นได้ว่าปริมาณ H_{EB} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิ T_{ACT} โดยแสดงค่าติดลบในช่วงอุณหภูมิต่ำและแสดงค่าเป็นบวกเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูง โดยจุดตัดแกน x จะถูกพิจารณาเป็นค่า

$\langle T_B \rangle$ เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนแม่เหล็กในแนวแกน x และค่า $\langle T_B \rangle$ ในแนวแกน y แสดงดังภาพประกอบ 4.42(ข) จะเห็นได้ว่าค่า $\langle T_B \rangle$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T_B = K_{AF}V_{AF}/25k_B$ [25] เนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกรนแม่เหล็กมีความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น



(ก)

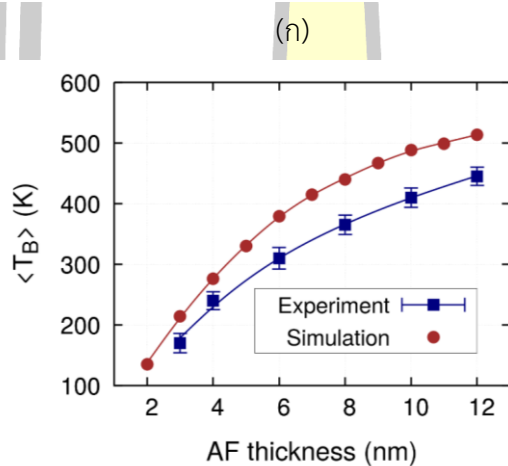
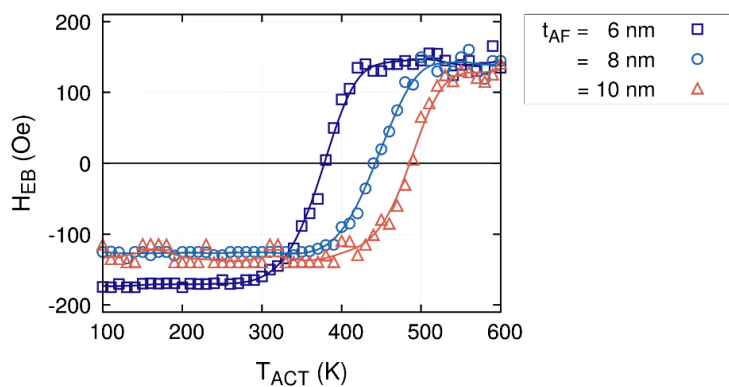


(ข)

ภาพประกอบ 4.42 (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า $\langle T_B \rangle$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนแม่เหล็ก

ในลำดับต่อมาได้ทำการพิจารณาผลกระทบของการออกแบบขนาดความหนาของชั้นฟิล์ม AF ต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไปอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe เมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม FM ถูกกำหนดให้มีขนาดคงที่เท่ากับ 4 nm และกำหนดให้ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 8 nm ในทุกกรณีศึกษา ภาพประกอบ 4.43(ก) แสดงผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะ

ฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 K ถึง 600 K โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 K เปรียบเทียบกันในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าเท่ากับ 6, 8 และ 10 nm จากภาพจะเห็นได้ว่าปริมาณ H_{EB} จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิ T_{ACT} โดยแสดงค่าติดลบในช่วงอุณหภูมิต่ำและแสดงค่าเป็นบวกเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูง โดยจุดตัดแกน x จะถูกพิจารณาเป็นค่า $\langle T_B \rangle$ ของระบบ



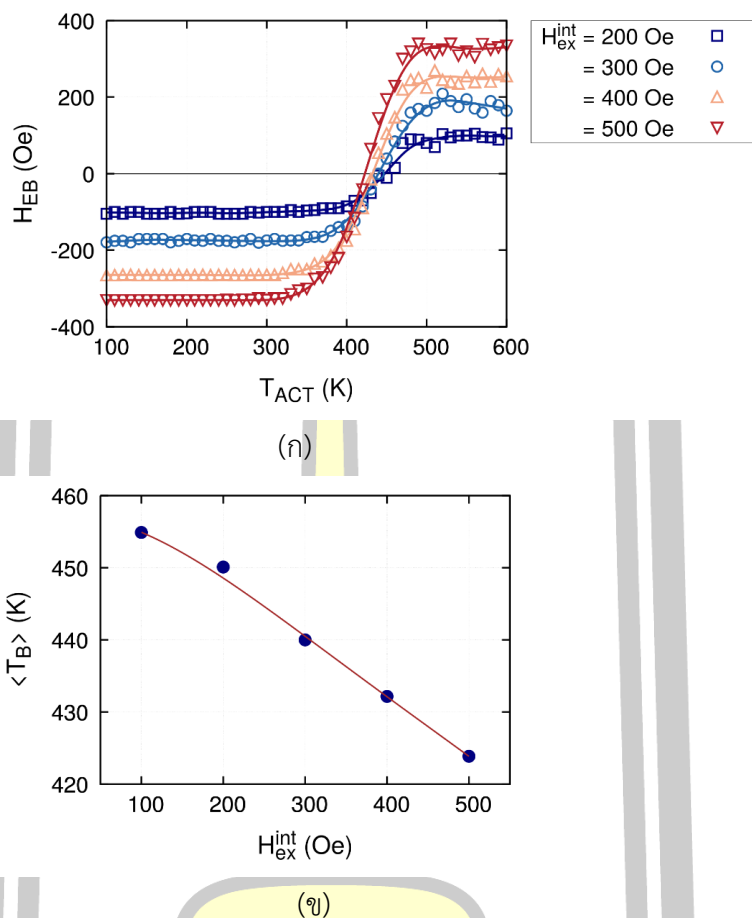
ภาพประกอบ 4.43 (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ความหนาของชั้นฟิล์ม AF มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า $\langle T_B \rangle$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาของชั้นฟิล์ม AF

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 2 nm ถึง 12 nm ในแนวแกน x และค่า $\langle T_B \rangle$ ในแนวแกน y ดังภาพประกอบ 4.43(ข) จะเห็นได้ว่าค่า $\langle T_B \rangle$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF ที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T_B = K_{AF}V_{AF}/25k_B$ [25] เนื่องจากค่าความหนาของชั้นฟิล์ม AF หรือปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกรนแม่เหล็กมีความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงขึ้นส่งผลให้ระบบมี

ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผลการคำนวณจากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของเฟอร์นานเดซและคณะ (G. Vallejo-Fernandez *et al.*) ที่ทำการทดลองวัดค่า $\langle T_B \rangle$ ในลักษณะฟังก์ชันของค่าความหนาของชั้นฟิล์ม t_{film} ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 3 nm ถึง 12 nm ในระบบโครงสร้าง Si/Cu(10nm)/CoFe(5nm)/IrMn(t_{film})/Ta(10nm) [134] ด้วยวิธี York protocol จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการคำนวณให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

ในลำดับสุดท้ายได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า H_{EB} เมื่อปริมาณความแรงสนามแม่เหล็กเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทของ H_{ex}^{int} ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้น ระบบที่ใช้สำหรับการศึกษาในกรณีนี้ได้กำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์ม AF และชั้น FM มีขนาดคงที่เท่ากับ 8 nm และ 4 nm ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดของเกรนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 8 nm ปริมาณ H_{EB} จะถูกคำนวณในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ใดๆ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 100 K ถึง 600 K โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 K โดยที่ปริมาณ H_{ex}^{int} จะถูกกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ 100 Oe จนถึง 500 Oe ซึ่งเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 Oe จากผลการศึกษาพบว่าขนาดของค่า H_{EB} จะมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณ H_{ex}^{int} แสดงดังภาพประกอบ 4.44(ก) เนื่องจากระบบที่มีค่า H_{ex}^{int} สูงจะแสดงถึงความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้น เมื่อต้องการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM เพื่อทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีความจำเป็นจะต้องใช้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีขนาดเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเอาชนะอันตรกิริยาระหว่างชั้นวัสดุดังกล่าวและเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ตามทิศทางการป้อนสนามแม่เหล็ก

นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณค่า $\langle T_B \rangle$ ที่เป็นฟังก์ชันของค่า H_{ex}^{int} ต่างๆ และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองแสดงดังภาพประกอบ 4.44(ข) โดยที่แกน x แทนค่า H_{ex}^{int} และแกน y แทนค่า $\langle T_B \rangle$ พบว่าในกรณีที่ระบบมีปริมาณ H_{ex}^{int} มากจะส่งผลให้ค่า $\langle T_B \rangle$ ลดลง เนื่องจากระบบที่มีค่า H_{ex}^{int} จะเหนี่ยวนำทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น AF และชั้น FM เกิดการกลับทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกอย่างพร้อมเพรียงกัน (coherent reversal) โดยผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของแครีกและคณะ (B. Craig *et al.*) [36] ที่ได้นำเสนอแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนและทำนายการเปลี่ยนแปลงของค่า $\langle T_B \rangle$ เมื่อปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันในระบบที่ไม่มีผลกระทบทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง



ภาพประกอบ 4.44 (ก) ผลการคำนวณค่า H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของอุณหภูมิ T_{ACT} ในกรณีที่ปริมาณ H_{ex}^{int} มีค่าแตกต่างกันและ (ข) ผลการคำนวณค่า $\langle T_B \rangle$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ H_{ex}^{int}

แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยน IrMn/CoFe แบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นมีพื้นฐานการคำนวณที่พิจารณาความเชื่อมโยงกันของระยะเวลาในการคำนวณ (timescale) ระหว่างสองวิธีการเพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสตามขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสด้วย York protocol เพื่อให้แบบจำลองมีความเสมือนจริง ผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol นำไปสู่การพิจารณาค่ากลางของอุณหภูมิกิตกัน $\langle T_B \rangle$ เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ

เสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน เช่น ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ความหนาของชั้นฟิล์ม AF และปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{int} เป็นต้น ช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทที่สำคัญของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้สอดคล้องกับผลการทดลอง [25], [134] และผลการคำนวณทางทฤษฎี [36] ได้เป็นอย่างดีซึ่งนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีเสถียรภาพทางความร้อนได้



บทที่ 5

แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

นอกจากการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่และโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล (multiscale model of read elements) ซึ่งเป็นการนำแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน (realistic granular model of exchange bias layer) ที่ถูกอธิบายไว้แล้วในบทที่ 4 มาใช้ร่วมกับแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalized spin accumulation model) เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน (spin transport behavior) และจำลองลักษณะการทำงานของหัวอ่านข้อมูลในขณะที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยพิจารณาผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) และชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) ร่วมด้วยเพื่อให้แบบจำลองแบบมัลติสเกลมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในแบบจำลองอื่นๆ ที่ใช้โดยทั่วไปจะพิจารณาเพียงองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเพียงสามชั้นเท่านั้น

ในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (spintronics devices) การจำลองพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยอาศัยรูปแบบจำลองการสะสมสปินแบบทั่วไป และการพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินแบบทั่วไป ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะนำแบบจำลองแบบมัลติสเกลที่ถูกพัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เช่น ผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน และผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอก เป็นต้น การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการส่งผ่านสปินจะถูกนำมาคำนวณความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance, GMR) และอัตราส่วน GMR (GMR ratio) ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความเสมือนจริงได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่โดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับผลการ

ทดลองวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น

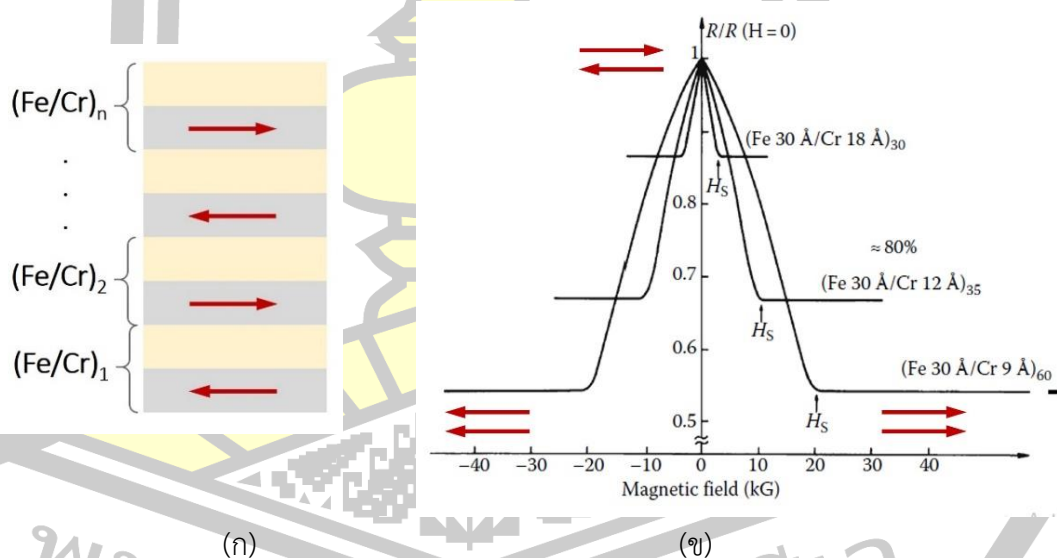
5.1 ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปิน

การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronics devices) โดยทั่วไปจะอาศัยหลักการควบคุมพฤติกรรมของประจุไฟฟ้า (electric charge) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของอิเล็กตรอน (electrons) เช่น การส่งผ่านประจุไฟฟ้า (electric charge transport) และการจัดเก็บประจุไฟฟ้า (electric charge storage) เป็นต้น [151] อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนยังมีอีกหนึ่งคุณสมบัติสำคัญที่ถูกเรียกว่า สปินของอิเล็กตรอน (electron spins) ซึ่งสามารถส่งผ่านข้อมูลได้เช่นเดียวกับประจุไฟฟ้าและสามารถควบคุมได้โดยง่ายด้วยการใช้สนามแม่เหล็กภายนอก สปินของอิเล็กตรอนถูกจำแนกออกได้เป็นสองสถานะคือ สปินขึ้น (up spin) และสปินลง (down spin) โดยสปินจะสามารถรักษาทิศทางและเริ่มมีการกลับทิศทางที่ระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length, λ_{sd}) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระยะการแพร่ของสปินจะมีค่ามากกว่าระยะเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (mean free path, $\lambda_{mfp} \sim 10$ nm) [152] นอกจากนี้ยังพบว่าสปินของอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าประจุของอิเล็กตรอนทำให้การส่งผ่านข้อมูลโดยอาศัยการส่งผ่านสปินของอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการส่งผ่านข้อมูลโดยอาศัยการส่งผ่านประจุของอิเล็กตรอน

สำหรับพฤติกรรมการส่งผ่านประจุและการส่งผ่านสปินซึ่งเป็นคุณสมบัติของอิเล็กตรอนนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เมื่อความหนาแน่นของประจุ (charge density) หรือการสะสมประจุ (charge accumulation, n) มีค่าเท่ากับผลรวมของจำนวนสปินขึ้น n_\uparrow และสปินลง n_\downarrow ภายในวัสดุ กล่าวคือ $n = n_\uparrow + n_\downarrow$ ในขณะที่ความหนาแน่นของสปิน (spin density) หรือการสะสมสปิน (spin accumulation, δm) จะมีค่าเท่ากับผลต่างของจำนวนสปินขึ้น n_\uparrow และสปินลง n_\downarrow ภายในวัสดุ กล่าวคือ $\delta m = n_\uparrow - n_\downarrow$ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการสะสมประจุจะมีค่าคงที่เสมอเนื่องจากผลรวมของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงภายในระบบมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมสปินจะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากเป็นผลต่างของจำนวนสปินขึ้นและสปินลงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกระจายตัวของปริมาณความหนาแน่นของสปินภายในระบบซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปิน (spin current) [151] จากคุณสมบัติเด่นของสปินของอิเล็กตรอนดังที่ได้กล่าวมานี้ นำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์รูปแบบใหม่ที่ได้นำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินมาประยุกต์ใช้ซึ่งถูกเรียกว่า อุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (spintronics devices) ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การส่งผ่านสปิน (spin transport phenomenon) ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ในอนาคต

5.1.1 ปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่

ปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1857 โดยทอมสัน (W. Thomson) [153] ซึ่งได้ทำการทดลองวัดค่าต้านทานของวัสดุแม่เหล็กในขณะที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุ โดยจากการศึกษาพบว่ากระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเป็นสาเหตุทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทาน (resistivity) ของวัสดุแม่เหล็ก ภายหลังจากนั้นปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กจึงได้รับการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1988 กลุ่มวิจัยของเฟิร์ตและคณะ (A. Fert *et al.*) [21] ได้ทำการทดลองวัดค่าต้านทานแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุแบบหลายชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุเหล็ก (iron, Fe) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกับวัสดุโครเมียม (chromium, Cr) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (multilayers of Fe/Cr หรือ $(\text{Fe/Cr})_n$) แสดงดังภาพประกอบ 5.1(ก) จากการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การค้นพบปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance, GMR) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต้านทานแม่เหล็ก (MR ratio) ปริมาณมากภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 5.1 (ก) โครงสร้างอย่างง่ายของวัสดุ Fe/Cr แบบหลายชั้น $(\text{Fe/Cr})_n$ (ข) ผลการวัดค่า GMR โดยกลุ่มวิจัยของเฟิร์ต [21]

เมื่อทำการวัดปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุหลายชั้นในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบซึ่งแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเหล็กแต่ละชั้นจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม (antiparallel state) พบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะทำให้สามารถวัดค่า GMR

ได้สูง อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวัดปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุหลายชั้นในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่ระบบจะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเหล็กแต่ละชั้นจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (parallel state) โครงสร้างดังกล่าวจึงให้ค่า GMR ที่ต่ำแสดงดังภาพประกอบ 5.1(ข) จากการศึกษาพบว่าปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์การกระเจิง (scattering effect) ของสปินของอิเล็กตรอนตัวนำภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุโดยค่าต้านทานแม่เหล็กที่สามารถวัดได้จะมีค่าแปรผันตามผลการกระเจิงของสปิน [21], [130], [154] โดยในกรณีที่สปินมีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก สปินจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุได้ง่ายเนื่องจากมีการกระเจิงของสปินที่ต่ำ แต่ในกรณีที่สปินมีทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็ก สปินจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุได้ยากเนื่องจากมีการกระเจิงของสปินที่สูง

การพิจารณาค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่สามารถอธิบายได้ในระบบโครงสร้างวัสดุสามชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้นซึ่งถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic material, NM) หรือโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ (current perpendicular to the plane) [152], [155] สำหรับกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันดังแสดงในภาพประกอบ 5.2(ก) จะเห็นได้ว่ากระแสสปินที่มีทิศทางขึ้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ได้ง่ายทำให้ปริมาณค่าต้านทานในกรณีนี้มีค่าต่ำ ในขณะที่กระแสสปินที่มีทิศทางลงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ได้ยากเนื่องจากสปินและแมกนีไทเซชันของชั้น FM1 และชั้น FM2 มีทิศทางแตกต่างกันส่งผลทำให้เกิดการกระเจิงของกระแสสปินที่สูง และส่งผลทำให้ปริมาณค่าต้านทานในกรณีนี้มีค่าสูง ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาปริมาณค่าต้านทานรวมของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก FM1/NM/FM2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (resistance of parallel state, R_p) จะได้ว่า

$$R_p = \frac{2R_\uparrow R_\downarrow}{R_\uparrow + R_\downarrow} \quad (5.1)$$

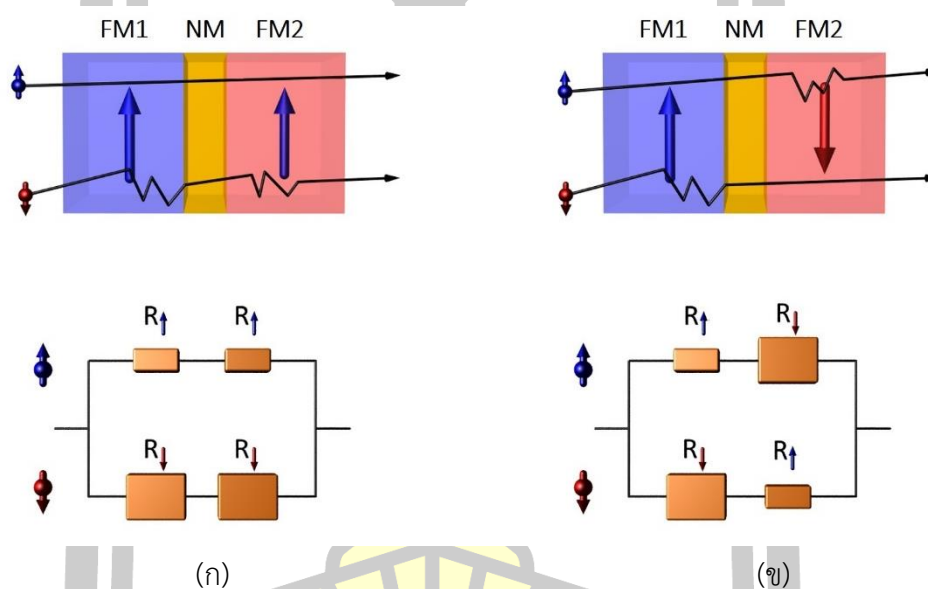
เมื่อ R_\uparrow คือ แชนเนลของสปินขึ้น (spin-up channel) ซึ่งแสดงแทนค่าต้านทานที่ต่ำ

R_\downarrow คือ แชนเนลของสปินลง (spin-down channel) ซึ่งแสดงแทนค่าต้านทานที่สูง

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ในแนวตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุสำหรับกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามแสดงในภาพประกอบ 5.2(ข) จะเห็นได้ว่ากระแสสปินที่มีทิศทางขึ้น

จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้น FM1 ได้โดยง่าย แต่จะเกิดการกระเจิงของสปินในชั้น FM2 เนื่องจากสปินและแมกนีไทเซชันของชั้น FM2 มีทิศทางแตกต่างกัน ในขณะที่กระแสสปินที่มีทิศทางลงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้น FM1 ได้ยากเนื่องจากสปินและแมกนีไทเซชันของชั้น FM2 มีทิศทางแตกต่างกันส่งผลทำให้เกิดการกระเจิงของสปิน และเมื่อสปินเคลื่อนที่ไปยังชั้น FM2 จะเห็นได้ว่ากระแสสปินที่มีทิศทางลงจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้น FM2 ได้โดยง่าย ทำให้สามารถพิจารณาค่าต้านทานรวมของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก FM1/NM/FM2 ในกรณีแมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม (resistance of antiparallel state, R_{AP}) ได้ดังนี้

$$R_{AP} = \frac{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}}{2} \quad (5.2)$$



ภาพประกอบ 5.2 ลักษณะการกระเจิงของสปินขึ้นและสปินลงเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าในแนวตั้งฉากผ่านโครงสร้างวัสดุและแบบจำลองวงจรค่าต้านทานอย่างง่าย (simple resistor network model) ของโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวใน (ก) ทิศทางเดียวกันและ (ข) ทิศทางตรงกันข้าม [152], [155], [156]

ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถวัดค่าต้านทานแม่เหล็กในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามได้สูงกว่าในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นค่า GMR ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็ก ΔR จะสามารถพิจารณาได้จากผลต่าง

ระหว่างค่าต้านทานของทั้งสองสถานะ R_{AP} และ R_P เทียบกับค่าต้านทานในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน R_P ดังนี้

$$GMR = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{(R_{\downarrow} - R_{\uparrow})^2}{4R_{\downarrow}R_{\uparrow}} \quad (5.3)$$

เมื่อ R_P คือ ค่าต้านทานรวมของโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

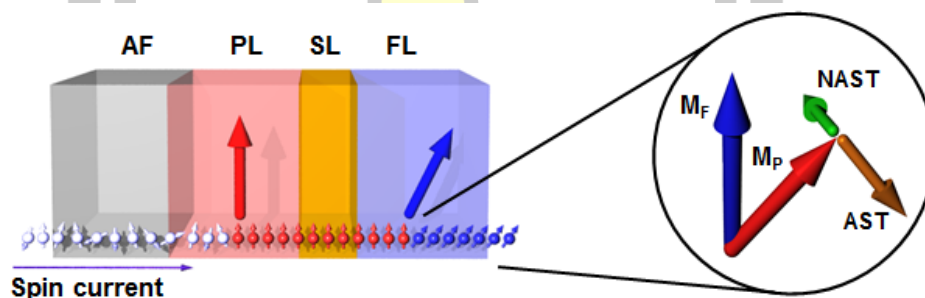
R_{AP} คือ ค่าต้านทานรวมของโครงสร้างวัสดุ FM1/NM/FM2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FM1 และชั้น FM2 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

5.1.2 การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์

จากการศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กซึ่งนำไปสู่การค้นพบปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ทำให้ปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่และปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ [24], [155], [157] ยกตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drives, HDD) และเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลของหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistive random access memory, MRAM) เป็นต้น เซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์วดังแสดงในภาพประกอบ 5.3 จะประกอบด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้นแบ่งออกเป็นชั้นพิน (pinned layer, PL) และชั้นฟรี (free layer, FL) ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (non-magnetic material) หรือชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer, SL) โดยแมกนีไทเซชันในชั้น PL จะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) หรือปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [16], [17], [25] เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ออกจากบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูลดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลไว้แล้วในหัวข้อ 2.1.3

เซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลอาศัยหลักการทำงานโดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างสปินวาล์ว จากนั้นจะเกิดการแลกเปลี่ยนปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นพลังงาน (s-d exchange interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electron) ของกระแสสปิน (spin current) ที่ระดับพลังงานชั้น s และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็ก (local magnetization) ที่ระดับพลังงานชั้น d ซึ่งการเกิดอันตรกิริยานี้จะนำไปสู่ปรากฏการณ์สปินทอร์ก (spin torque

effect) หรือการส่งผ่านสปินโมเมนตัม (spin momentum transfer) [158], [159] แสดงดังภาพประกอบ 5.3 จากภาพจะเห็นได้ว่ากระแสสปินที่เคลื่อนที่ผ่านชั้น PL จะถูกโพลาไรซ์ไปในทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL เรียกว่า กระแสสปินโพลาไรซ์ (polarized spin current, \vec{M}_p) เมื่อกระแสสปินโพลาไรซ์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสเปสเซอร์ไปยังชั้น FL พบว่ากระแสดังกล่าวจะทำหน้าที่ตรวจจับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL (FL magnetization, \vec{M}_F) โดยในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น FL มีทิศทางแตกต่างกับแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL จะส่งผลทำให้เกิดทอร์กกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FL เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์ \vec{M}_p และแมกนีไทเซชันในชั้นฟรี \vec{M}_F และนำไปสู่การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) โดยอาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance, GMR) [21] และปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กจากการทะลุผ่าน (tunneling magnetoresistance, TMR) [22] โดยปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL [15], [23], [24] จากนั้นค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะถูกทำการขยายสัญญาณและอ่านข้อมูลออกมาในลักษณะไบนารีบิต (binary bits) หรือบิต 0 และบิต 1 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5.3 ปรากฏการณ์สปินทอร์กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างวัสดุและแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL

โดยทั่วไปสปินทอร์กที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันจะประกอบด้วยสองส่วนคือ อะเดียร์บาติกทอร์ก (adiabatic torque, AST) และนอนอะเดียร์บาติกทอร์ก (non-adiabatic torque, NAST) สำหรับอะเดียร์บาติกทอร์กจะเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์ที่มีทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น PL กับแมกนีไทเซชันในชั้น FL โดยที่อะเดียร์บาติกทอร์กจะมีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบของกระแสสปินโพลาไรซ์ \vec{M}_p และแมกนีไทเซชันในชั้นฟรี \vec{M}_F แสดงดังลูกศรสีน้ำตาล ส่วนนอนอะเดียร์บาติกทอร์กเป็นทอร์กที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันให้มีแนวโน้มจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบดังลูกศรสีเขียวที่แสดงในภาพประกอบ 5.3 ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรม การส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นหรือโครงสร้างสปินวาล์วจะสามารถนำมา

ประยุกต์ใช้กับการออกแบบเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลได้ โดยกระแสที่ทำการป้อนเพื่อตรวจจับสัญญาณทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL จะต้องมีความที่เหมาะสม เนื่องจากการป้อนกระแสที่น้อยเกินไปจะทำให้กระแสสปินโพลารไรซ์ไม่สามารถจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของชั้น PL ซึ่งอาจทำให้เกิดการตรวจจับสัญญาณที่ผิดพลาด ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการป้อนกระแสที่มากเกินไปจะเกิดทอร์กไปกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL และส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL เนื่องจากผลของสปินทอร์กนำไปสู่การเกิดข้อผิดพลาดในระหว่างการตรวจวัดสัญญาณได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลด้วยแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalized spin accumulation model) [152], [160] ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

5.2 แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน

พฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์วสามารถอธิบายได้ด้วยปริมาณทางฟิสิกส์ที่ถูกเรียกว่า การสะสมสปิน (spin accumulation, \vec{m}) ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้แสดงถึงผลต่างระหว่างจำนวนสปินขึ้น (spin up, n^\uparrow) และสปินลง (spin down, n^\downarrow) ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบ $\vec{m} = n^\uparrow - n^\downarrow$ เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะพบว่าปริมาณการสะสมสปินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งพลวัตของการสะสมสปิน ($d\vec{m}/dt$) ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalized spin accumulation model) [152], [160] ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\vec{m}}{dt} + (J/\hbar)\vec{m} \times \hat{M} = -\frac{\vec{m} - \vec{m}_\infty}{\tau_{sf}} \quad (5.4)$$

- เมื่อ J คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของอิเล็กตรอนและแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ (s-d exchange integral constant)
- \hbar คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)
- τ_{sf} คือ ระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (spin-flip relaxation time)
- \hat{M} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก
- \vec{m}_∞ คือ ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลซึ่งมีค่าเท่ากับ $\vec{m}_\infty = (n_{eq}^\uparrow - n_{eq}^\downarrow)\hat{M}$
- $n_{eq}^{\uparrow(\downarrow)}$ คือ จำนวนสปินขึ้น (ลง) ที่สภาวะสมดุล

จากสมการ (5.4) จะเห็นได้ว่าพลวัตของการสะสมสปินสามารถอธิบายได้จากเทอมการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (precession motion) ของการสะสมสปินรอบทิศทางของแมกนีไทเซชันซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยเวลา τ_{sf} และความหนาแน่นของกระแสสปิน (spin

current, \vec{j}_m) ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (electrical current density, j_e) และเทอมการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินแสดงดังสมการ

$$\vec{j}_m = \beta j_e \hat{M} - 2D_0 \left[\frac{\partial \vec{m}}{\partial x} - \beta \beta' \hat{M} \left(\hat{M} \cdot \frac{\partial \vec{m}}{\partial x} \right) \right] \quad (5.5)$$

เมื่อ

$$\beta = \frac{\sigma^\uparrow - \sigma^\downarrow}{\sigma^\uparrow + \sigma^\downarrow}$$

$$\beta' = \frac{\beta - \beta''}{1 - \beta\beta''}$$

$$\beta'' = \frac{N^\uparrow(E_F) - N^\downarrow(E_F)}{N^\uparrow(E_F) + N^\downarrow(E_F)}$$

โดยที่ j_e คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ (injected current density)

D_0 คือ ค่าคงที่การแพร่ของสปิน (diffusion constant)

β คือ ค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าการนำไฟฟ้า (spin polarization for the conductivity)

β' คือ ค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (spin polarization for the diffusion constant)

$\sigma^\uparrow(\downarrow)$ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) สำหรับสปินขึ้น(ลง)

$N^\uparrow(\downarrow)(E_F)$ คือ ค่าความหนาแน่นสถานะ (density of state) ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy) สำหรับสปินขึ้น(ลง)

เมื่อทำการพิจารณาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์หรือคำตอบทั่วไปของการสะสมสปินในสมการ (5.4) พบว่าการสะสมสปินประกอบด้วยสองส่วนหลักคือการสะสมสปินที่มีทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชันหรือส่วนประกอบตามยาว (longitudinal component, \vec{m}_\parallel) และการสะสมสปินที่มีทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันหรือส่วนประกอบตามขวาง (transverse component, \vec{m}_\perp) แสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} \vec{m}_{\parallel,1}(x) &= [m_\parallel(\infty) + [m_\parallel(0) - m_\parallel(\infty)]e^{-x/\lambda_{sd}}] \hat{b}_1 \\ \vec{m}_{\perp,2}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \cos(k_2 x) - v \sin(k_2 x)] \hat{b}_2 \\ \vec{m}_{\perp,3}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \sin(k_2 x) - v \cos(k_2 x)] \hat{b}_3 \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\text{โดยที่ } (k_1 \pm ik_2) = \sqrt{\lambda_{sf}^{-2} \pm i\lambda_j^{-2}}$$

เมื่อ $\lambda_{sf} = \sqrt{2D_0\tau_{sf}}$ คือ ระยะในการกลับทิศทางของสปิน (spin flip length)

$\lambda_j = \sqrt{2\hbar D_0/J}$ คือ ระยะการหมุนควงของสปิน (spin precession length)

$\lambda_{sdl} = \sqrt{1 - \beta\beta'}\lambda_{sf}$ คือ ระยะการแพร่ของสปินภายในวัสดุ (spin diffusion length)

สำหรับค่า $m_{\parallel}(0)$ u และ v คือค่าคงที่ที่สามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ซึ่งกำหนดให้กระแสสปินมีความต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อ b_1 คือแกนที่ขนานกับแกนที่ไทเทเชชัน b_2 และ b_3 คือแกนที่ตั้งฉากกับแกนที่ไทเทเชชัน

ในการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างเซ็นเซอร์หัวอ่าน จะต้องทำการแบ่งโครงสร้างวัสดุออกเป็นชั้นบางๆ จำนวนหลายชั้นเพื่อให้สามารถพิจารณาการสะสมสปินและกระแสสปินที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุได้อย่างถูกต้อง สำหรับการคำนวณจะกำหนดให้กระแสสปินเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นจะทำการพิจารณาการสะสมสปินและกระแสสปินที่ชั้นที่หนึ่ง และค่ากระแสสปินที่คำนวณได้จะเป็นค่าเริ่มต้นของชั้นถัดไป ทำการคำนวณค่าการสะสมสปินและค่ากระแสสปินไปเรื่อยๆ จนครบทุกชั้นในโครงสร้าง เมื่อสามารถคำนวณการสะสมสปินและกระแสสปินได้จนครบทุกชั้นย่อยจะทำให้สามารถพิจารณาหาขนาดของการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปิน (gradient of spin accumulation, $\Delta\vec{m}$) และขนาดของกระแสสปินสำหรับชั้นที่พิจารณาซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่ (resistance area, RA_i) ของแต่ละชั้นย่อย i ดังความสัมพันธ์ [45]

$$RA_i = \frac{|\Delta\vec{m}|}{|j_m|} \frac{V\Delta E}{e^2} \quad (5.7)$$

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

V คือ ปริมาตรของอะตอมหรือเกรนแม่เหล็กภายในชั้นย่อยที่พิจารณา

ΔE คือ ผลต่างของระดับพลังงานในการคำนวณค่าความหนาแน่นสถานะ (density of state, DOS) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ (meV)

e คือ ประจุอิเล็กตรอน (electron charge) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมป์ (C)

การคำนวณความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่จากสมการ (5.7) นำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมโดยการพิจารณาให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่ของชั้นย่อย i มีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมดังสมการ

$$RA = \sum_{i=1}^{n_{\text{layer}}} RA_i \quad (5.8)$$

เมื่อทำการพิจารณาความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมตามสมการ (5.8) ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (resistance area of parallel state, RA_P) และมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม (resistance area of antiparallel state, RA_{AP}) จะทำให้สามารถพิจารณาอัตราส่วนค่าต้านทานแม่เหล็ก (MR ratio) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ต้องการศึกษาได้ดังสมการ

$$\text{MR ratio [\%]} = \frac{\Delta RA}{RA_P} \times 100\% \quad (5.9)$$

โดยที่ $\Delta RA = RA_{AP} - RA_P$

เมื่อ RA_P คือ ความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน

RA_{AP} คือ ความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

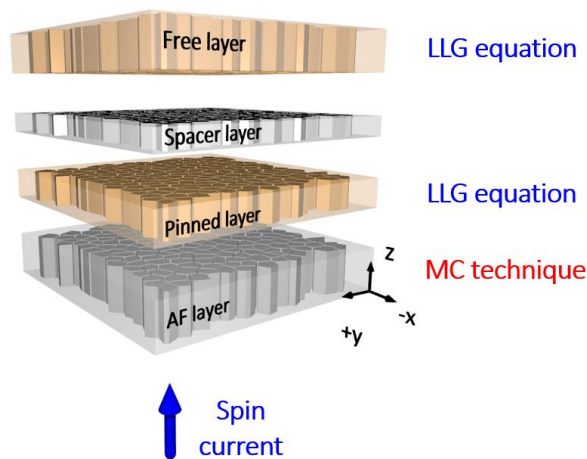
การประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินในการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินนำไปสู่การคำนวณค่าต้านทานแม่เหล็กภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นหรือโครงสร้างสปินวาล์ว [45] อย่างไรก็ตามแบบจำลองเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลที่ถูกนำเสนอขึ้นโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นการจำลองโครงสร้างสปินวาล์วอย่างง่ายที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุเพียงสามชั้น PL/SL/FL ดังนั้นเพื่อให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในระบบที่มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นได้และลดระยะเวลาในการคำนวณลง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความเสมือนจริงซึ่งประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL โดยจะได้ทำการพิจารณาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุสามชั้น PL/SL/FL ร่วมกับผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น AF และชั้น PL การพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

5.3 แบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกลซึ่งเป็นการนำแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงซึ่งถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4 มาใช้ร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2 โดยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงจะถูกนำมาใช้ในการจำลองโครงสร้างวัสดุที่ประกอบด้วยชั้น AF/FM/NM/FM และแบบจำลองการสะสมสปินจะถูกนำมา

อธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก เนื่องจากในแบบจำลองอื่นๆ ที่ใช้โดยทั่วไปจะพิจารณาเพียงองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเพียงสามชั้นเท่านั้นและละเลยการพิจารณาผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น AF และชั้น PL [45] อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการส่งผ่านสปินสำหรับชั้น AF จะไม่ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้เนื่องจากการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละแลตทิซย่อย (sublattice) ส่งผลทำให้ผลรวมของแมกนีไทเซชัน (net magnetization) ภายในชั้น AF มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุดังกล่าวนี้จะมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้

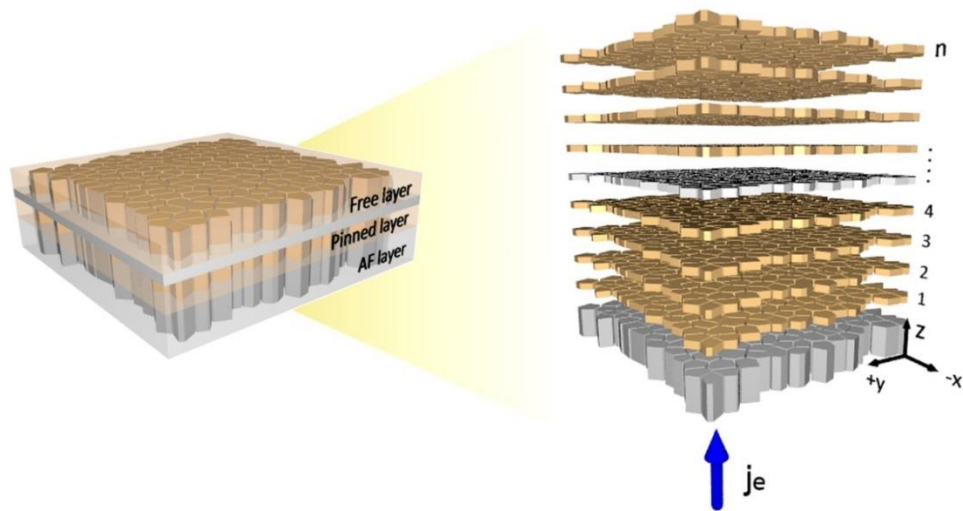
การพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะเริ่มต้นจากการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแบบหลายชั้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างโวโรนอย (Voronoi construction) โดยภายในแต่ละชั้นวัสดุจะประกอบไปด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบคอลัมน์ (columnar stack) เพื่อออกแบบและควบคุมลักษณะโครงสร้างที่ต้องการใช้สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ให้มีลักษณะที่คล้ายคลึงและใกล้เคียงกับลักษณะของชั้นฟิล์มบางแม่เหล็กจริงที่ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการสปัตเตอริงแสดงดังภาพประกอบ 5.4



ภาพประกอบ 5.4 โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ในแบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกล

เมื่อทำการจำลองลักษณะโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเป็นลำดับแรกแล้ว ในลำดับต่อมาจะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลของกระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (AF setting process) [132] เพื่อคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo) ดังที่ได้

อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.4.2 โดยแมกนีไทเซชันในชั้น AF ที่ถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการไบอัส (biasing direction, \hat{n}) ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุหรือปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น PL ด้วยสมการแลนดอว์ - ลีฟต์ชิต - กิลเบิร์ต หรือสมการ LLG ตามลำดับ จากนั้นจะได้ทำการแบ่งโครงสร้างชั้น PL/SL/FL ในแนวแกน z ออกเป็นชั้นบางๆ จำนวน n ชั้นด้วยขนาดความหนาชั้นฟิล์มย่อย (discretised film thickness, t_i) แสดงดังภาพประกอบ 5.5 เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินโดยการคำนวณค่าการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้างชั้น PL/SL/FL โดยใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2



ภาพประกอบ 5.5 โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งถูกแบ่งออกเป็นชั้นย่อยจำนวน n ชั้นเพื่อใช้สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปิน

การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้น PL และชั้น FL ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกนั้นจะถูกอธิบายด้วยสมการ LLG ดังนี้

$$\frac{\partial \hat{M}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \hat{M}_i \times \vec{H}_{\text{eff}}^i - \frac{\gamma \alpha}{(1 + \alpha^2)} [\hat{M}_i \times (\hat{M}_i \times \vec{H}_{\text{eff}}^i)] \quad (5.10)$$

- เมื่อ γ คือ ค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (absolute gyromagnetic ratio)
 α คือ ค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant)
 \hat{M}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ที่พิจารณา และ
 \vec{H}_{eff}^i คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในระบบที่พิจารณา

ปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้น PL (effective field on PL, $\vec{H}_{\text{eff}}^{\text{PL},i}$) จะประกอบด้วยปริมาณสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field) สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (intergranular exchange field) สนามความร้อน (random thermal field) และสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field) เพื่อพิจารณาผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ใช้สำหรับการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น PL อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นจะได้ละเลยการคำนวณในส่วนของปริมาณสนามแม่เหล็กหักล้างภายในวัสดุ (self-demagnetizing field) เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ โดยรายละเอียดการคำนวณปริมาณสนามแม่เหล็กแต่ละประเภทได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.3.3 นอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาผลของสนามสปินทอร์ก (spin torque field) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชัน \vec{M}_i และการสะสมสปิน \vec{m} แสดงดังสมการ

$$\mathcal{H}_{\text{st}} = -J\vec{m} \cdot \vec{M}_i \quad (5.11)$$

เมื่อ J คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนระหว่างสปินของอิเล็กตรอนและแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ (s-d exchange integral constant) ซึ่งมีค่าอยู่ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

สมการ (5.11) แสดงถึงค่าพลังงานสปินทอร์กที่พิจารณาได้จากปริมาณการสะสมสปินทำให้สามารถพิจารณาสนามสปินทอร์กได้จากการคำนวณอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพลังงานสปินทอร์กดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{st}}^i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \vec{M}} = J\vec{m}_\perp \quad (5.12)$$

เมื่อ \vec{m}_\perp คือ การสะสมสปินที่มีทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันซึ่งมีค่าอยู่ในหน่วยคูอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3)

สนามสปินทอร์กในสมการ (5.12) จะมีค่าอยู่ในหน่วย $\text{eV}\cdot\text{C}/\text{m}^3$ ดังนั้นเพื่อให้สามารถรวมผลการพิจารณาสนามสปินทอร์กเข้ากับสนามแม่เหล็กประสิทธิผลได้จะต้องทำการแปลงหน่วยของสนามสปินทอร์กในสมการ (5.12) ให้อยู่ในหน่วยเออร์สเตด (Oe) โดยการคูณค่าคงที่เข้าสู่สมการ (5.12) ดังนี้

$$\vec{H}_{\text{st}}^i = \frac{V_i J \vec{m}_\perp}{e\mu_B} \quad (5.13)$$

เมื่อ V_i คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณาซึ่งมีค่าอยู่ในหน่วยลูกบาศก์นาโนเมตร (nm^3)

e คือ ประจุอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

μ_B คือ ค่าคงที่บอร์แมกนีตรอน (Bohr magnetron) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.274×10^{-24} J/T หรือ 9.274×10^{-21} erg/Oe

ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้น PL สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{eff}}^{\text{PL},i} = \vec{H}_K^i + \vec{H}_{\text{exch}}^i + \vec{H}_{\text{th}}^i + \vec{H}_{\text{ex}}^{\text{int}} + \vec{H}_{\text{st}}^i \quad (5.14)$$

เมื่อ \vec{H}_K^i คือ สนามแอนไอโซโทรปีของเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i

\vec{H}_{exch}^i คือ สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กข้างเคียงที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i

\vec{H}_{th}^i คือ สนามความร้อนสุ่มที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i

$\vec{H}_{\text{ex}}^{\text{int}}$ คือ สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF กระทำต่อแมกนีไทเซชันชั้น PL

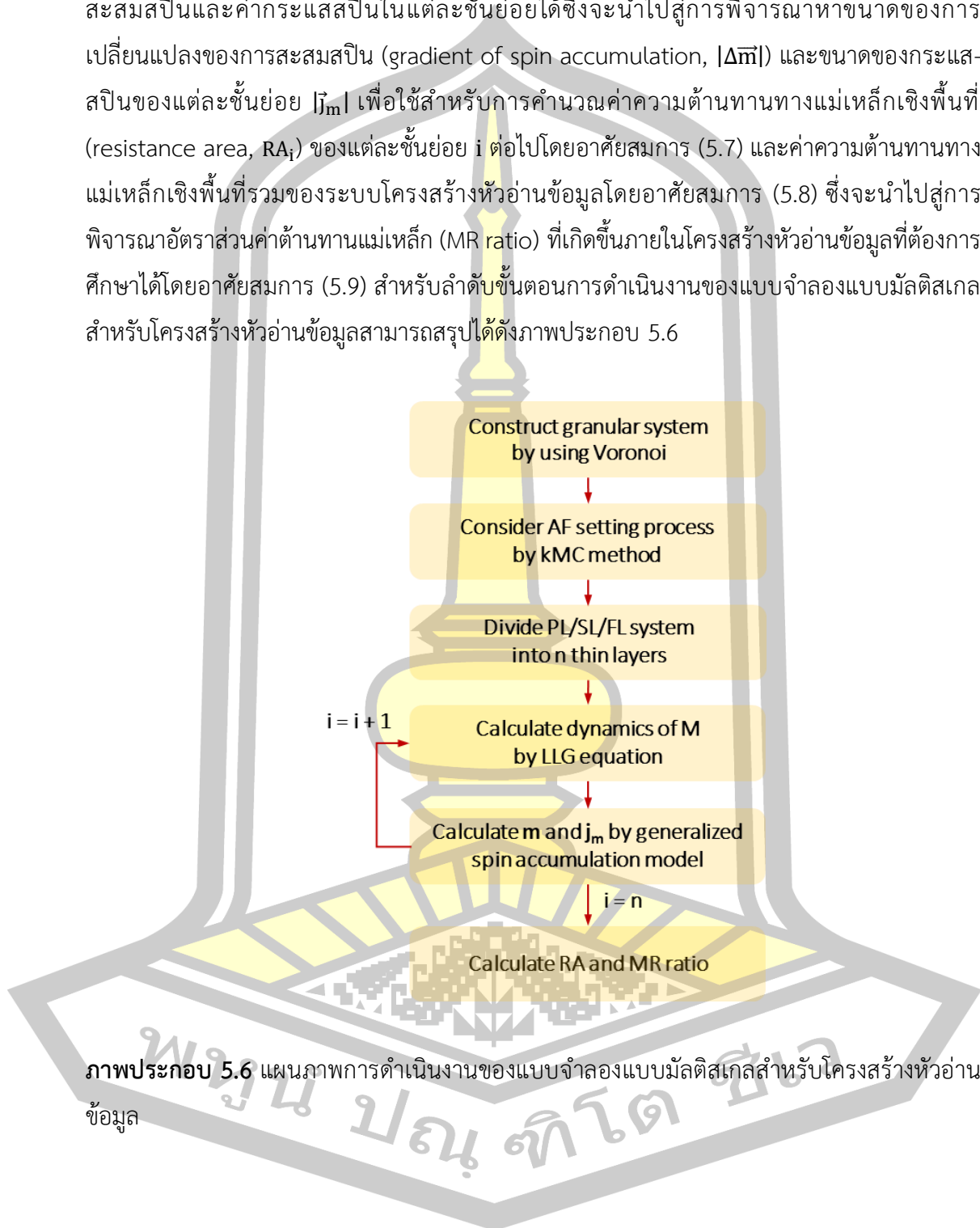
\vec{H}_{st}^i คือ สนามสปินทอร์กเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันในเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i และการสะสมสปิน

สำหรับชั้น FL พบว่าจะไม่เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนกับชั้น AF ทำให้สามารถละเลยการพิจารณาผลของสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น AF และชั้น FL ได้ ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้น FL (effective field on FL, $\vec{H}_{\text{eff}}^{\text{FL},i}$) จะประกอบด้วยปริมาณสนามแอนไอโซโทรปี สนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน สนามความร้อนสุ่ม และสนามสปินทอร์ก ดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{eff}}^{\text{FL},i} = \vec{H}_K^i + \vec{H}_{\text{exch}}^i + \vec{H}_{\text{th}}^i + \vec{H}_{\text{st}}^i \quad (5.15)$$

การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้น PL โดยอาศัยสมการ LLG จะทำให้สามารถพิจารณาทิศทางของแมกนีไทเซชันที่สภาวะสมดุลได้ โดยแมกนีไทเซชันดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณค่าการสะสมสปิน \vec{m} ภายในชั้นย่อยที่ $i = 1$ ซึ่งกำหนดให้กระแสสปินเริ่มต้นที่ถูกป้อนเข้าสู่เกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นจะทำการพิจารณาการสะสมสปินของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้นย่อยที่ $i = 1$ โดยอาศัยสมการ (5.4) และนำไปสู่การคำนวณค่ากระแสสปิน \vec{j}_m ของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในชั้นย่อยที่ $i = 1$ โดยอาศัยสมการ (5.5) ซึ่งค่ากระแสสปินที่คำนวณได้จะถูกพิจารณาให้เป็นค่าเริ่มต้นของชั้นถัดไป จากนั้นทำการคำนวณค่าการสะสมสปิน \vec{m} และค่ากระแสสปิน \vec{j}_m ของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนภายในระบับไปเรื่อยๆ $i = i + 1$ จนครบทุกชั้นในโครงสร้าง $i = n$ เมื่อสามารถคำนวณการสะสมสปินและ

กระแสสปินของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนได้จนครบทุกชั้นย่อยแล้วทำการพิจารณาหาค่าเฉลี่ยของการสะสมสปินและค่ากระแสสปินในแต่ละชั้นย่อยได้ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาหาขนาดของการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปิน (gradient of spin accumulation, $|\Delta \mathbf{m}|$) และขนาดของกระแสสปินของแต่ละชั้นย่อย $|j_m|$ เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่ (resistance area, RA_i) ของแต่ละชั้นย่อย i ต่อไปโดยอาศัยสมการ (5.7) และค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมของระบบโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลโดยอาศัยสมการ (5.8) ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาอัตราส่วนค่าต้านทานแม่เหล็ก (MR ratio) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ต้องการศึกษาได้โดยอาศัยสมการ (5.9) สำหรับลำดับขั้นตอนการดำเนินงานของแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลสามารถสรุปได้ดังภาพประกอบ 5.6



ภาพประกอบ 5.6 แผนภาพการดำเนินงานของแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

5.4 ผลการศึกษา

แบบจำลองแบบมัลติสเกลที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพิจารณาการส่งผ่านสปินที่สามารถอธิบายได้จากค่าการสะสมสปิน (spin accumulation, \tilde{m}) และค่ากระแสสปิน (spin current, \tilde{j}_m) เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อจำลองลักษณะการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจริง การพิจารณาการส่งผ่านสปินดังกล่าวจะนำไปสู่การพิจารณาค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) และอัตราส่วนค่าต้านทานแม่เหล็ก (MR ratio) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล สำหรับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมและผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็กภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบมัลติสเกลซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในหัวข้อ 5.4.1 และหัวข้อ 5.4.2 ตามลำดับ

5.4.1 การเปรียบเทียบค่าการคำนวณการสะสมสปิน กระแสสปิน และความต้านทานที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมกับแบบจำลองมัลติสเกล

การประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จำลองโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล AF/PL/SL/FL

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบทิศทางของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้น

ขั้นตอนที่ 3 แบ่งโครงสร้างชั้นวัสดุ PL/SL/FL ออกเป็นจำนวนหลายชั้นและทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาปริมาณการส่งผ่านสปิน

ขั้นตอนที่ 5 พิจารณาปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็ก

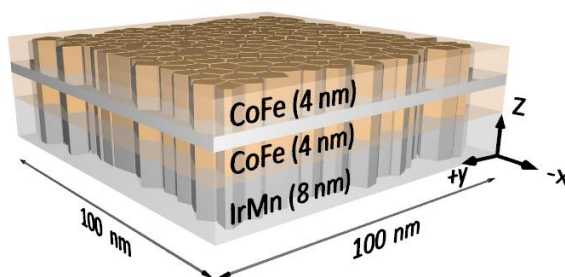
ในหัวข้อนี้จะได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบมัลติสเกลโดยการดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 – 5 และผลการคำนวณในแต่ละขั้นตอนจะถูกเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 1 จำลองโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล AF/PL/SL/FL

ในการพิจารณาการส่งผ่านสปินจะทำการจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างแสดงดังตาราง 5.1 เป็นลำดับแรกโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอยดิงแสดงในภาพประกอบ 5.7 จากภาพจะเห็นได้ว่าภายในโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้นที่ถูกจำลองขึ้นจะประกอบไปด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากและมีการจัดเรียงตัวกันแบบคอลัมน์

ตาราง 5.1 ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL

| พารามิเตอร์ | ชั้นวัสดุ | | | |
|--|-----------|-----|-----|-----|
| | AF | PL | NM | FL |
| ความกว้างของระบบในแนวแกน x (nm) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ความยาวของระบบในแนวแกน y (nm) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก D_m (nm) | 8 | 8 | 8 | 8 |
| ค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรน σ_{IND} | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (nm) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| ความหนาของชั้นฟิล์ม t_{film} (nm) | 8 | 4 | 2 | 4 |



ภาพประกอบ 5.7 โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ประกอบด้วยชั้น AF/PL/SL/FL ซึ่งถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองแบบมัลติสเกล

เมื่อทำการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก AF/PL/SL/FL ด้วยโปรแกรมไวโรนอยดิงแล้ว โครงสร้างวัสดุแต่ละชั้นจะถูกกำหนดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางแม่เหล็กของวัสดุ เช่น ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_U) ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_S) ค่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature, T_C) และความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ

(interlayer exchange field strength, H_{ex}^{int}) เป็นต้น เพื่อนำไปใช้สำหรับการคำนวณในลำดับต่อไป สำหรับชั้น AF ที่ถูกพิจารณาในการศึกษานี้จะได้เลือกใช้วัสดุอิริเดียมแมงกานีส (IrMn) ในขณะที่ชั้น PL และชั้น FL จะเลือกใช้วัสดุโคบอลต์ไอรอน (CoFe) เนื่องจากวัสดุทั้งสองประเภทมีความเหมาะสมและถูกนำมาใช้ในโครงสร้างสปีนวาล์วภายในหัวอ่านข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์-ไดรฟ์ในปัจจุบัน [132] โดยค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองที่ใช้สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น AF และชั้น FM สามารถสรุปได้ดังตาราง 5.2

ตาราง 5.2 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองสำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

| พารามิเตอร์ | ชนิดของวัสดุ | |
|---|--------------------------|-------------------------|
| | IrMn | CoFe |
| ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี K_U (erg/cm ³) | 5.56×10^6 [134] | 1.8×10^5 [140] |
| ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว M_S (emu/cm ³) | 1800 | 1800 [140] |
| ค่าอุณหภูมิวิกฤติ T_C (K) | 690 [133] | 1300 [140] |
| ความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} (Oe) | 1000 | 1000 |
| อุณหภูมิการกำหนดทิศทาง T_{SET} (K) | 600 | - |
| อุณหภูมิการวัด T_{MS} (K) | 0 | 0 |
| เวลาการให้ความร้อน t_{anneal} (s) | 5400 | 5400 |
| เวลาการกำหนดทิศทาง t_{set} (s) | 60 | 60 |

ในการศึกษาพฤติกรรมกรรมการส่งสปีนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ถูกจำลองขึ้นในงานวิจัยนี้ นอกจากจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแล้วยังต้องทำการระบุค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าสปีนโพลาไรเซชันของค่านำไฟฟ้า (spin polarization for the conductivity, β) ค่าสปีนโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (spin polarization for the diffusion constant, β') ค่าพลังงานการแลกเปลี่ยน (s-d exchange integral constant, J) ระยะการแพร่ของสปีน (spin diffusion length, λ_{sd1}) ค่าคงที่การแพร่ (diffusion constant, D_0) และค่าการสะสมสปีนที่สภาวะสมดุล (equilibrium spin accumulation, m_∞) เป็นต้น เพื่อใช้การคำนวณพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านสปีนภายในวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นเช่นเดียวกัน โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุ CoFe สำหรับชั้น PL และชั้น FL รวมไปถึงค่าพารามิเตอร์

การส่งผ่านสปินของวัสดุทองแดง (copper, Cu) สำหรับชั้น SL ได้ถูกแสดงไว้ในตาราง 5.3 อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการส่งผ่านสปินสำหรับชั้น AF จะไม่ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้เนื่องจากปริมาณแมกนีไทเซชันรวมภายในชั้น AF มีค่าเป็นศูนย์

ตาราง 5.3 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุ CoFe และวัสดุ Cu

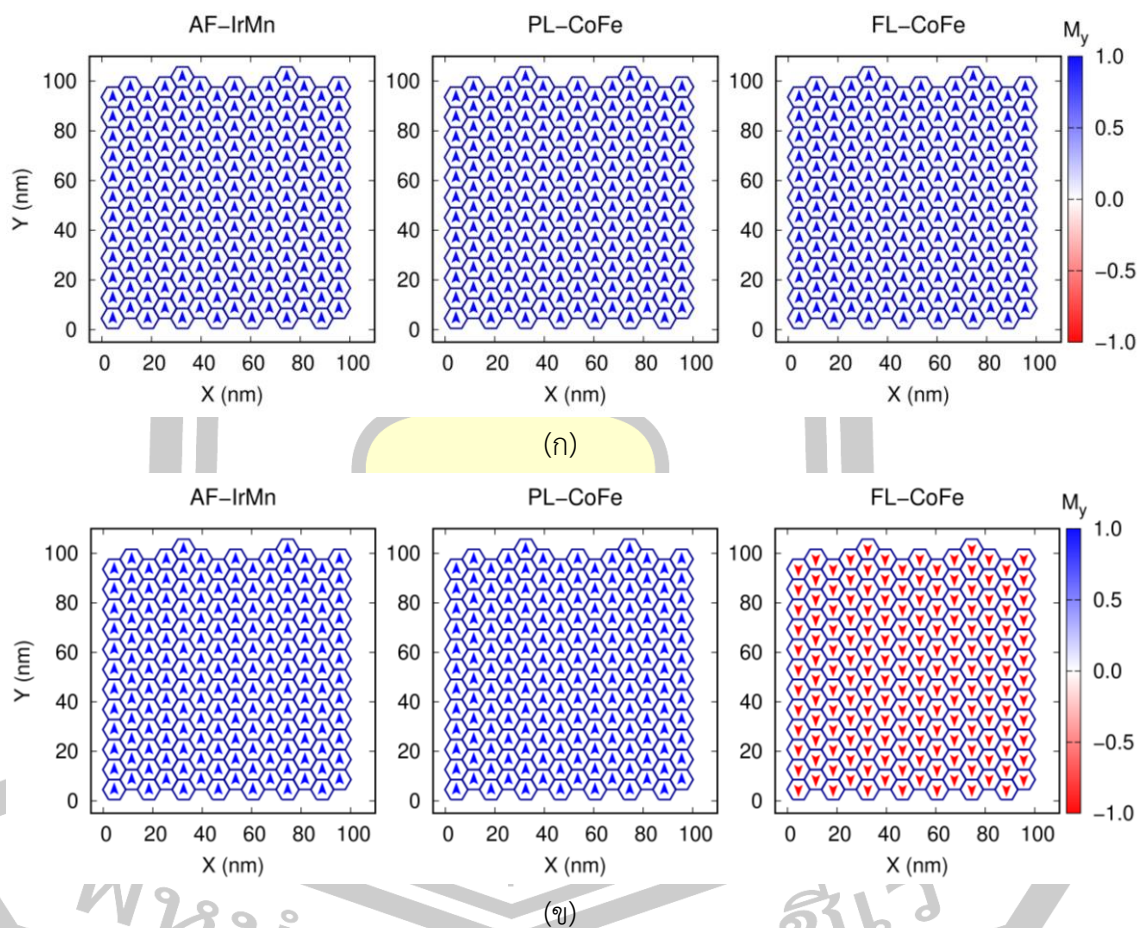
| พารามิเตอร์ | ชนิดของวัสดุ | |
|---|--------------|------------|
| | CoFe | Cu |
| ค่าสปินโพลาไรเซชันของความนำไฟฟ้า β | 0.65 [161] | 0 [45] |
| ค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ β' | 0.89 [161] | 0 [45] |
| ค่าพลังงานการแลกเปลี่ยน J (eV) | 0.1 [161] | 0 [45] |
| ระยะการแพร่ของสปิน λ_{sd} (nm) | 12 [161] | 600 [45] |
| ค่าคงที่การแพร่ D_0 (m ² /s) | 0.001 [161] | 0.005 [45] |
| ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุล m_∞ (C/cm ²) | 642.9 [161] | 0 [152] |

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบทิศทางของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้น

ในขั้นตอนนี้จะได้ทำการตรวจสอบการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นหลังจากการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองในตาราง 5.2 สำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เพื่อกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe1 ให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการไบอัส (biasing direction, \hat{n}) โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4 ซึ่งในงานวิจัยในส่วนนี้ได้กำหนดให้ \hat{n} มีทิศทางอยู่ในแนวแกน +y นอกจากนี้ยังได้ทำการกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 เพื่อใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมการส่งผ่านสปินในโครงสร้างชั้น IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 โดยโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้นจะถูกกำหนดค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุดังตาราง 5.3

ภาพประกอบ 5.8 แสดงตัวอย่างโครงสร้างแบบสองมิติของชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe ทั้งสองชั้นที่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์ทางการทดลองดังแสดงในตาราง 5.1 และตาราง 5.2 ตามลำดับ และลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นก่อนเริ่มการคำนวณพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน โดยจะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ IrMn ที่ถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวตาม

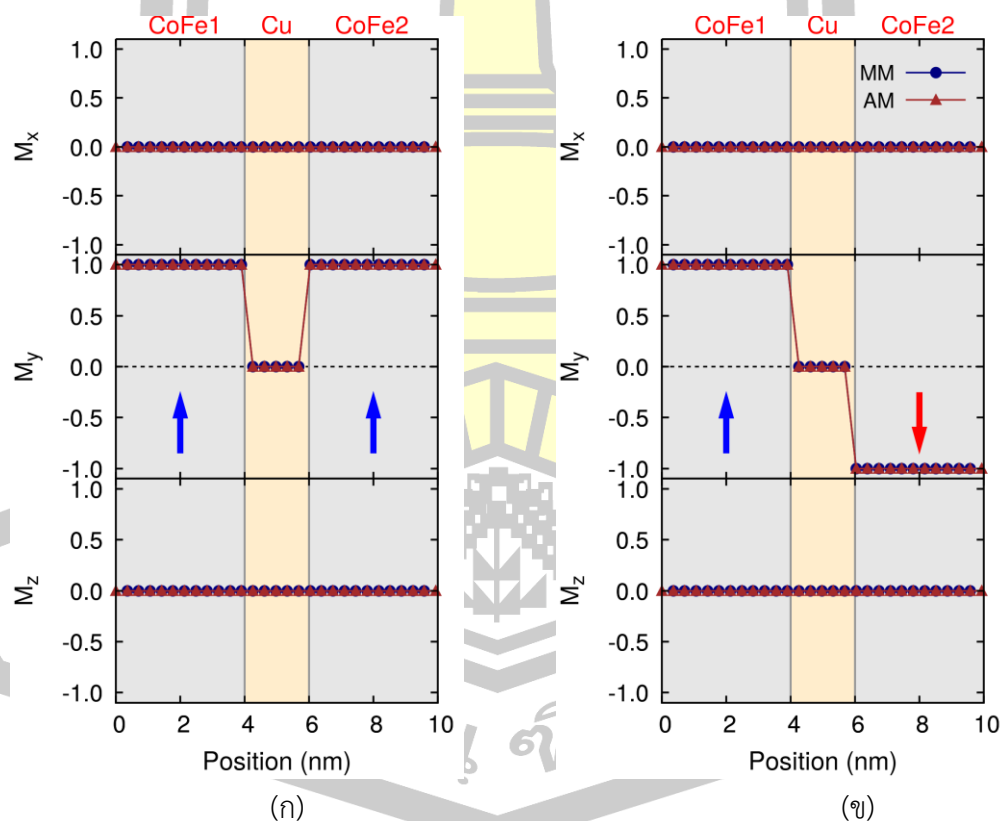
ทิศทางที่ต้องการไปอัส ธิ ในแนวแกน +y จะเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe1 มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุหรือปรากฏการณ์ไอบัสแลกเปลี่ยน ในขณะที่การกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe2 เพื่อใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมการส่งผ่านสปินของโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 จะสามารถทำได้โดยการกำหนดค่ามุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL (angle between PL and FL, θ) ตัวอย่างลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ในกรณีที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (P state, $\theta = 0^\circ$) และในทิศทางตรงกันข้าม (AP state, $\theta = 180^\circ$) กับแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL ถูกแสดงดังภาพประกอบ 5.8(ก) และ (ข) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 5.8 ลักษณะโครงสร้างแบบ 2 มิติด้านบน (top view) ที่แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันแต่ละชั้นในโครงสร้าง IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 สำหรับกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

ภาพประกอบ 5.9(ก) และ (ข) แสดงผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของเกรนแม่เหล็กทั้งหมดภายในระบบในแนวแกน x y และ z ต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/

Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกล (multiscale model, MM) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอม (atomistic model, AM) สำหรับกรณี P state และ AP state ตามลำดับ จากภาพจะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 มีลักษณะการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF ในแนวแกน +y อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากผลของปรากฏการณ์โบัสแลกเปลี่ยนส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 มีองค์ประกอบในแนวแกน +y เพียงองค์ประกอบเดียว สำหรับชั้นวัสดุ Cu พบว่าปริมาณแมกนีไทเซชันในชั้นนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจาก Cu เป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก สำหรับชั้นวัสดุ CoFe2 พบว่าแมกนีไทเซชันจะมีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน +y ในกรณี P state และมีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน -y ในกรณีที่ AP state ดังนั้นในกรณีศึกษาเบื้องต้นนี้จะไม่พิจารณาองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x และแกน z ตลอดทั้งระบบแสดงดังภาพประกอบ 5.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันต่อตำแหน่งที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับแบบจำลองในระดับอะตอมจะเห็นได้ว่า แนวโน้มการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้นให้ค่าที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีตลอดทั้งระบบ



ภาพประกอบ 5.9 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันในแนวแกน x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

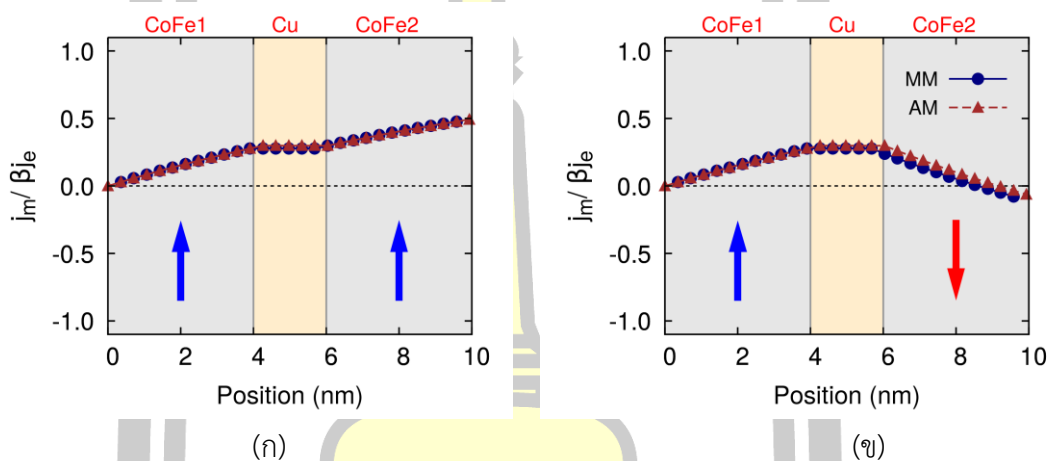
ขั้นตอนที่ 3 แบ่งโครงสร้างชั้นวัสดุ PL/SL/FL ออกเป็นจำนวนหลายชั้นและทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

ภายหลังจากขั้นตอนการตรวจสอบลักษณะการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้น ในลำดับต่อมาจะได้ทำการแบ่งโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ออกเป็นจำนวนหลายชั้นด้วยขนาดความหนาชั้นฟิล์มย่อย (discretised film thickness, t_i) เท่ากับ 0.3549 nm ซึ่งเป็นค่าคงที่แลตทิซของวัสดุ CoFe ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ fcc [162] จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้า (charge current density, j_e) ที่มีขนาดเท่ากับ 10 MA/cm² ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ [45] เข้าสู่โครงสร้างชั้นวัสดุดังกล่าว เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าการสะสมสปินและค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลโดยอาศัยสมการ (5.4) และสมการ (5.5) ตามลำดับ ผลการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินดังกล่าวนี้จะนำไปสู่การคำนวณปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กและอัตราส่วนค่าต้านทานแม่เหล็กตามลำดับ ในการศึกษานี้จะได้ทำการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินโดยไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิภายในระบบ เพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบมัลติสเกลเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอม (atomistic model) [46] ในลำดับถัดไป

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาปริมาณการส่งผ่านสปิน

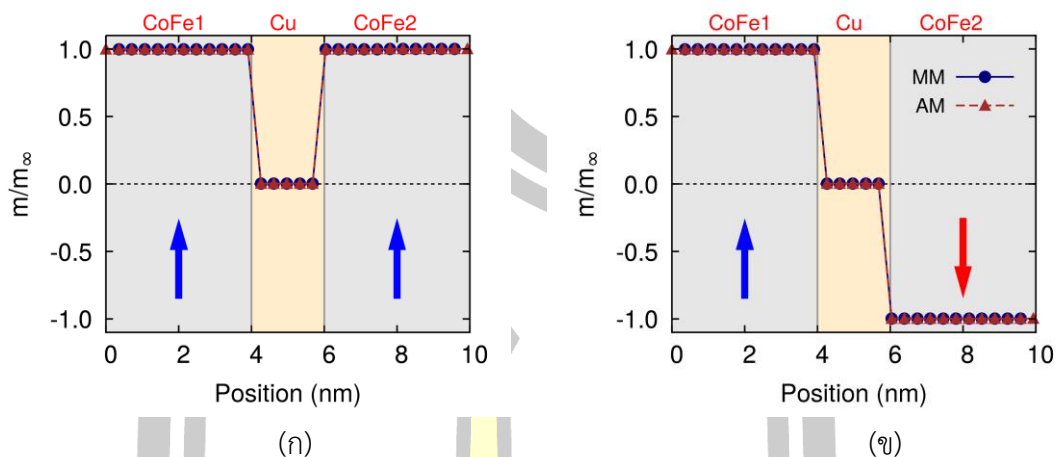
ภายหลังจากที่ได้ทำการพิจารณาค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 แล้ว ในลำดับถัดมาจะได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินที่แต่ละตำแหน่งย่อย i ของโครงสร้างดังกล่าวที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกล (multiscale model, MM) และแบบจำลองในระดับอะตอม (atomistic model, AM) โดยจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 มีการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.10(ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยค่ากระแสสปินเริ่มต้น $j_m(i=0)$ ของระบบจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อกระแสสปินเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1 พบว่ากระแสสปินจะถูกเหนี่ยวนำให้กลายเป็นกระแสสปินโพลาไรซ์ (polarized spin current) ที่มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe1 ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe1 จากภาพประกอบ 5.10 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสสปินโพลาไรซ์ภายในชั้นวัสดุ CoFe1 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งในกรณี P state และ AP state ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ จากนั้นเมื่อกระแสสปินโพลาไรซ์เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างชั้นวัสดุ Cu จะเห็น

ได้ว่าปริมาณกระแสสปินจะมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง จนกระทั่งกระแสสปินโพลาไรซ์เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe2 พบว่ากระแสสปินจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มสูงขึ้นในกรณี P state และมีแนวโน้มลดต่ำลงเข้าสู่ค่าลบในกรณี AP state ตามทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 เนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe2 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับแบบจำลองในระดับอะตอม พบว่าแบบจำลองทั้งสองประเภทให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินที่สอดคล้องกันดีเป็นยอดตลอดทั้งโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2



ภาพประกอบ 5.10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการสะสมสปินที่แต่ละตำแหน่งย่อย i ของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอม โดยจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 มีการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state โดยค่าการสะสมสปินจะถูกนอมนอลไลซ์ด้วยค่าการสะสมสปินที่สภาวะเสถียร (m_∞) ของวัสดุ CoFe ซึ่งมีค่าเท่ากับ $m_\infty = 642.9 \text{ C/cm}^3$ [161] ดังแสดงในภาพประกอบ 5.11(ก) และ (ข) ตามลำดับ

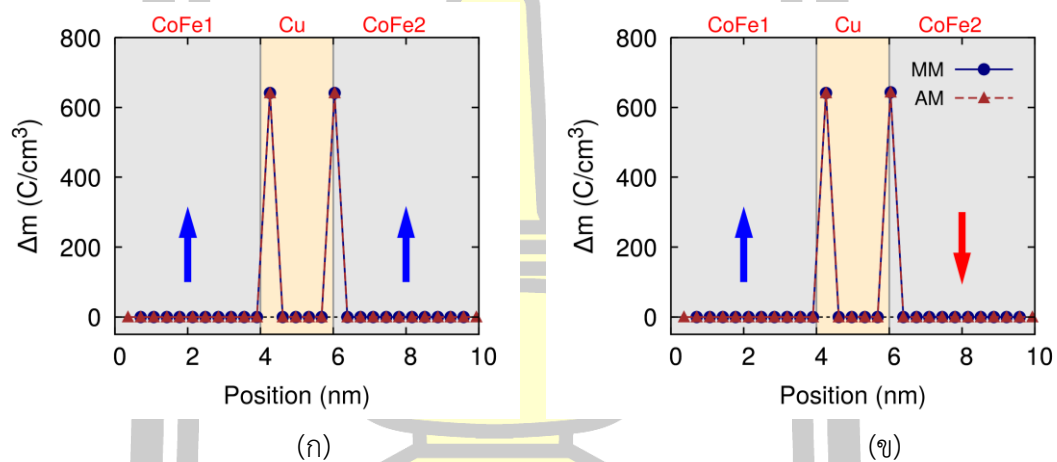


ภาพประกอบ 5.11 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อกระแสสปินเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1 จะส่งผลทำให้ค่าการสะสมสปินภายในโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1 มีค่าสูงสุดเท่ากับค่า m_{∞} และมีค่าคงที่ตลอดทั้งโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1 เนื่องจากค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มการจัดเรียงทิศทางการหมุนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe1 ตามคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ จากนั้นเมื่อกระแสสปินไหลเข้าสู่โครงสร้างชั้นวัสดุ Cu จะเห็นว่าค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าการสะสมสปินของชั้นวัสดุ Cu ซึ่งมีค่าเท่ากับ $m_{\infty} = 0 \text{ C/cm}^3$ [152] ได้อย่างรวดเร็วและคงที่ตลอดทั้งโครงสร้างชั้นวัสดุ Cu เนื่องจาก Cu เป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก กล่าวคือ มีจำนวนของสปินขึ้นและจำนวนของสปินลงที่เท่ากันส่งผลทำให้วัสดุแม่เหล็กประเภทนี้ไม่มีค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสสปินไหลเข้าสู่โครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe2 พบว่าปริมาณการสะสมสปินมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ค่า m_{∞} ที่มีค่าเป็นบวกในกรณี P state และมีแนวโน้มลดต่ำลงเข้าสู่ค่า m_{∞} ที่มีค่าเป็นลบในกรณี AP state เนื่องจากค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มการจัดเรียงทิศทางการหมุนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe2 ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe2 เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการสะสมสปินด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับแบบจำลองในระดับอะตอมพบว่าแบบจำลองทั้งสองประเภทให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินที่สอดคล้องกันได้อย่างดีตลอดทั้งโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปิน Δm ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe/ ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติ-

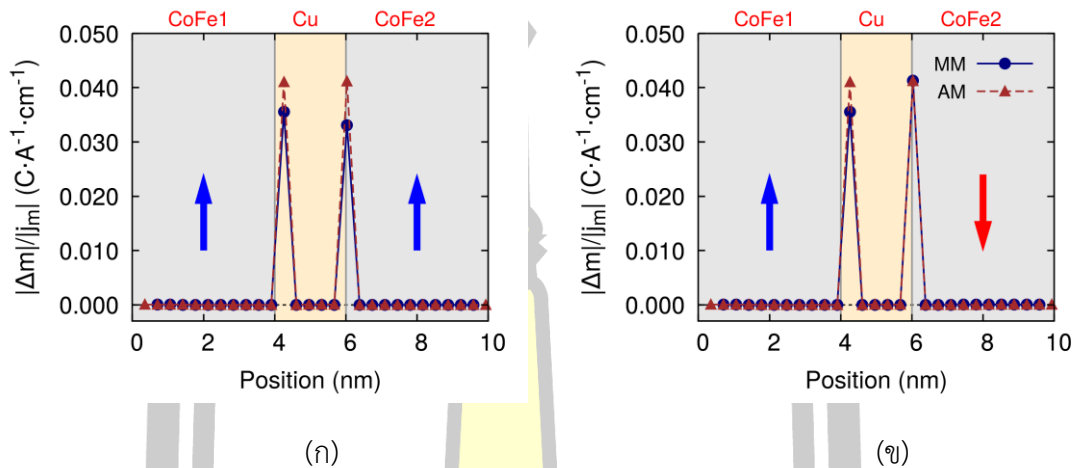
สเกลและแบบจำลองในระดับอะตอม โดยแบ่งการคำนวณออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 มีการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.12(ก) และ (ข) ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า Δm ภายในโครงสร้างชั้นวัสดุที่ตำแหน่งห่างจากบริเวณรอยต่อจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากค่าการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุแต่ละชั้นมีค่าคงที่เท่ากับค่า m_∞ ของวัสดุ อย่างไรก็ตามค่า Δm จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เฉพาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu และ Cu/CoFe2 ทั้งในกรณี P state และกรณี AP state เนื่องจากวัสดุ CoFe และวัสดุ Cu มีค่าการสะสมสปินที่สถานะเสถียรที่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า Δm ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับแบบจำลองในระดับอะตอม พบว่าแบบจำลองทั้งสองประเภทให้ผลการคำนวณค่า Δm ที่เท่ากันทั้งในกรณี P state และกรณี AP state



ภาพประกอบ 5.12 การเปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ระหว่างแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการพิจารณาขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปิน Δm เทียบกับขนาดของค่ากระแสสปิน j_m ที่แต่ละตำแหน่งย่อยของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมเพื่อจะนำไปใช้สำหรับการพิจารณาค่าต้านทานแม่เหล็กเชิงพื้นที่ในลำดับถัดไป ผลการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 มีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.13(ก) และ (ข) ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าปริมาณ $\Delta m/j_m$ ทั้งในกรณี P state และ AP state ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu และ Cu/CoFe2 จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน

ที่บริเวณดังกล่าวจะมีค่าที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ในกรณี P state และ AP state ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลจะมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณกระแสสปินที่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอม ดังที่ได้อธิบายไว้ในภาพประกอบ 5.10



ภาพประกอบ 5.13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

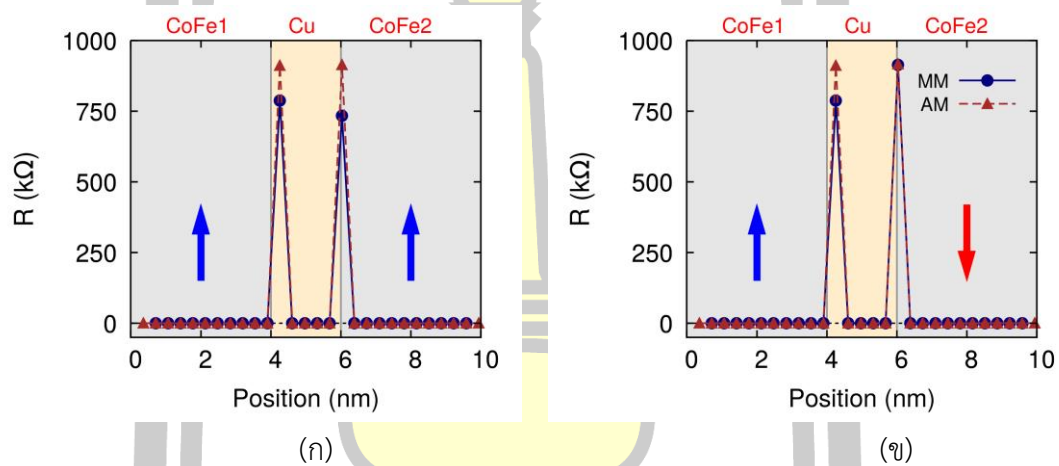
ขั้นตอนที่ 5 พิจารณาปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็ก

ภายหลังจากที่สามารถพิจารณาขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปิน Δm และขนาดของกระแสสปิน j_m ได้ในขั้นตอนที่ 4 แล้ว ปริมาณดังกล่าวจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณค่าความต้านทาน (resistance, R) ที่แต่ละตำแหน่งย่อย i ของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ในลำดับสุดท้ายตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_i = \frac{\Delta m t_i \Delta E}{j_m e^2} \quad (5.16)$$

- เมื่อ t_i คือ ความหนาของชั้นฟิล์มย่อยที่พิจารณาซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.3 nm
 ΔE คือ ผลต่างของระดับพลังงานในการคำนวณค่าความหนาแน่นสถานะซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 meV
 e คือ ประจุอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

ผลการคำนวณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 โดยอาศัยสมการ (5.16) ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมถูกนำมาเปรียบเทียบกันในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe1 และแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe2 มีการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.14(ก) และ (ข) ตามลำดับ จากผลการคำนวณพบว่าค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลในกรณี P state จะมีค่าต่ำกว่ากรณี AP state เนื่องจากการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ Cu/CoFe1 ในกรณี P state มีค่าต่ำกว่ากรณี AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.14(ก) สอดคล้องกับผลการคำนวณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมดังแสดงในภาพประกอบ 5.14(ข)



ภาพประกอบ 5.14 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ดังแสดงในภาพประกอบ 5.14 จะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กกรรม (magnetoresistance, MR) ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในลำดับถัดไป โดยพิจารณาให้ค่า R ที่แต่ละตำแหน่งของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม $MR = \sum_{i=1}^{nlayer} R_i$ ผลการคำนวณค่า MR ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอมถูกนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตาราง 5.4 โดยจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณค่า MR ของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลในกรณี P state จะมีค่าต่ำกว่ากรณี AP state เนื่องจากการกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ Cu/CoFe2 ในกรณี P state มีค่าต่ำกว่ากรณี AP state ในทำนองเดียวกันการคำนวณค่า MR โครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu/CoFe2 ด้วยแบบจำลองในระดับ

อะตอมได้ให้ผลที่มีความสอดคล้องกับแบบจำลองแบบมัลติสเกล อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่า MR ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลกับแบบจำลองในระดับอะตอม กลับพบว่า ปริมาณ MR ที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมคิดเป็น 16.75% และ 6.8% สำหรับกรณี P state และ AP state ตามลำดับ เนื่องจากผลการคำนวณค่ากระแสสปินที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ Cu/CoFe₂ ด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมมีค่าสูงดังแสดงในภาพประกอบ 5.10

ตาราง 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่า MR ระหว่างแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอม

| แบบจำลอง | MR (k Ω) | |
|----------------------|------------------|----------|
| | P state | AP state |
| แบบจำลองแบบมัลติสเกล | 1,520.61 | 1,701.31 |
| แบบจำลองในระดับอะตอม | 1,826.65 | 1,831.14 |
| Error (%) | 16.75 | 6.8 |

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินและปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กของโครงสร้างชั้นวัสดุ CoFe₁/Cu/CoFe₂ ที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลและแบบจำลองในระดับอะตอม ในเบื้องต้นพบว่าผลการคำนวณดังกล่าวมีความสอดคล้องกันทั้งในส่วน of แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการส่งผ่านสปินและปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็ก จากผลการศึกษาในส่วนนี้สามารถยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลแบบมัลติสเกล ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปริมาณ MR รวมไปถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ratio ในโครงสร้างวัสดุสามชั้นได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลง พฤติกรรมการส่งผ่านสปินและปริมาณ MR รวมไปถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ratio ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล IrMn/CoFe₁/Cu/CoFe₂ ได้แก่ ผลของการป้อนกระแสไฟฟ้าและผลของมุมระหว่างแมงनीไทเทเนียมชั้นภายในชั้นวัสดุ CoFe₁ และชั้นวัสดุ CoFe₂ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.4.2 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการส่งผ่านสปินในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

กระบวนการอ่านข้อมูลของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านและบิตข้อมูลที่ต้องการอ่านอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากบิตข้อมูลดังกล่าวและมีแนวโน้มการจัดเรียงทิศทางการอ่านตามทิศของแมกนีไทเซชันภายในบิตข้อมูลนั้นๆ เมื่อมีการจ่ายแรงดันไบอัส (bias voltage) เพื่อทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า (electrical current) ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะทำให้สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าต้านทานแม่เหล็กได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ GMR [21] และปรากฏการณ์ TMR [22] โดยปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL [15], [23], [24] จากนั้นค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะถูกทำการขยายสัญญาณและอ่านข้อมูลออกมาในลักษณะไบนารีบิต โดยอาศัยการพิจารณาค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดเพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 1 และบิต 0 ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL เป็นปัจจัยสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กและสัญญาณการอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อการส่งผ่านสปินรวมไปถึงปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล $\text{IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2}$ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.2.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR

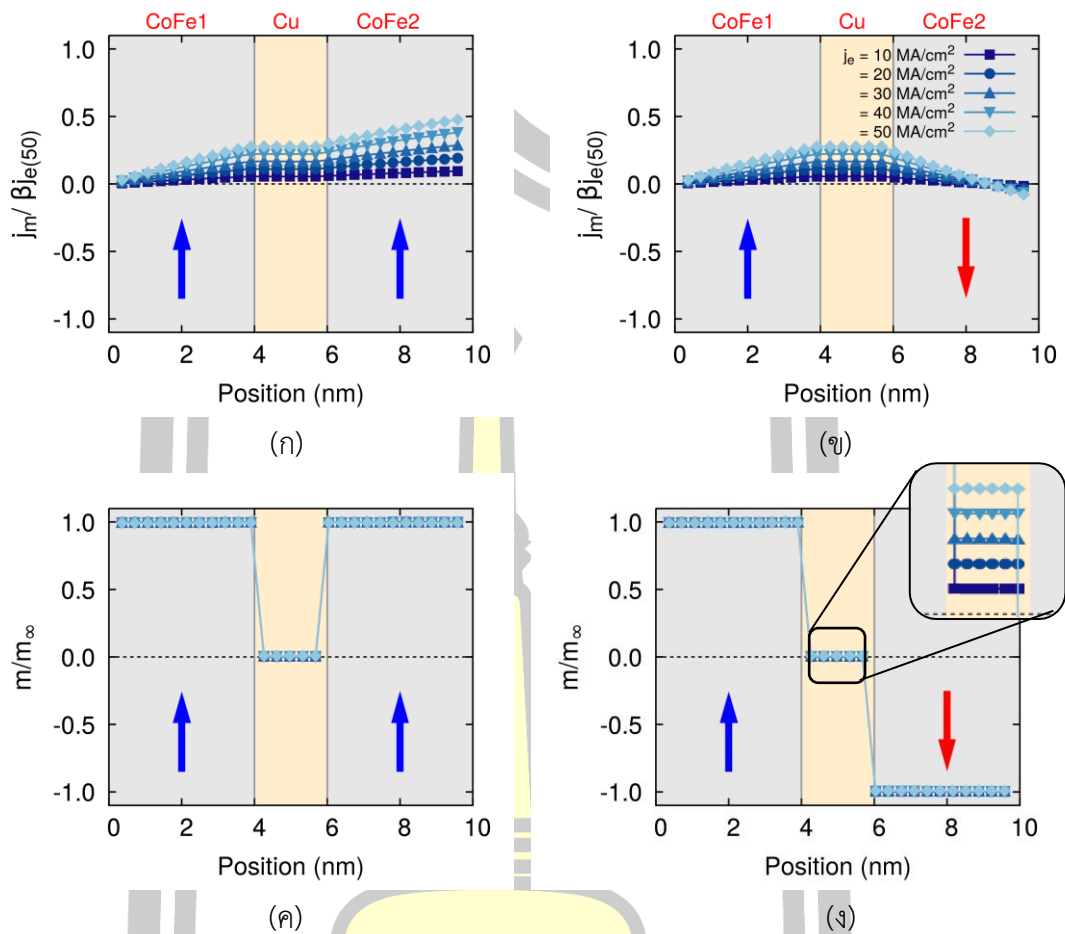
โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล กล่าวคือ จะต้องมามีค่าที่ไม่น้อยเกินไปจนทำให้ไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของค่าสัญญาณของบิต 0 และ 1 ได้ และจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปจนทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง เนื่องจากการส่งผ่านสปินทอร์ก (spin transfer torque) [158], [159] จากกระแสสปินโพลารไรซ์ที่มีค่าสูงจะทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของกระแสสปินและเบี่ยงเบนออกจากทิศทางของบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาดในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล [163] ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.2 นอกจากนี้การป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงจนเกินไปยังเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าสัญญาณรบกวน เนื่องจากความผันผวนของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ [164] จากการพิจารณากระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการอ่านข้อมูล

เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลในการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณการส่งผ่านสปิน ค่า MR และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล

ในลำดับแรกจะทำการศึกษาพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุ $\text{IrMn}/\text{CoFe1}/\text{Cu}/\text{CoFe2}$ ที่มีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางแม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินดังแสดงในตาราง 5.1 ตาราง 5.2 และตาราง 5.3 ตามลำดับ จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $5 - 50 \text{ MA/cm}^2$ ซึ่งเป็นช่วงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ [45] เข้าสู่โครงสร้างวัสดุ $\text{IrMn}(8\text{nm})/\text{CoFe1}(4\text{nm})/\text{Cu}(2\text{nm})/\text{CoFe2}(4\text{nm})$ เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ตัวอย่างการคำนวณผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินของโครงสร้างวัสดุในกรณี P state ถูกแสดงดังภาพประกอบ 5.15 (ก) และ (ค) และในกรณี AP state ถูกแสดงดังภาพประกอบ 5.15 (ข) และ (ง) ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินที่แต่ละตำแหน่งย่อยของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าแปรผันตามขนาดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งจะมีแนวโน้มเหมือนกับกรณีศึกษาที่ผ่านมา กล่าวคือ มีทิศทางไปตามทิศของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างชั้นวัสดุและลู่เข้าสู่ค่าเสถียร แต่ในกรณีที่ปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงจะส่งผลทำให้ค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าเสถียรได้เร็วขึ้น เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงส่งผลทำให้เกิดกระแสสปินโพลาไรซ์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้เกิดพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินที่ดีขึ้น

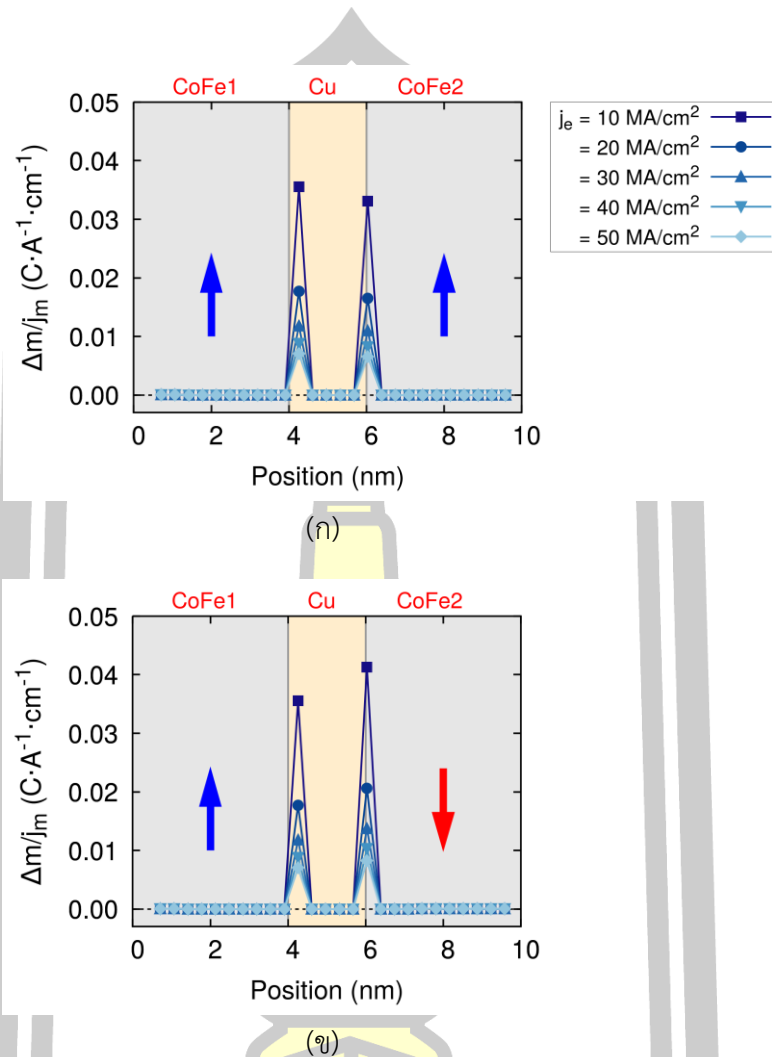
พจนัน ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 5.15 ผลการคำนวณค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกรณี (ก) (ค) P state และ (ข) (ง) AP state ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินภายในชั้นวัสดุ Cu พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนทิศทางของค่าการสะสมสปินเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยในกรณีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 50 MA/cm^2 ขนาดของค่าการสะสมสปินในชั้นวัสดุ Cu จะมีความมากกว่ากรณีที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำ และมีความจำเป็นต้องใช้ระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นในการปรับเปลี่ยนทิศทางเพื่อเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำแสดงดังภาพด้านในของภาพประกอบ 5.15(ง) ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณ $\Delta m / j_m$ ภายในโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.16(ก) และ (ข)

ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณ $\Delta m/j_m$ จะมีค่าแปรผันตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ

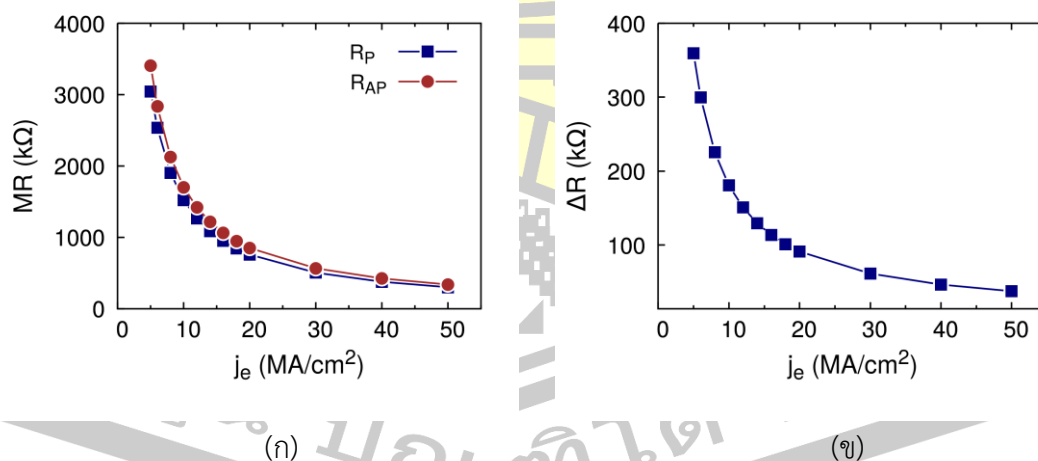


ภาพประกอบ 5.16 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในกรณี (ก) P state และ (ข) AP state ตามลำดับ

ผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ข้างต้นจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณปริมาณค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เพื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่มีการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เนื่องจากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่า MR ของโครงสร้างสปีนวาล์วซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์-ไดรฟ์มีความสำคัญต่อการเลือกใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการอ่านข้อมูล จากการศึกษาพบว่าค่า R มีค่าแปรผันตรงกับปริมาณ $\Delta m/j_m$ ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ค่า R ที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุและค่า R ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ โดยภายในชั้นวัสดุแต่ละชั้นจะ

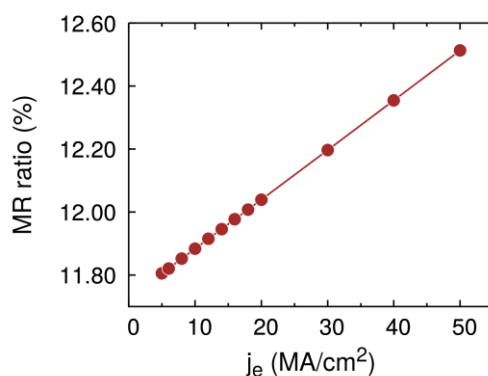
มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินที่ค่อนข้างต่ำและคงที่ส่งผลให้ค่า R ที่บริเวณดังกล่าวนี้มีค่าน้อยมากและเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากความต่อเนื่องของแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ ในขณะที่ค่า R ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุจะมีค่าสูง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ CoFe และวัสดุ Cu ดังนั้นค่า R ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุจะเป็นค่าความต้านทานที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมของโครงสร้างทั้งหมด

จากนั้นทำการคำนวณค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์วจากผลรวมของค่า R ต่อตำแหน่งของโครงสร้าง IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ตามความสัมพันธ์ $MR = \sum_{i=1}^{n_{\text{layer}}} R_i$ เพื่อพิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อค่า MR ดังแสดงในภาพประกอบ 5.17 (ก) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า MR มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 50 เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 10 MA/cm^2 เป็น 50 MA/cm^2 ทั้งในกรณี P state และ AP state เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดค่ากระแสสปินโพลาไรซ์และการส่งผ่านสปินที่สูงตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาผลกระทบของการป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกเข้าสู่โครงสร้าง IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ΔR ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่า MR ในกรณี P state และ AP state ดังแสดงในภาพประกอบ 5.17(ข) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่า ΔR จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนผ่านโครงสร้างสปินวาล์วสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองในระดับอะตอมสำหรับโครงสร้างสปินวาล์ว NiFe(5nm)/Cu(2nm)/NiFe(5nm) [45]



ภาพประกอบ 5.17 ผลการคำนวณ (ก) ค่า MR รวม และ (ข) ส่วนต่างระหว่างค่า MR ในกรณี P state และ AP state ของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ในลำดับสุดท้ายเมื่อทำการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการ (5.9) ดังแสดงในภาพประกอบ 5.18 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน MR มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแบบเชิงเส้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากส่วนต่างระหว่างค่า MR ในกรณี P state และ AP state ของโครงสร้างชั้นวัสดุมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 5.18 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วน MR ของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 ที่เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

5.4.2.2 ผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL ต่อปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR

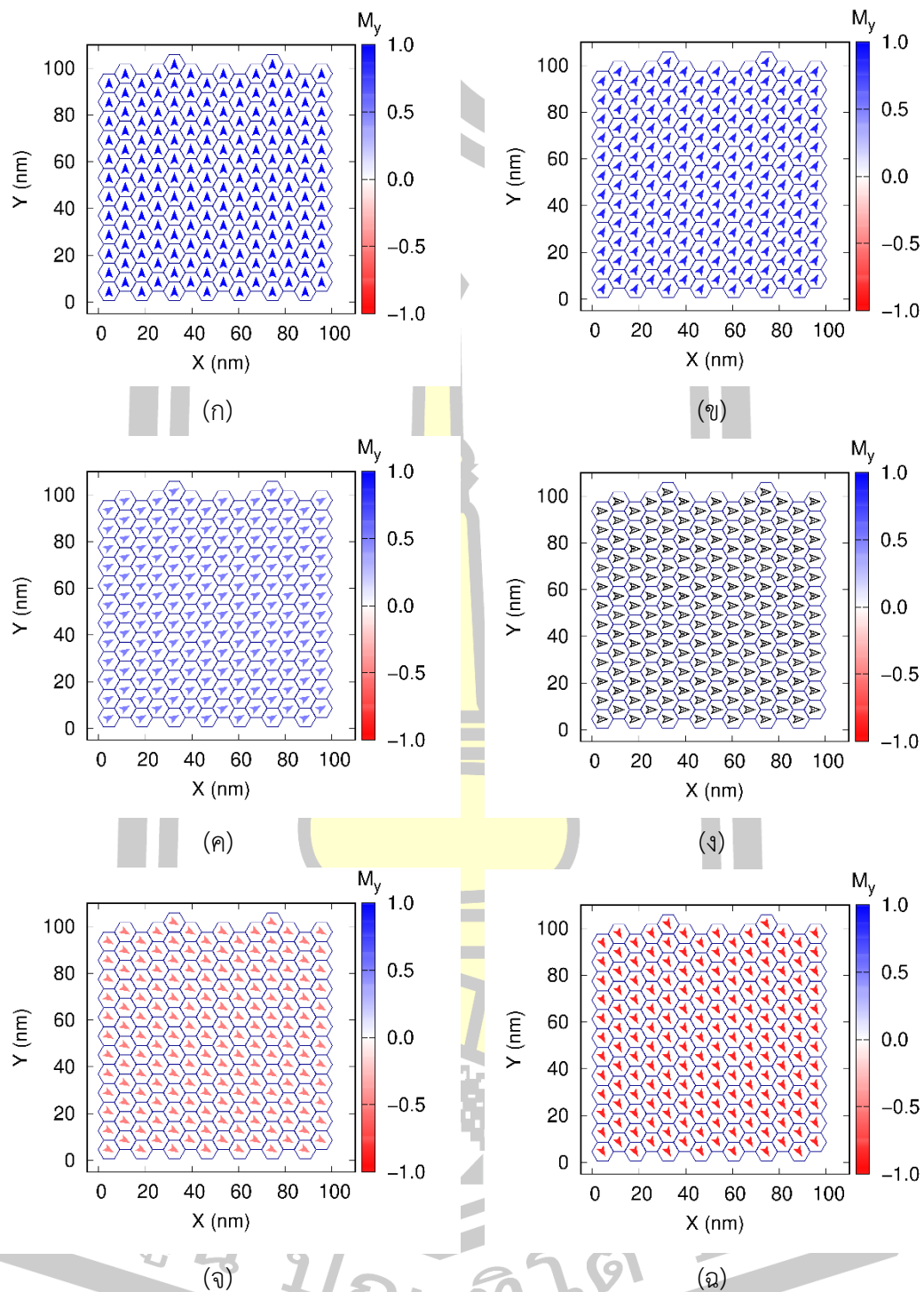
การทำงานของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์วจะเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ตามทิศทางของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยปริมาณค่าต้านทานที่วัดได้จะถูกนำมาใช้สำหรับการจำแนกความแตกต่างของค่าสัญญาณของบิต 0 และ 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL (angle between PL and FL, θ) [15], [23], [24] จากกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะเห็นได้ว่าผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลในการศึกษาผลของมุมดังกล่าวต่อปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR ของหัวอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL ที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินและค่า MR โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe1/

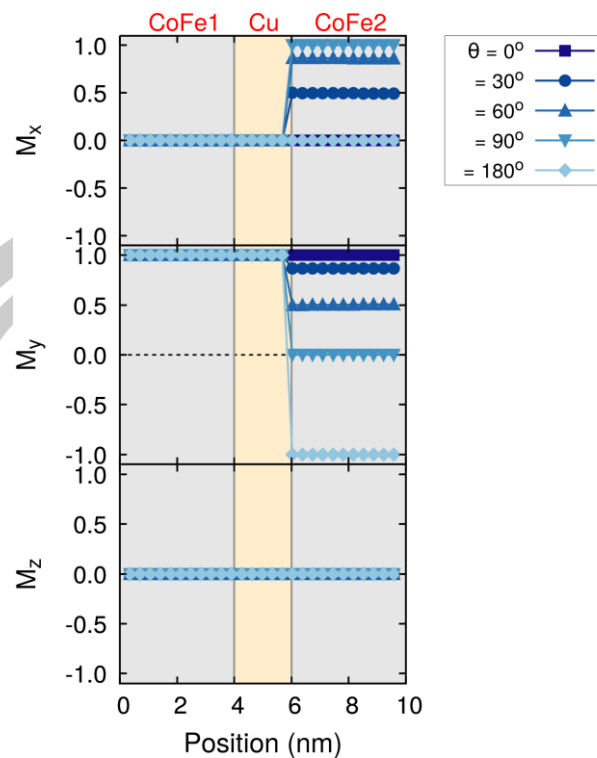
Cu/CoFe₂ ที่มีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานทางแม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินดังแสดงในตาราง 5.1 ตาราง 5.2 และตาราง 5.3 ตามลำดับ ในลำดับต่อมาทำการคำนวณผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เพื่อกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe1 ให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการไบอัส (biasing direction, \hat{n}) ในแนวแกน +y โดยอาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4 จากนั้นกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFe₂ ด้วยมุม θ ที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL กระทำกับแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL ในระนาบ xy เพื่อใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในโครงสร้างชั้น IrMn/CoFe₁/Cu/CoFe₂ สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดให้มุม θ มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 30°

ตัวอย่างการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ในกรณีที่มีมุม θ มีค่าเท่ากับ $0^\circ - 150^\circ$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 30° ถูกแสดงดังภาพประกอบ 5.19(ก) - (ฉ) โดยจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ $\theta = 0^\circ$ แมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทาง +y อย่างสมบูรณ์และไม่มีองค์ประกอบในแนวแกน x ดังแสดงในภาพประกอบ 5.19(ก) แต่ในกรณีที่ $\theta = 30^\circ 60^\circ 120^\circ$ และ 150° แมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบ xy ดังแสดงในภาพประกอบ 5.19(ข) (ค) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ $\theta = 90^\circ$ แมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทาง +x อย่างสมบูรณ์และไม่มีองค์ประกอบในแนวแกน y ดังแสดงในภาพประกอบ 5.19(ง)

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างชั้นวัสดุแต่ละชั้นก่อนเริ่มทำการคำนวณปริมาณการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็ก ในลำดับต่อมาได้ทำการพล็อตค่าแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุ IrMn(8nm)/CoFe₁(4nm)/Cu(2nm)/CoFe₂(4nm) ในกรณีที่มุม $\theta = 0^\circ 30^\circ 60^\circ 90^\circ$ และ 180° ดังแสดงในภาพประกอบ 5.20 จากภาพจะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe₁ มีองค์ประกอบในแนวแกน +y เพียงองค์ประกอบเดียว เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe₁ แต่แมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ Cu จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกองค์ประกอบ เนื่องจาก Cu เป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กส่งผลทำให้ค่าแมกนีไทเซชันของชั้นดังกล่าวนี้มีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe₂ จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามผลของมุม θ ในระนาบ xy เท่านั้น



ภาพประกอบ 5.19 ลักษณะโครงสร้างแบบ 2 มิติด้านบน (top view) ที่แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ CoFe2 ที่กระทำมุม θ ต่อดirection ของแมกนีไทเซชันภายในชั้น CoFe1 ด้วยขนาดของมุมเท่ากับ (ก) 0° (ข) 30° (ค) 60° (ง) 90° (จ) 120° และ (ฉ) 150° ตามลำดับ

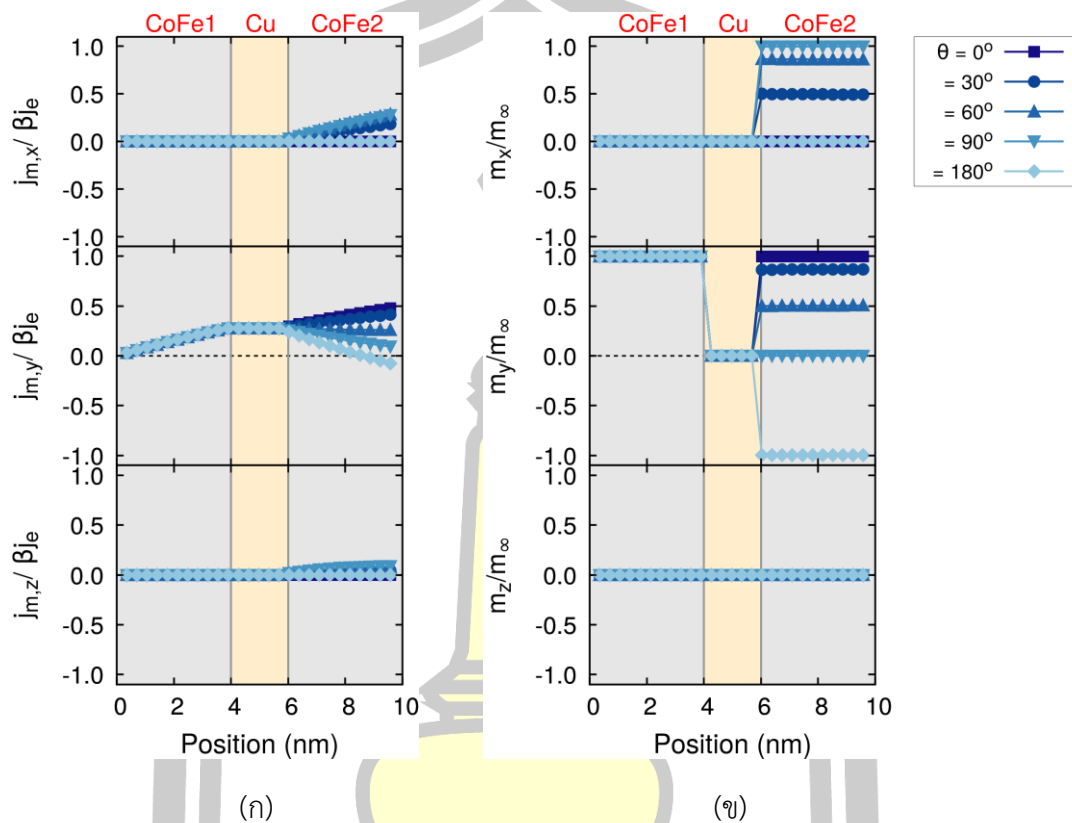


ภาพประกอบ 5.20 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ

ภายหลังจากการกำหนดโครงสร้างเพื่อใช้สำหรับการศึกษากลศาสตร์ของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL แล้วทำการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขนาด 10 MA/cm^2 ซึ่งเป็นช่วงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กขนาดใหญ่ [45] ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุ IrMn(8nm)/CoFe1(4nm)/Cu(2nm)/CoFe2(4nm) เพื่อใช้สำหรับการพิจารณาค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในลำดับต่อไป

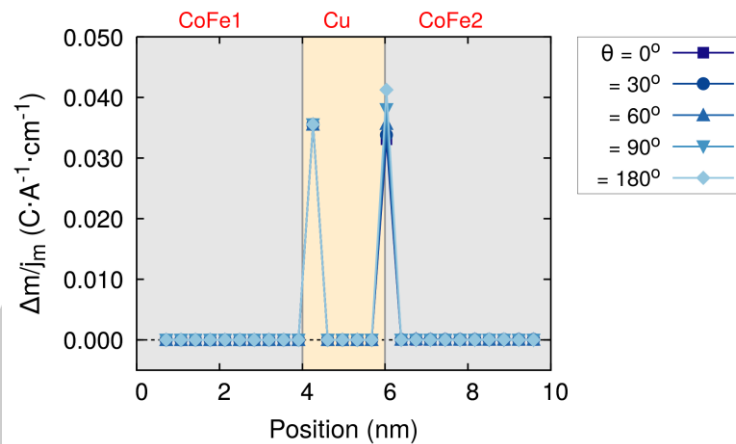
ภาพประกอบ 5.21(ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างผลการคำนวณค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมุม θ มีค่าเท่ากับ 0° 30° 60° 90° และ 180° ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมุม θ ที่ส่งผลต่อค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินภายในโครงสร้างวัสดุพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาณดังกล่าวต่อตำแหน่งจะมีแนวโน้มเหมือนกับกรณีศึกษาที่ผ่านมา โดยในกรณีที่ $\theta = 0^\circ$ ค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งจะมีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน y เพียงองค์ประกอบเดียว แต่ในกรณีที่ $\theta \neq 0^\circ$ ค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินต่อตำแหน่งจะมี

องค์ประกอบอยู่ในระนาบ xy เนื่องจากค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินมีทิศทางไปตามทิศของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างชั้นวัสดุและเข้าสู่ค่าเสถียรตั้งที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4.1



ภาพประกอบ 5.21 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสสปินและค่าการสะสมสปินในองค์ประกอบ x y และ z ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ

ในลำดับต่อมาได้ทำการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของมุม θ ที่ส่งผลต่อปริมาณ $\Delta m/j_m$ ภายในโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe/Cu/CoFe ตัวอย่างผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ในกรณีที่มีมุม θ มีค่าเท่ากับ 0° 30° 60° 90° และ 180° ถูกแสดงดังภาพประกอบ 5.22 จากการศึกษาพบว่าปริมาณ $\Delta m/j_m$ จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ CoFe1/Cu และ Cu/CoFe2 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่บริเวณดังกล่าวมีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของมุม θ พบว่าปริมาณ $\Delta m/j_m$ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ Cu/CoFe2 จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลการกระเจิงของกระแสสปินโพลาไรซ์จะมีค่าแปรผันตามมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในโครงสร้างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้น [15], [23], [24]

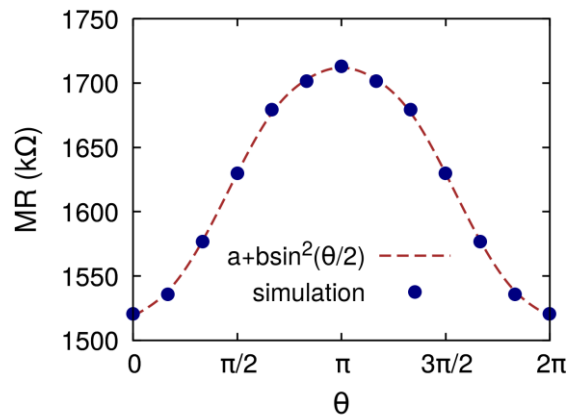


ภาพประกอบ 5.22 ผลการคำนวณปริมาณ $\Delta m/j_m$ ต่อตำแหน่งของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ

จากนั้นได้ทำการคำนวณผลของมุม θ ที่มีต่อค่า R ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีป้อนค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 10 MA/cm^2 ผลการคำนวณ R ที่เป็นฟังก์ชันของมุม θ เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาค่า MR ของโครงสร้างสปีนวาล์ว จากผลรวมของค่า R ทุกๆ ตำแหน่งย่อยของโครงสร้าง IrMn/CoFe/Cu/CoFe ตามความสัมพันธ์ $MR = \sum_{i=1}^{n_{\text{layer}}} R_i$ ในกรณีที่มุม θ มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 30° ดังแสดงในภาพประกอบ 5.23 เพื่อพิจารณาผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL แลชั้น FL ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า MR ของระบบ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่า MR จะมีค่าต่ำสุดในกรณีที่มุม $\theta = 0^\circ$ และ 360° หรือกรณี P state แต่จะมีค่าสูงสุดในกรณีที่มุม $\theta = 180^\circ$ หรือกรณี AP state เนื่องจากการสะสมสปีนจะปรับเปลี่ยนทิศทางและมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ ซึ่งในกรณี AP state พบว่าการสะสมสปีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยต่อนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนต่อตำแหน่ง Δm

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่มุม θ มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ กับฟังก์ชัน $a + b \sin^2(\theta/2)$ ซึ่งถูกใช้สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ GMR ในเชิงการทดลอง [165], [166] เมื่อ a คือค่าต้านทานทางแม่เหล็กในกรณี P state และ b คือค่า ΔR ระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณี P state และ AP state จะพบว่าคำนวณค่าต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่มุม θ มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ มีแนวโน้มที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการอธิบายผลในเชิงการทดลอง โดยสามารถคำนวณค่า GMR ของโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 MA/cm^2 ได้เท่ากับร้อยละ 10 จากผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบมัลติสเกลที่แนะนำให้เสนอขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณค่า GMR ของโครงสร้างสปีนวาล์วและพิจารณาผลของมุม

ระหว่างแมกนีไทเซชันที่มีต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองใน ระดับอะตอม [45] และผลการทดลอง [165], [166]



ภาพประกอบ 5.23 ผลการคำนวณค่า MR รวมของโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn/CoFe1/Cu/CoFe2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุม θ เทียบกับฟังก์ชัน $a + b\sin^2(\theta/2)$

5.4.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า MR ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเชิงการทดลอง

นอกจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน ค่า MR และค่าอัตราส่วน MR ในเชิงทฤษฎีที่ตั้งข้ออธิบายไว้แล้ว ในหัวข้อ 5.4.2 งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้งานจริงในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านในเชิงการทดลอง โดยจะทำการพิจารณาผลของแรงดันไบอัส (bias voltage) และผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL ที่มีต่อค่า MR และค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width, RW) และระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันหรือความหนาของโครงสร้างสปินวาล์ว (shield to shield spacing, SS spacing) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.4.3.1 การจำแนกระดับของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรม เครื่องมือวัด และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่ถูกใช้งานจริงจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการจำแนกระดับขั้นตอนการผลิตของ

หัวอ่านข้อมูลในเชิงอุตสาหกรรม เครื่องมือวัดที่ถูกใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล และลักษณะของกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลและเครื่องมือวัดที่จะได้นำมาใช้ในการศึกษานี้เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการดำเนินงานวิจัยในลำดับต่อไป

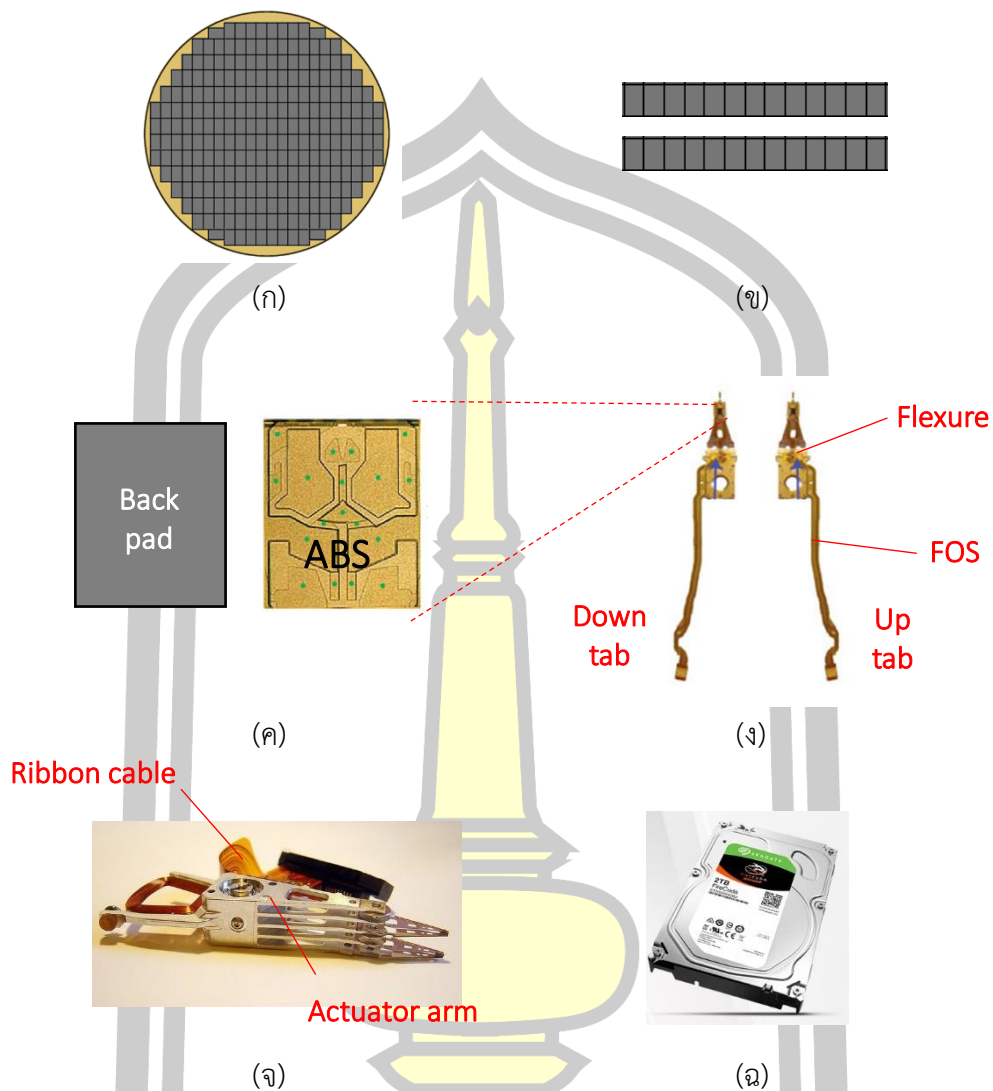
1. การจำแนกระดับขั้นตอนการผลิต (stage of manufacturing)

โครงสร้างสปินวาล์วเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณ เพื่อแสดงค่าสัญญาณบิต 0 หรือ 1 ที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมยังถูกนำไปเชื่อมติดกับส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อช่วยให้หัวอ่านข้อมูลที่อยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในลำดับแรกจะได้อธิบายถึงลักษณะของหัวอ่านข้อมูลจริงที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ระดับตามขั้นตอนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 เวเฟอร์ (wafer) คือ กลุ่มของหัวเขียนข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลจำนวนมากที่ถูกสร้างขึ้นบนแผ่นฐาน (substrate) โดยใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กหลายชนิดแสดงในภาพประกอบ 5.24(ก) เวเฟอร์ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยเทคโนโลยีการผลิตฟิล์มบางเฉพาะด้าน เช่น กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography process) [167] และกระบวนการปลูกฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง (sputtering film growth process) [47] เป็นต้น

1.2 บาร์ (bar/row) คือ กลุ่มของหัวเขียนข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลที่ถูกตัดแบ่งออกจากเวเฟอร์เป็นแถวยาว ซึ่งประกอบไปด้วยสไลเดอร์ทั้งหมด 64 ตัวเชื่อมติดกัน ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 5.24(ข)

1.3 สไลเดอร์ (slider) คือ ชิ้นงานที่ถูกตัดแบ่งออกจากบาร์ซึ่งประกอบด้วยหนึ่งหัวเขียนและหนึ่งหัวอ่านข้อมูล ภาพประกอบ 5.24(ค) แสดงลักษณะด้านหลังของสไลเดอร์ (back pad) ซึ่งจะถูกนำไปเชื่อมติดกับแผ่นรองรับสไลเดอร์ต่อไป และลักษณะด้านหน้าของสไลเดอร์ที่รับกับแผ่นบันทึกข้อมูล (air bearing surface, ABS) ซึ่งลอยเหนืออยู่บนแผ่นบันทึกข้อมูล โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าหน้า ABS ของสไลเดอร์จะมีช่องลม (air flow) ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อป้องกันการบินของสไลเดอร์ในระหว่างกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูล นอกจากนี้ยังจะเห็นว่าด้านบนของสไลเดอร์จะมีแถบเชื่อมลวดทอง (gold bond pad) ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของหัวอ่านข้อมูล และด้านล่างของสไลเดอร์จะมีลักษณะเป็นแถบข้อมูลที่ใส่ระบุเลขลำดับ (serial number) ของสไลเดอร์แต่ละตัว



ภาพประกอบ 5.24 การจำแนกลักษณะของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมในระดับ (ก) เวเฟอร์ (ข) บาร์ (ค) สไลเดอร์ [185] (ง) HGA [186] (จ) HSA [187] และ (ฉ) HDA [188]

1.4 กลุ่มหัวเขียน/อ่าน (head gimbal assembly, HGA) คือ การนำเอาสไลเดอร์ไปเชื่อมติดกับชุดฐานรอง (trace gimbal assembly, TGA) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นรองรับสไลเดอร์ซึ่งถูกเรียกว่าเฟล็กซ์เจอร์ (flexure) และเชื่อมต่อกับสายไฟ (flex on suspension, FOS) โดยบริเวณส่วนปลายของ FOS มีลักษณะเป็นสายไฟที่ทำหน้าที่เชื่อมวงจรระหว่างสไลเดอร์กับแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit cable assembly) ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน FOS เข้าสู่สไลเดอร์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 5.24(ง) โดย HGA ถูกออกแบบให้มีสองรูปแบบคือ HGA แถบหางย (up tab) และ HGA แถบคว่ำ (down tab) เพื่อใช้กับแผ่นบันทึกข้อมูลที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ทั้งสองด้าน และฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีแผ่นบันทึกข้อมูลตั้งแต่สองแผ่นขึ้นไป

1.5 กลุ่มสแต็ค (head stack assembly, HSA) คือ การนำเอา HGA ไปประกอบเข้ากับกลุ่มแขนจับและขดลวด (arm and coil assembly) ดังแสดงในภาพประกอบ 5.24(จ) โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลจะถูกสั่งการผ่านแผงวงจรหลัก (logic board) เพื่อไปควบคุมแขนจับตัวควบคุม (actuator arm) ด้วยแถบเคเบิล (ribbon cable)

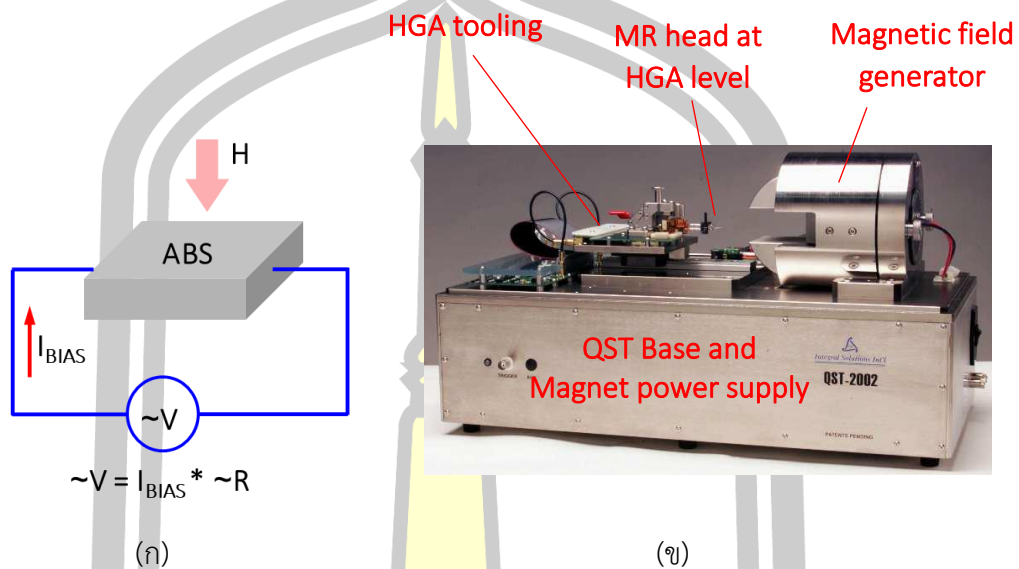
1.6 กลุ่มไดรฟ์และหัวอ่าน/เขียน (head drive assembly, HDA) HDA คือ การประกอบรวมองค์ประกอบทุกส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้แก่ หัวเขียน หัวอ่าน แผ่นบันทึกข้อมูลมอเตอร์ควบคุมการหมุนของแผ่นบันทึกข้อมูล (spindle motor) และตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวเขียนและหัวอ่าน เป็นต้น ไว้ใน (base casting) และปิดผนึกด้วยฝาปิด (cover) ในลำดับสุดท้ายก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพในระดับ HDA แสดงดังภาพประกอบ 5.24(ฉ)

2. เครื่องมือวัด Quasi Static (QST)

QST เป็นเครื่องมือวัดกึ่งเสถียรเฉพาะทางซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยบริษัท Integral Solutions Int'l ภายใต้เครื่องหมายการค้า ISI [168] เครื่องมือวัด QST ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลเชิงแม่เหล็ก (magneto-resistive type heads) ทั้งในรูปแบบของหัวอ่านข้อมูลที่อาศัยปรากฏการณ์ GMR และหัวอ่านข้อมูลที่อาศัยปรากฏการณ์ TMR โดยการให้ความร้อน (applying thermal) และการป้อนกระแสไบอัส (bias current) ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เป็นต้น เครื่องมือวัดดังกล่าวนี้ถูกสร้างขึ้นให้มีความเหมาะสมในการใช้งานและสามารถรองรับลักษณะของหัวอ่านข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมได้ตั้งแต่ระดับ เวเฟอร์ บาร์ สไลเดอร์ HGA HSA ไปจนถึงระดับ HDA

โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือวัด QST จะถูกนำมาใช้สำหรับการทดสอบฟังก์ชันการส่งผ่าน (transfer function test) ที่แสดงถึงการตอบสนองของหัวอ่านข้อมูลต่อปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ต้องการทดสอบ โดยการให้กระแสไบอัสผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ในขณะที่มีการควบคุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก (magnetic field generator) เพื่อจำลองการตรวจวัดสัญญาณจากแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงในภาพประกอบ 5.25(ก) ซึ่งจะทำให้สามารถวัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลและปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลได้ ภาพประกอบ 5.25(ข) แสดงรูปลักษณะของเครื่องมือวัด QST รุ่น tabletop QST-2002 ที่ถูกใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลในระดับ HGA ซึ่งประกอบด้วยตัวเครื่อง QST (QST base) เครื่องจ่ายไฟสำหรับตัว

กำเนิดสนามแม่เหล็ก (magnet power supply) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก (magnetic field generator) และฐานจับสำหรับ HGA (HGA tooling)

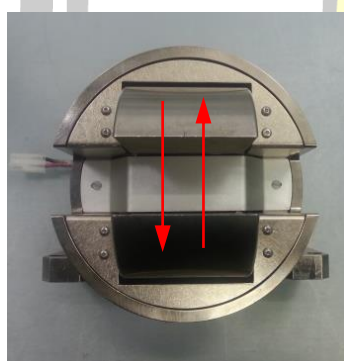


ภาพประกอบ 5.25 (ก) แผนภาพวงจรค่าต้านทานอย่างง่ายในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอก (ข) เครื่องมือวัด QST รุ่น tabletop QST-2002 สำหรับการทดสอบหัวอ่านข้อมูลในระดับ HGA [169]

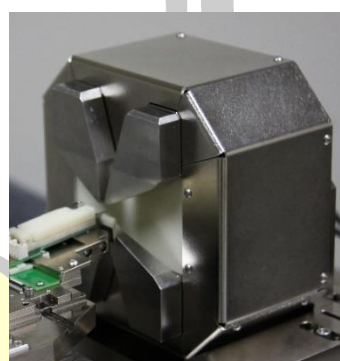
การทำงานของเครื่องมือวัด QST จะถูกสั่งการผ่านซอฟต์แวร์ Quasi97 ซึ่งใช้สำหรับการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองหรือข้อมูลอินพุท และกำหนดข้อมูลเอาต์พุทที่ต้องการทราบค่า ยกตัวอย่างเช่น หมายเลขลำดับของหัวอ่านข้อมูล (serial number) ระยะเวลาในการวัดข้อมูล ข้อมูลจริง และข้อมูลเชิงสถิติ เป็นต้น โดยการเขียนไฟล์คำสั่ง (script file) การทำงานของเครื่องมือวัด QST จะเริ่มจากการประมวลผลข้อมูลอินพุท จากนั้นฐานจับ HGA จะถูกสั่งการให้เคลื่อนที่เข้าไปใกล้ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ตำแหน่งของหัวอ่านข้อมูลในระดับ HGA อยู่ตรงบริเวณกึ่งกลางของตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อจำลองกระบวนการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล ก่อนเริ่มทำการทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้จะถูกประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ข้อมูลเอาต์พุท และในลำดับสุดท้ายฐานจับ HGA จะถูกสั่งการให้เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อทำการเปลี่ยนชิ้นงานหรือหัวอ่านข้อมูลที่ต้องการทดสอบต่อไป

ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกนำมาใช้กับเครื่องมือวัด QST สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กเดี่ยว (single magnet) และตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว (quadrupole magnet หรือ quad-pole magnet) สำหรับตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก

เดี่ยวจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่มีแถบเหล็กคู่ยื่นออกมาด้านหน้า ซึ่งจะอาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันล้อมรอบแถบเหล็กดังกล่าว เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศขึ้นและทิศลงกระทำต่อหัวอ่านข้อมูลที่ถูกวางไว้บริเวณกึ่งกลางระหว่างแถบเหล็กคู่ขณะทำการทดลองวัดข้อมูล แสดงดังลูกศรสีแดงในภาพประกอบ 5.26(ก) สำหรับตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่มีแถบเหล็กสี่ขั้ววางอยู่ในตำแหน่งสมมาตรกันดังแสดงในภาพประกอบ 5.26(ข) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วจะอาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันล้อมรอบแถบเหล็กทั้งสี่ขั้ว เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความเข้มสูงและเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมทิศทางการป้อนสนามแม่เหล็กกระทำต่อหัวอ่านข้อมูลที่ถูกวางไว้บริเวณกึ่งกลางระหว่างแถบเหล็กทั้งสี่ขั้วได้ 360 องศา จากผลการป้อนสนามแม่เหล็กพร้อมกันในแนวแกน x และแนวแกน y (cross track field)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5.26 (ก) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กเดี่ยว และ (ข) ตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว [170]

ลักษณะการทำงานและองค์ประกอบหลักของเครื่องมือวัด QST ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น เป็นข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องมือวัด QST รุ่น tabletop QST-2002 ที่ถูกใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลในระดับ HGA เท่านั้น ซึ่งหากต้องการทำการทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลในระดับ HSA และ HDA จะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนฐานจับที่ถูกออกแบบมาสำหรับหัวอ่านข้อมูลในระดับ HSA และ HDA อย่างไรก็ตามการทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลในระดับเวเฟอร์ บาร์ และสไลเดอร์ จำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือวัด QST ที่มีความจำเพาะมากยิ่งขึ้นดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 5.28(ก) และ (ข) สำหรับเครื่องมือวัด QST ในระดับบาร์ ดังแสดงตัวในภาพประกอบ 5.28(ข) จะประกอบด้วยฐานด้านล่างและตู้ด้านบนที่มีการฝังเครื่อง QST-2002 รวมไปถึงตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วไว้ในตำแหน่งที่แน่นอน นอกจากนี้ยังได้มีการ

ออกแบบให้สามารถควบคุมการหยิบจับชิ้นงานอัตโนมัติภายในตู้ด้านบนได้โดยการส่งการผ่านซอฟต์แวร์ Quasi97 เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลในระดับเวเฟอร์ บาร์ และสไลเดอร์ มีขนาดที่เล็กมากในระดับไมโครเมตร และเพื่อหลีกเลี่ยงการสร้างสิ่งเจือปน (contamination) บนชิ้นงาน



ภาพประกอบ 5.27 (ก) เครื่องมือวัด QST รุ่น BLAZER-X5 สำหรับหัวอ่านข้อมูลในระดับบาร์ [171]
(ข) เครื่องมือวัด QST รุ่น WLA-3000 สำหรับหัวอ่านข้อมูลในระดับเวเฟอร์ [172]

3. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (sample groups)

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองวัดค่า MR และค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลที่อยู่ในระดับบาร์ซึ่งได้รับการสนับสนุนมาจาก บริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (สหราชอาณาจักร) จำกัด การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลจะอาศัยเครื่องมือวัด QST ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 5.4.3.1 สำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษานี้จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างสปีนวาล์วแบบใหม่ที่มีการรวมชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic, SAF) เป็นโครงสร้าง AF/PL/SL/RL/SL/FL หรือ AF/SAF/SL/FL ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 2.1.3 โดยโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลชุดนี้ได้นำเอาวัสดุแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและมีสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนมาสร้างเป็นชั้น SL เพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์ค่าต้านทานแม่เหล็กจากการทะลุผ่านหรือปรากฏการณ์ TMR [22] ซึ่งให้ค่า MR ที่สูงเมื่อเทียบกับหัวอ่านข้อมูลที่อาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่หรือปรากฏการณ์ GMR [21]

สำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง โดยกลุ่มแรกจะพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width, RW) และกลุ่มที่สองเป็นการพิจารณาผลของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance area, RA) ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างชั้นป้องกันที่แตกต่างกันเนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่าความหนาของชั้น SL ในโครงสร้างสปีนวาล์ว สำหรับรายละเอียดของหัวอ่านข้อมูลและจำนวนหัวอ่านข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาสำหรับกลุ่ม RW และกลุ่ม RA ถูกแสดงดังตาราง 5.5 และตาราง 5.6 ตามลำดับ

ตาราง 5.5 RW CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า RA = $0.4 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$

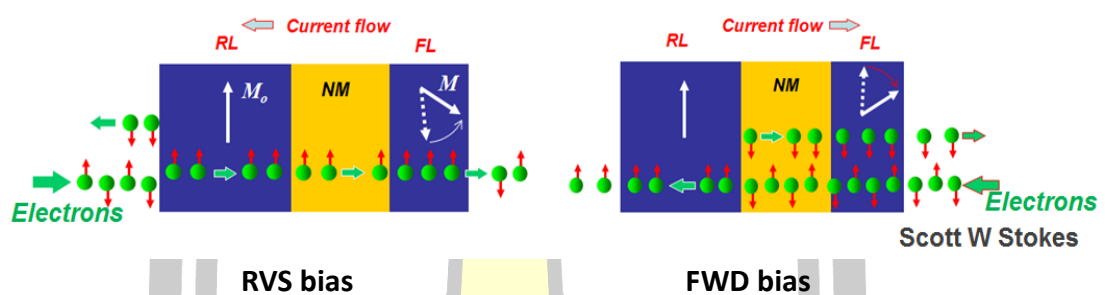
| RW (nm) | จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง |
|---------|-------------------------------|
| 26 | 120 |
| 29 | 120 |
| 41 | 120 |

ตาราง 5.6 RA CoFeB(3nm)/MgO(t=0.5-1nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า RW = 26 nm

| RA ($\Omega \cdot \mu\text{m}^2$) | จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 0.30 | 120 |
| 0.35 | 120 |
| 0.40 | 120 |
| 0.45 | 120 |

ลักษณะการป้อนแรงดันไบอัสในเชิงการทดลองด้วยเครื่องมือวัด QST จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณี คือ การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับ (reversed bias, RVS) และการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรง (forward bias, FWD) ดังแสดงในภาพประกอบ 5.28(ก) และ (ข) ตามลำดับ ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าจะมีการเคลื่อนที่จากชั้น FL ผ่านไปยังชั้น RL ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น RL ไปยังชั้น FL ดังแสดงในภาพประกอบ 5.28(ก) โดยสปินของอิเล็กตรอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางให้มันแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น RL เนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนตัวนำของกระแสสปินและแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุ โดยเรียกกระแสสปินที่ถูกเปลี่ยนแปลงทิศทางนี้ว่ากระแสสปินโพลาไรซ์ (spin-polarised current) จากนั้นกระแสสปินโพลาไรซ์จะเคลื่อนผ่านไปยังชั้น FL ซึ่งทำ

ให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ระหว่างกระแสสปินโพลาไรซ์และแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กชั้นอีกครั้ง โดยอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL กระทำต่อสปินของกระแสสปินโพลาไรซ์ ในขณะเดียวกันจะเกิดแรงบิดสปินจากกระแสสปินที่กระทำกลับต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FL เช่นเดียวกัน ซึ่งแรงบิดสปินจากกระแสสปินโพลาไรซ์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ได้ถ้าแรงบิดสปินของสปินมีค่าที่มากพอ โดยความแรงของแรงบิดสปินที่เกิดขึ้นจากกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับค่าแรงดันไบอัสที่ถูกป้อนเข้าสู่หัวอ่านข้อมูล



ภาพประกอบ 5.28 (ก) การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางย้อนกลับและ (ข) การป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรง [173]

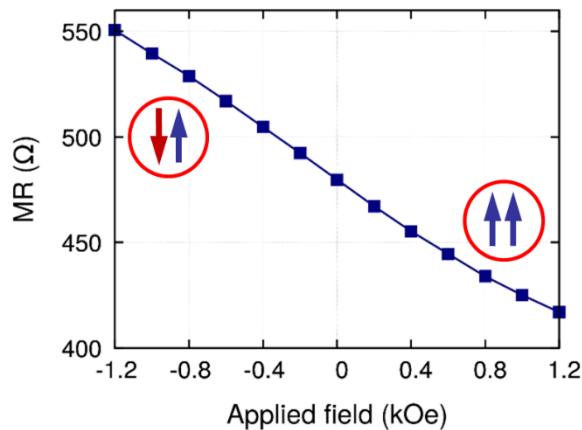
สำหรับกรณีที่มีการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรงพบว่า กระแสไฟฟ้าจะถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนที่จากชั้น RL ไปยังชั้น FL ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น FL ไปยังชั้น RL ดังแสดงในภาพประกอบ 5.28(ข) โดยสปินของอิเล็กตรอนที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มจะถูกเหนี่ยวนำทิศทางให้มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL เป็นค่ากระแสสปินโพลาไรซ์ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d จากนั้นกระแสสปินโพลาไรซ์จะเคลื่อนที่ผ่านไปยังชั้น RL และเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน s-d ขึ้นอีกครั้ง โดยอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินจากแมกนีไทเซชันภายในชั้น RL กระทำต่อสปินของกระแสสปินโพลาไรซ์ ในขณะเดียวกันจะเกิดแรงบิดสปินจากกระแสสปินที่กระทำกลับต่อแมกนีไทเซชันในชั้น RL เช่นเดียวกันนำไปสู่การวัดปริมาณค่าต้านทานที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการจำแนกบิตข้อมูล 0 และ 1 โดยความแรงของแรงบิดสปินที่เกิดขึ้นจากกระแสสปินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

5.4.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งเปรียบเสมือนปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกจากแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อตรวจวัดการตอบสนองของหัวอ่านข้อมูลและตรวจสอบการลักษณะจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ในการศึกษานี้ได้ยกตัวอย่างการพิจารณาผลของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง $RW = 26 \text{ nm}$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง $+1.2 \text{ kOe}$ เนื่องจากความแรงของสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลที่เหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL จะมีค่าน้อยมากในช่วง 500 Oe ถึง 600 Oe [15] ในขณะที่มีการป้อนค่าแรงดันไบอัสเท่ากับ $140 \text{ มิลลิโวลต์ (mV)}$ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไบอัสมาตรฐาน (บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี จำกัด) ที่ถูกใช้สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 5.29

จากการทดลองวัดค่า MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกพบว่าค่า MR จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยในกรณีที่ไม่มี การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ($H_{app} = 0$) ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL จะถูกกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับชั้น PL และชั้น RL ด้วยผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL และแมกนีไทเซชันจากเกราะป้องกันด้านข้าง (side shield) อย่างไรก็ตามเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลพบว่าค่า MR ของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตามค่าสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับชั้น RL (AP state) โดยค่า MR จะมีค่าสูงสุดเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าประมาณ -1.2 kOe ในทางตรงกันข้ามค่า MR ของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าลดลงเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานกับแมกนีไทเซชันภายในชั้น RL (P state) ซึ่งส่งผลให้เกิดค่า MR ต่ำสุดเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเท่ากับ $+1.2 \text{ kOe}$

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงค่า MR ของหัวอ่านข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอกช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในชั้น RL และชั้น FL ของโครงสร้างสปีนวัลว โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวกและลบจะทำให้เกิดการการจัดเรียงตัวแบบ P state และ AP state ตามลำดับ



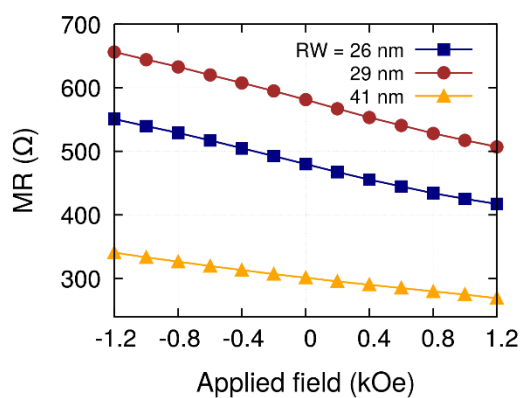
ภาพประกอบ 5.29 ตัวอย่างการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 26 nm

เมื่อทำการพิจารณาผลของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลพบว่าค่าต้านทานทางไฟฟ้า (R) จะมีค่าแปรผกผันกับขนาดของความกว้างของหัวอ่านข้อมูล เนื่องจากความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัด (A) ของการไหลของกระแสไฟฟ้า (I) ดังนั้นหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มากหรือมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สูง กระแสไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านหัวอ่านข้อมูลได้ง่ายซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ ความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกถูกนำไปใช้สำหรับการพิจารณาค่าพื้นที่หน้าตัด ($A = RA/R$) และค่ากระแสไฟฟ้า ($I = V/R$) ที่ไหลผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล รวมไปถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($j_e = I/A$) ดังแสดงในตาราง 5.7

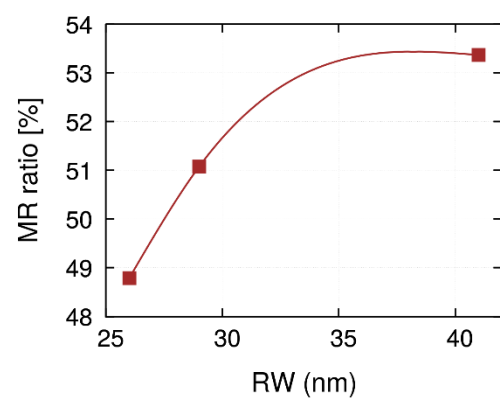
ตาราง 5.7 ผลการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าเฉลี่ยของโครงสร้าง CoFeB(3nm)/MgO(0.5nm)/CoFeB(8nm) ซึ่งมีค่า $RA = 0.4 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ เมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสขนาดเท่ากับ 140 mV

| RW (nm) | ค่าต้านทานทาง ไฟฟ้าเฉลี่ย (Ω) | พื้นที่หน้าตัด (nm^2) | ค่ากระแสไฟฟ้า (mA) | ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (MA/cm^2) |
|------------|---|-------------------------------------|-----------------------|---|
| 26 | 581.02 | 688.44 | 0.241 | 35.007 |
| 29 | 479.76 | 833.75 | 0.292 | 35.022 |
| 41 | 303.48 | 1,318.04 | 0.461 | 34.976 |

ในลำดับต่อมาได้ทำการทดลองวัดค่า MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW ดังแสดงในภาพประกอบ 5.30(ก) โดยในกรณีของกลุ่มตัวอย่าง RW = 29 nm และ RW = 41 nm ให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ที่สอดคล้องกับกรณีของหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 26 nm ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองวัดค่า MR ในกลุ่มตัวอย่าง RW พบว่า ค่า MR จะมีค่าแปรผกผันกับขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูล โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ในกรณีที่หัวอ่านข้อมูลมีขนาดความกว้างเท่ากับ 41 nm จะมีความชันต่ำกว่ากรณีที่หัวอ่านข้อมูลมีขนาดความกว้างเท่ากับ 26 nm และ 29 nm ดังแสดงในภาพประกอบ 5.30(ก) เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มากขึ้นจะต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นเพื่อเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางขนานหรือทิศทางตรงกันข้ามกับชั้น RL



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5.30 ผลการวัด (ก) ค่า MR และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW

นอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาค่าอัตราส่วน R โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการ (5.3) หรือ

$$\text{MR ratio [\%]} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \quad (5.17)$$

เมื่อ R_P คือ ค่าต้านทานที่วัดได้ในกรณี P state (ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก)

R_{AP} คือ ค่าต้านทานที่วัดได้ในกรณี AP state (ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ)

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างช่องทางอ่านข้อมูลและค่าอัตราส่วน MR ดังแสดงในภาพประกอบ 5.30(ข) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วน MR ที่ใช้สำหรับการแสดงค่าความแตกต่างของค่าสัญญาณบิต 0 และบิต 1 จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าแปรผันตรงกับขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า MR หรือค่าต้านทานเชิงพื้นที่ (resistance area, RA) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มของความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล [174] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการปรับลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่มากเกินไปอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูลลดต่ำลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความกว้างของหัวอ่านข้อมูลกลับทำให้เกิดข้อจำกัดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทิศทางแมกนีโทเซชันภายในชั้น FL ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุที่ทำให้เกิดค่า RA ที่ต่ำและค่าอัตราส่วน MR ที่สูงในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลที่น้อยจึงมีความสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลสูง

ในลำดับต่อมาจะได้ทำการพิจารณาผลกระทบของค่า RA ต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก โดยกลุ่มตัวอย่างโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า RA จะถูกสร้างขึ้นโดยกำหนดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเท่ากับ 26 nm แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้น SL เนื่องจากค่า RA นั้นสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ $RA = \rho L$ โดยที่ ρ คือค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและ L คือความหนาของชั้นวัสดุ สำหรับกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่มีค่า RA ต่างกันจะถูกแบ่งออกเป็นสี่กลุ่มซึ่งมีค่า RA เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 และ 0.45 โอห์ม·ตารางไมโครเมตร ($\Omega \cdot \mu\text{m}^2$) สำหรับผลการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่านข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า RA ในขณะที่ไม่มีการบ่อนสนามแม่เหล็กภายนอกถูกแสดงดังตาราง 5.8 โดยจะเห็นได้ว่าค่า MR จะมีค่าแปรผันตามค่า RA ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้น SL ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้ความสามารถในการส่งผ่านสปินจากชั้น RL ไปยังชั้น FL มีแนวโน้มลดต่ำลงและเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลลดต่ำลง [175] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีค่า RA สูง

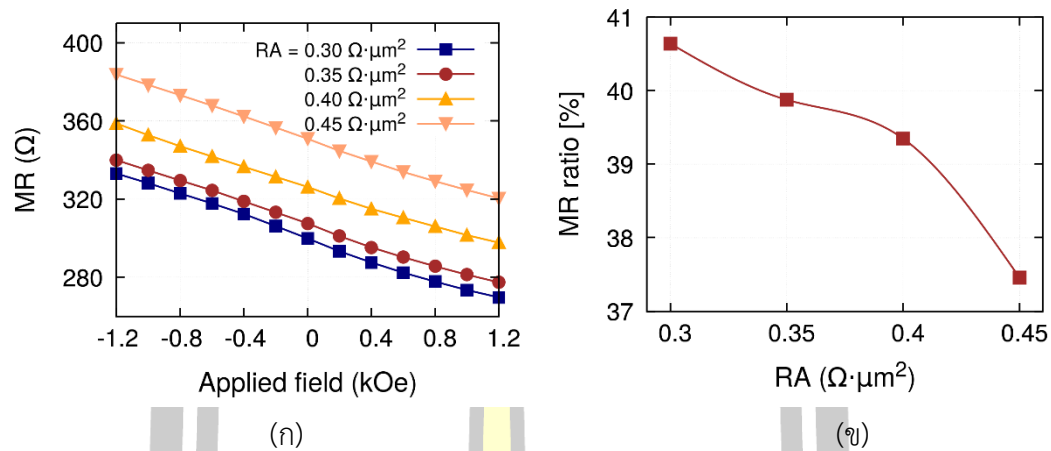
เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า RA และค่า MR ของหัวอ่านข้อมูลที่วัดได้ในขณะที่ไม่มีการบ่อนสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้สามารถคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัด ($A = RA/R$) และค่ากระแสไฟฟ้า ($I = V/R$) ที่ไหลผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล รวมไปถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($j_e = I/A$) ดังแสดงในตาราง 5.8 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าแปรผกผันกับปริมาณ RA ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้น

ตาราง 5.8 ผลการวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าเฉลี่ยของโครงสร้าง CoFeB(3nm)/MgO(t=0.5-1nm)/CoFeB(8nm) ที่มีความกว้างของหัวอ่านข้อมูลเท่ากับ 26 nm เมื่อทำการป้อนแรงดันไปอัสขนาดเท่ากับ 140 mV

| RA ($\Omega \cdot \mu\text{m}^2$) | ค่าต้านทานทาง ไฟฟ้าเฉลี่ย (Ω) | พื้นที่หน้าตัด (nm^2) | ค่ากระแสไฟฟ้า (mA) | ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (MA/cm^2) |
|--|---|-------------------------------------|-----------------------|--|
| 0.30 | 299.83 | 1,000.56 | 0.467 | 46.67 |
| 0.35 | 307.53 | 1,138.10 | 0.455 | 39.98 |
| 0.40 | 327.50 | 1,221.37 | 0.427 | 34.96 |
| 0.45 | 337.00 | 1,335.31 | 0.415 | 31.08 |

ในลำดับต่อมาได้ทำการทดลองวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า MR สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ดังแสดงในภาพประกอบ 5.31(ก) จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ต่อปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีศึกษาก่อนหน้านี้ที่แมกนีไทเซชันภายในชั้น RL และชั้น FL จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นแบบ P state เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก และจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นแบบ AP state เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า MR จะมีค่าแปรผันตามค่า RA ที่เพิ่มสูงขึ้นตลอดช่วงของการให้สนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้น SL ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปีนวาล์ว [175] เมื่อพิจารณาผลของค่า RA ที่มีต่อค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูล พบว่าค่าอัตราส่วน MR มีค่าลดลงเมื่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงพื้นที่ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 5.31(ข) เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้น MgO มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการทะลุผ่านของกระแสสปินโพลารไรซ์ที่ลดลงซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วน MR ของหัวอ่านข้อมูลมีค่าที่ต่ำลงสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา [176], [177]



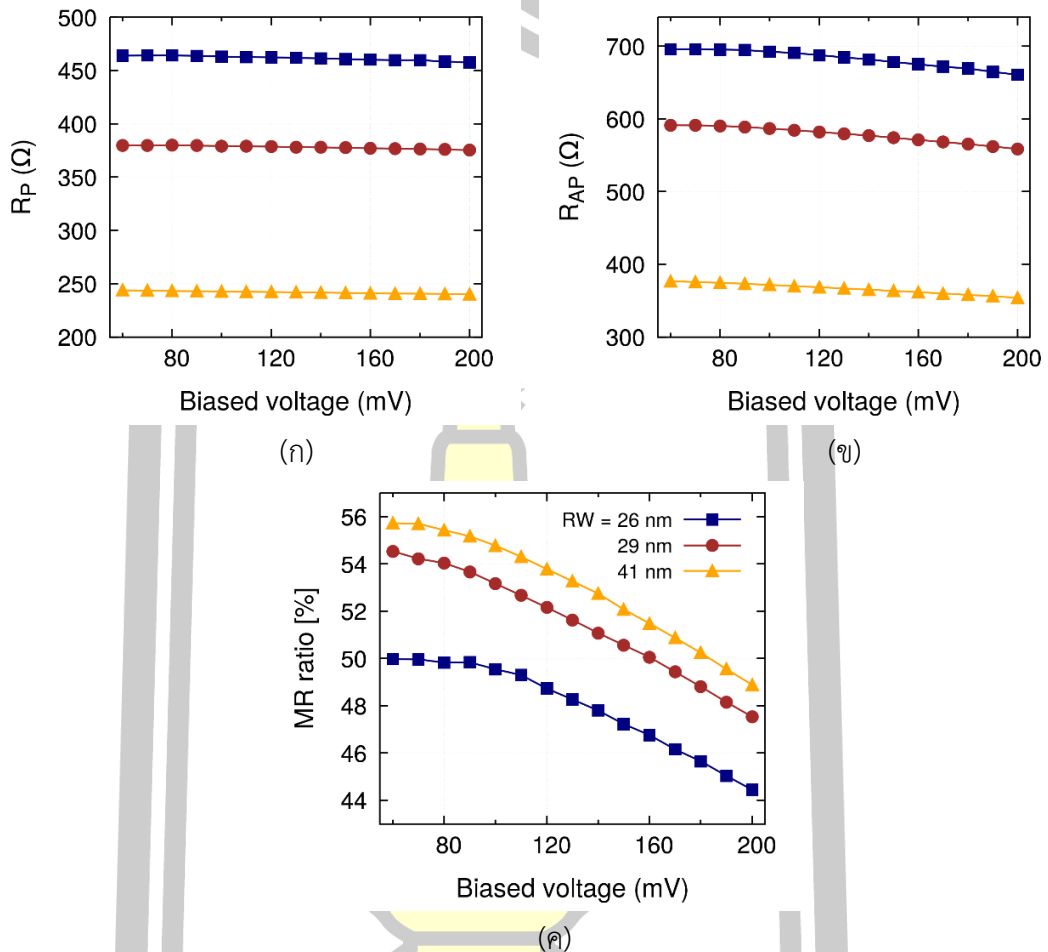
ภาพประกอบ 5.31 ผลการวัด (ก) ค่า MR และ (ข) ค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแม่เหล็กจาก -1.2 kOe ถึง +1.2 kOe ในขณะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 140 mV สำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA

5.4.3.3 ผลการป้อนแรงดันไบอัส

โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูลจะต้องมีค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูล กล่าวคือ จะต้องมีความถี่ไม่น้อยเกินไปจนทำให้ไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของค่าสัญญาณของบิต 0 และ 1 ได้ และจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปจนทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง เนื่องจากการส่งผ่านสปินทอร์ก (spin transfer torque) [158], [159] จากกระแสสปินโพลารไรซ์ที่มีค่าสูงจะทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของกระแสสปินและเบี่ยงเบนออกจากทิศทางของบิตข้อมูลที่ต้องการอ่าน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาดในการแสดงค่าสัญญาณการอ่านข้อมูล [163] ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.2 จากการพิจารณากระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอ่านข้อมูลเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลของการป้อนแรงไบอัสต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า MR และค่าอัตราส่วน MR เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านสปินที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปินวาล์วในเชิงการทดลอง ในลำดับแรกจะได้ทำการวัดค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์วในกรณี P state (R_P) และ AP state (R_{AP}) โดยการควบคุมทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น RL และชั้น FL ด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีขนาดความแรงเท่ากับ 1.2 kOe ในทิศทางบวกและทิศทางลบตามลำดับ

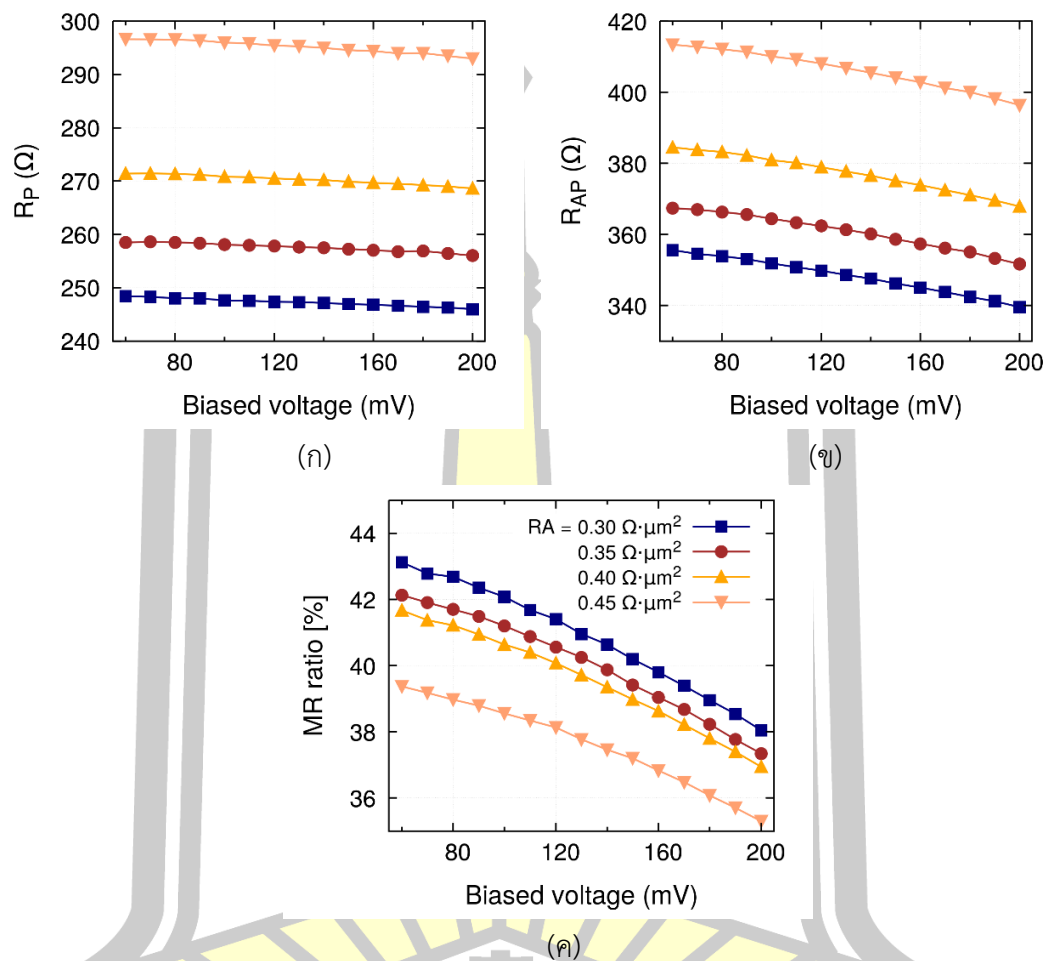
จากนั้นทำการวัดค่าต้านทานแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของแรงดันไบอัสในทิศทางตรงซึ่งมีค่าตั้งแต่ 60 mV จนถึง 200 mV เพื่อวัดค่าต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล



ภาพประกอบ 5.32 ผลการวัดค่า (ก) R_P (ข) R_{AP} และ (ค) อัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW

ภาพประกอบ 5.32(ก) และ (ข) แสดงผลการวัดค่า R_P และ R_{AP} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW จากภาพจะเห็นได้ว่าปริมาณ R_P และ R_{AP} มีค่าแปรผกผันกับขนาดของปริมาณแรงดันไบอัส เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแรงดันไบอัสจะส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดจากกระแสสปินโพลาไรซ์กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL และส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้น RL ได้อย่างสมบูรณ์ นำไปสู่การลดลงของค่าอัตราส่วน MR เมื่อมีการป้อนแรงดันไบอัสด้วยขนาดที่เพิ่มมากขึ้นเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 5.32(ค) นอกจากนี้ยังจะสังเกตเห็นได้ว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ($RW = 26$ nm)

จะให้ค่าอัตราส่วน MR ที่ต่ำกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ($RW = 29$ และ $RW = 41$ nm) เนื่องจากหัวอ่านที่มีความกว้างน้อยจะมีพื้นที่หน้าตัดของการส่งผ่านกระแสสปินโพลารไรซ์ที่แคบทำให้มีความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่ที่สูงและส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์วที่มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่



ภาพประกอบ 5.33 ผลการวัดค่า (ก) R_P (ข) R_{AP} และ (ค) อัตราส่วน MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาผลการวัดค่า R_P และค่า R_{AP} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของการป้อนแรงดันไบอัสในทิศทางตรงสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ดังแสดงในภาพประกอบ 5.33 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า R_P และค่า R_{AP} จะมีค่าลดลงและแปรผกผันกับขนาดของปริมาณแรงดันไบอัสที่เพิ่มสูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแรงดันไบอัสส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้น FL มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางด้วยผลของปรากฏการณ์สปินทอร์กเช่นเดียวกันกับกรณีของกลุ่มตัวอย่าง RW ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วน MR จะมีค่า

แปรผันตามขนาดของ RA ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากหัวอ่านข้อมูลที่มีพื้นที่หน้าตัดของการส่งผ่านของกระแสสปินที่น้อยจะส่งผลทำให้ความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินที่สูง

จากผลการศึกษาในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่าการป้อนแรงดันไบอัสที่สูงมากจนเกินไปเป็นสาเหตุทำให้เกิดแรงบิดสปินที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันและไม่สามารถจัดเรียงตัวในทิศทางขนานและตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL ได้อย่างสมบูรณ์ นำไปสู่การลดลงของค่าอัตราส่วน MR โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ $RW = 26 \text{ nm}$ โดยหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการลดลงของค่าอัตราส่วน MR ที่มากกว่าหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดของการส่งผ่านของกระแสสปินที่น้อย ส่งผลให้มีความหนาแน่นของกระแสสปินเชิงพื้นที่ที่มาก ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านแรงบิดสปินที่สูง ในขณะที่ผลของความหนาแน่นของชั้น SL มีค่าเป็นอิสระกับผลของแรงดันไบอัส

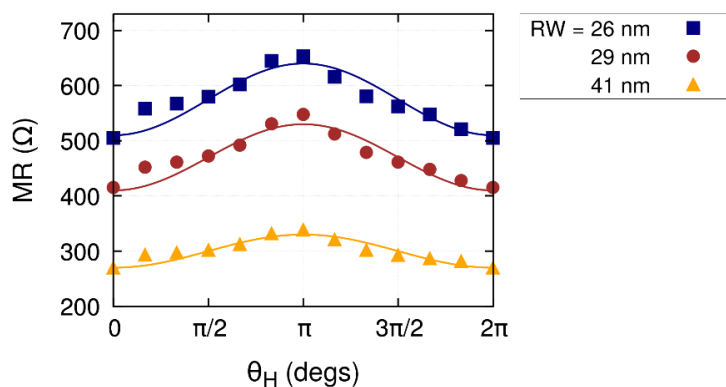
5.4.3.4 ผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL

การทำงานของหัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์วจะเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล เพื่อตรวจวัดค่าต้านทานแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ตามทิศทางของบิตข้อมูลภายในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยปริมาณค่าต้านทานที่วัดได้จะถูกนำมาใช้สำหรับการจำแนกความแตกต่างของค่าสัญญาณของบิต 0 และ 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณค่าต้านทานแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL [15], [23], [24] จากกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลจะเห็นได้ว่าผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้ทำการทดลองวัดผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL ที่ส่งผลต่อปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR ของกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูลและกลุ่มตัวอย่างหัวอ่านข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานเชิงพื้นที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้น SL

การศึกษาผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL ที่ส่งผลต่อลักษณะการส่งผ่านสปินและค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลด้วยเครื่องมือวัด QST ในหัวข้อนี้ได้กำหนดให้แรงดันไบอัสที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลนั้นมีค่าคงที่เท่ากับ 140 mV ซึ่งเป็นค่าแรงดันไบอัสมาตรฐาน (บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี จำกัด) ที่ถูกใช้สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูล สำหรับวิธีการควบคุมทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FL ให้ทำมุมใดๆ ที่ต้องการพิจารณาเกี่ยวกับทิศทางของ

แมกนีไทเซชันในชั้น RL จะอาศัยตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในแนวแกน x และแนวแกน y พาดผ่านกัน (cross track field) เพื่อให้สามารถทำการสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FL ด้วยมุมใดๆ ที่ต้องการศึกษาได้ โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดสนามแม่เหล็กที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีขนาดคงที่เท่ากับ 1.2 kOe ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมการป้อนสนาม (applied field angle, θ_H) ตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 30°

ในลำดับแรกได้ทำการวัดผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL หรือมุม θ_H ที่ส่งผลต่อลักษณะการส่งผ่านสปินและค่า MR ของกลุ่มตัวอย่าง RW ดังแสดงในภาพประกอบ 5.35 เมื่อพิจารณาผลของมุมดังกล่าวที่ส่งผลต่อค่า MR พบว่าในกรณีที่ $\theta_H = 0^\circ$ หรือกรณี P state จะสามารถวัดค่า MR ได้ต่ำสุด โดยค่า MR มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่ง $\theta_H = 180^\circ$ หรือกรณี AP state และมีแนวโน้มลดลงสู่ค่าต่ำสุดอีกครั้งในกรณีที่ $\theta_H = 360^\circ$ สอดคล้องกับผลการคำนวณค่าต้านทานทางแม่เหล็กในกรณีที่มุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ $0^\circ - 360^\circ$ กับฟังก์ชัน $a + b\sin^2(\theta/2)$ ซึ่งถูกใช้สำหรับการอธิบายปรากฏการณ์ค่าต้านทานทางแม่เหล็กในเชิงการทดลอง [165], [166] เมื่อ a คือค่าต้านทานทางแม่เหล็กในกรณี P state และ b คือค่า ΔR ระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กในกรณี P state และ AP state

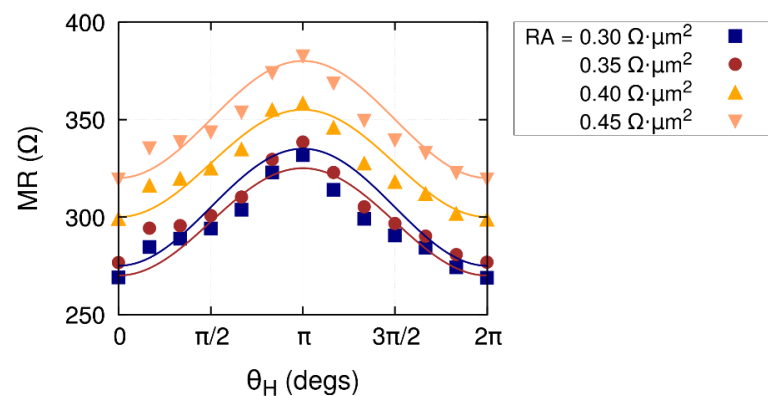


ภาพประกอบ 5.34 ผลการวัดค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RW

นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะมีค่าสูงที่สุดในกรณีที่ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเท่ากับ 26 nm และจะมีค่าต่ำที่สุดในกรณีที่ความกว้างของหัวอ่านข้อมูลมีค่าเท่ากับ 41 nm เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ที่

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นสาเหตุทำให้กระแสสปินโพลาไรซ์สามารถไหลผ่านได้ง่ายและนำไปสู่การลดลงของปริมาณค่าต้านทานตามความสัมพันธ์ $R = \rho L/A$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการวัดค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA ดังแสดงในภาพประกอบ 5.36 พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านทานทางแม่เหล็กจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับกรณีศึกษาก่อนหน้านี้ที่สามารถอธิบายผลการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ตามมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกด้วยฟังก์ชัน $a + b \sin^2(\theta/2)$ ในขณะที่ขนาดของค่า MR จะมีค่าแปรผกผันกับค่า RA ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้น SL ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้ความสามารถในการส่งผ่านสปินจากชั้น RL ไปยังชั้น FL มีแนวโน้มลดต่ำลงและเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลลดต่ำลง [165], [166] ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4.3.2



ภาพประกอบ 5.35 ผลการวัดค่า MR ที่เป็นฟังก์ชันของมุมการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับกลุ่มตัวอย่าง RA

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินและค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์วที่รวมผลของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน AF/PL/SU/FL ด้วยแบบจำลองแบบมัลติสเกลที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องตามทฤษฎีและให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับผลการคำนวณในระดับอะตอม เมื่อนำเอาแบบจำลองแบบมัลติสเกลมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินและค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์ว ได้แก่ ผลของการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดปริมาณค่า MR และสัญญาณการอ่านข้อมูล

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้างวัสดุ เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไบอัสที่สูงส่งผลทำให้เกิดกระแสสปินโพลาไรซ์มีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย และทำให้เกิดพฤติกรรมการส่งผ่านสปินที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL โดยค่า MR ของโครงสร้างสปินวาล์วที่ถูกใช้ในการศึกษานี้จะมีค่าต่ำที่สุดในกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากมีการกระเจิงของสปินที่ต่ำเมื่อเทียบกับกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม นอกจากนี้ยังพบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองแบบมัลติ-สเกลมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่สุดคล้องกับผลการทดลองวัดค่า MR สำหรับหัวอ่านข้อมูลจริงในเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีนัยสำคัญ



บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอและพัฒนาแบบจำลองในระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและศึกษาพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลและปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนรวมไปถึงปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินภายในหัวอ่านข้อมูล การจำลองลักษณะโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแบบแกรนูลาร์ทั้งในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางจะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอยในลำดับแรกได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากเพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบและศึกษาคคุณสมบัติทางแม่เหล็กและอธิบายลักษณะเฉพาะของแผ่นบันทึกข้อมูลโคบอลต์แพลตทินัม (CoPt) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ถูกใช้ในแผ่นบันทึกข้อมูลในปัจจุบัน แบบจำลองนี้ได้อาศัยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo approach) ในการพิจารณากระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูล แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กและออกแบบลักษณะเฉพาะของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก เพื่อใช้สำหรับการอธิบายปัจจัยภายในและปัจจัยทางโครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล จากการศึกษาพบว่าขนาดของเกรนแม่เหล็กที่เล็กที่สุดสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล CoPt ซึ่งยังคงรักษาเสถียรภาพทางความร้อนไว้ได้จะมีขนาดเท่ากับ 6 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า การลดขนาดของชั้นฟิล์มแม่เหล็กจะส่งผลทำให้เกิดพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันแบบไม่พร้อมเพรียงกัน สุดท้ายนี้ยังพบว่าค่าสนามเคอเออร์ซีวิตีของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบใหม่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของชารอค จากการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบตั้งฉากแบบใหม่ด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์วัสดุแม่เหล็กสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบใหม่ได้

ในลำดับต่อมาได้ทำการพัฒนาและนำเสนอแบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัส-แลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้น AF เชื่อมติดกับชั้น FM เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF และชั้น FM ได้เลือกใช้วิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการ

แลนดอว์ – ลิฟท์ชิต – กิลเบิร์ต (Landau – Liftshitz – Gilbert equation, LLG) ตามลำดับ เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายลักษณะการผันกลับทิศทางของวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภท แบบจำลองที่ถูกลำเสนอขึ้นนี้มีพื้นฐานการคำนวณที่พิจารณาความเชื่อมโยงกันของระยะเวลาในการคำนวณ (timescale) ระหว่างสองวิธีการเพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันได้อย่างถูกต้อง

แบบจำลองแกรนูลาร์อย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนถูกพัฒนาขึ้นเป็นลำดับแรกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยภายในและปัจจัยทางโครงสร้างของชั้นวัสดุ IrMn/CoFe โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายภายในชั้นวัสดุ IrMn ที่ส่งผลกระทบต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (H_{EB}) ซึ่งผลการคำนวณผ่านแบบจำลองอย่างง่ายให้แนวโน้มที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองและทฤษฎี โดยพบว่าปริมาณ H_{EB} จะมีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์ม AF เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าแปรผกผันกับชั้นฟิล์ม FM นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้น IrMn เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่า H_{EB} และทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น CoFe มีการกลับทิศทางอย่างไม่พร้อมเพรียงกัน เนื่องจากผลการกระจายตัวของแมกนีไทเซชันในชั้น IrMn ไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น CoFe ได้อย่างสมบูรณ์

อย่างไรก็ตามแบบจำลองอย่างง่ายยังคงมีข้อจำกัดในการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่รบกวนระบบขณะทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสส่งผลทำให้การคำนวณปริมาณ H_{EB} ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิมีค่าคลาดเคลื่อนและทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_B) ที่แน่นอนของระบบได้ ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่พิจารณาผลการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF (setting process) และพิจารณาการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol เพื่อใช้สำหรับการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้าง IrMn/CoFe การประยุกต์ใช้แบบจำลองเสมือนจริงทำให้สามารถคำนวณปริมาณ H_{EB} ได้โดยปราศจากอิทธิพลของความร้อนที่รบกวนระบบระหว่างขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสซึ่งนำไปสู่การทำนายค่ากลางของอุณหภูมิวิกฤต (T_B) ที่แน่นอนของระบบและมีความถูกต้องได้ จากผลการคำนวณพบว่าโครงสร้าง IrMn(8nm)/CoFe(4nm) จะให้ค่า $\langle T_B \rangle = 440$ K ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol ช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทที่สำคัญของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่า H_{EB} และค่า

(T_B) ซึ่งบ่งบอกถึงเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe และนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้างชั้นไบออสแลกเปลี่ยนภายในหัวอ่านข้อมูลได้

ในลำดับสุดท้ายของงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลซึ่งเป็นการนำแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบออสแลกเปลี่ยนมาใช้ร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็ก (MR) สำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์ว AF/PL/SL/FL ในขณะที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างวัสดุ แบบจำลองนี้ได้อาศัยเทคนิควิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในการพิจารณาผลของปรากฏการณ์ไบออสแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น AF และชั้น PL ในขณะที่พลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น PL และชั้น FL ที่รวมผลของสนามสปินทอร์กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะถูกอธิบายสมการ LLG จากนั้นแบบจำลองการส่งผ่านสปินจะถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาปริมาณการส่งผ่านสปินและค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล การศึกษาในส่วนนี้เริ่มจากการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบมัลติสเกลเปรียบเทียบกับแบบจำลองในระดับอะตอม โดยทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในโครงสร้าง IrMn/CoFe/Cu/CoFe ที่มีต่อค่า MR จากการศึกษาพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลมีค่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองในระดับอะตอมได้เป็นอย่างดี โดยค่า MR ของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้างวัสดุ และมีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้น PL และชั้น FL นอกจากนี้ยังพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองแบบมัลติสเกลมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า MR ที่มีความสอดคล้องกับผลการทดลองในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงในเชิงอุตสาหกรรม

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองแกรนูลาร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ทั้งในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูลและหัวอ่านข้อมูลนั้นมีความถูกต้องตามทฤษฎีและสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้อย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองแกรนูลาร์เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบ ศึกษา และทำนายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลและโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสม การลดต้นทุนการผลิต และการพัฒนาประสิทธิภาพขององค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบใหม่ในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะและหัวข้อวิจัยในอนาคต

การพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบองค์ประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อศึกษาและทำนายผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่อาจจะส่งผลต่อกระบวนการทำงานและประสิทธิภาพขององค์ประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในเชิงทฤษฎีถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำคัญและเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตรวมไปถึงระยะเวลาในการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการศึกษาในเชิงการทดลองได้ จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองแกรนูลาร์ระดับจุลภาคที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการอธิบายผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อกลไกทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน และโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ได้อย่างถูกต้องตามทฤษฎีและสอดคล้องกับผลการศึกษาในเชิงการทดลอง ดังนั้นจึงถือได้ว่าแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เปรียบเสมือนกับเครื่องมือทางการทดลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูล โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน และโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

อย่างไรก็ตามการกำหนดเงื่อนไขการศึกษาดังที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้ยังคงมีข้อจำกัดในหลายด้านซึ่งจะนำไปสู่หัวข้อวิจัยในอนาคตและการพัฒนาแบบจำลองแกรนูลาร์ระดับจุลภาคให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นได้ เมื่อขนาดขององค์ประกอบภายในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกจำกัดให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโน (nanoscale) พบว่าผลของขนาดของแผ่นฟิล์ม (element size effect) และการตัดเกรนที่บริเวณขอบของแผ่นฟิล์ม (grain cutting effect) [142], [178] รวมไปถึงผลของความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ (interfacial roughness) [39] ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานขององค์ประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของโครงสร้างสปินวาล์วหรือโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล นอกจากนี้ยังพบว่าการลดขนาดของบิตข้อมูลเพื่อเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นสาเหตุให้มีความจำเป็นต้องลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลตามไปด้วย ดังนั้นการกำหนดขนาดและลักษณะของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลให้มีค่าเท่ากับขนาดของอุปกรณ์จริงจะช่วยให้สามารถทำนายผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นได้

6.2.1 แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลการวัดค่ากลางของอุณหภูมิกีดกัน (T_B) ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วย York protocol [25] นอกจากที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของระบบแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติเฉพาะของเกรนแม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี [134] และค่าความถี่เฉพาะ (characteristic relaxation frequency) [179] เป็นต้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ [134]

$$K_{AF}(\langle T_B \rangle) = \frac{\ln(\tau f_0)}{V_m} k_B \langle T_B \rangle \quad (6.1)$$

- เมื่อ K_{AF} คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้น AF
 $\langle T_B \rangle$ คือ ค่ากลางของอุณหภูมิเกิดกันของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่วัดได้จาก York protocol
 τ คือ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับกระบวนการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation process) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1800 s
 f_0 คือ ค่าคงที่ของการสั่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^9 s^{-1}
 V_m คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF
 k_B คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ หรือ $1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตาม York protocol สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์เฉพาะของวัสดุข้างต้นได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถพิจารณาค่ากลางของอุณหภูมิเกิดกัน $\langle T_B \rangle$ ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้ถูกต้องตามขั้นตอนการทดลองได้ ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.5

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุ IrMn ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากวัสดุ IrMn ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเป็นชั้นอ้างอิงภายในหัวอ่านข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน [132] อย่างไรก็ตามวัสดุ IrMn มีคุณสมบัติเป็นธาตุหายาก (rare earth element) ซึ่งมีราคาที่สูง [180] ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนการผลิตจึงได้มีการศึกษาหาวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพและราคาต้นทุนการผลิตเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไป

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ไนไตรโดแมงกานีส (Nitridomanganese, MnN) เป็นหนึ่งในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการดังกล่าวได้ โดยโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน MnN/CoFe สามารถให้ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่แสดงถึงความสามารถในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกได้สูงกว่า 1000 Oe

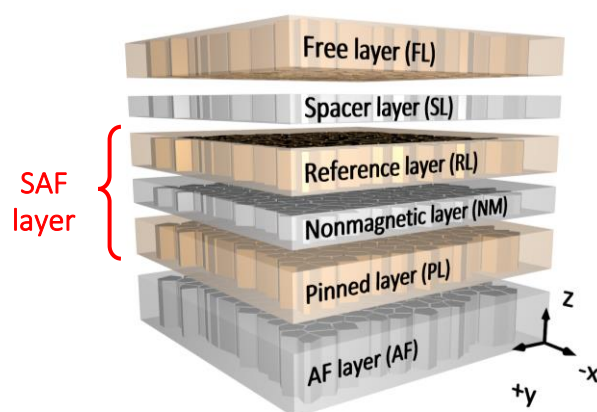
ในช่วงอุณหภูมิห้อง [181] นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุประเภทนี้มีค่าอุณหภูมิสูงเท่ากับ 660 K [180], [182] อีกทั้งยังมีค่าอุณหภูมิที่แสดงถึงความสามารถในการทนต่อความร้อนได้สูงเทียบเท่ากับ IrMn และจากการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุ MnN ด้วยการเตรียมตัวอย่างโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน Ta(10nm)/MnN(t_{MnN})/CoFe(2nm)/Ta(2nm) [180] พบว่าสามารถพิจารณาหาค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุ MnN ได้เท่ากับ $(6.3 \pm 0.3) \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ อย่างไรก็ตามการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้างชั้น MnN/CoFe ในเชิงทฤษฎีเพื่ออธิบายกลไกทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุดังกล่าว ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุ MnN/CoFe โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นจึงเป็นอีกหนึ่งหัวข้อวิจัยในอนาคต

6.2.2 แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล

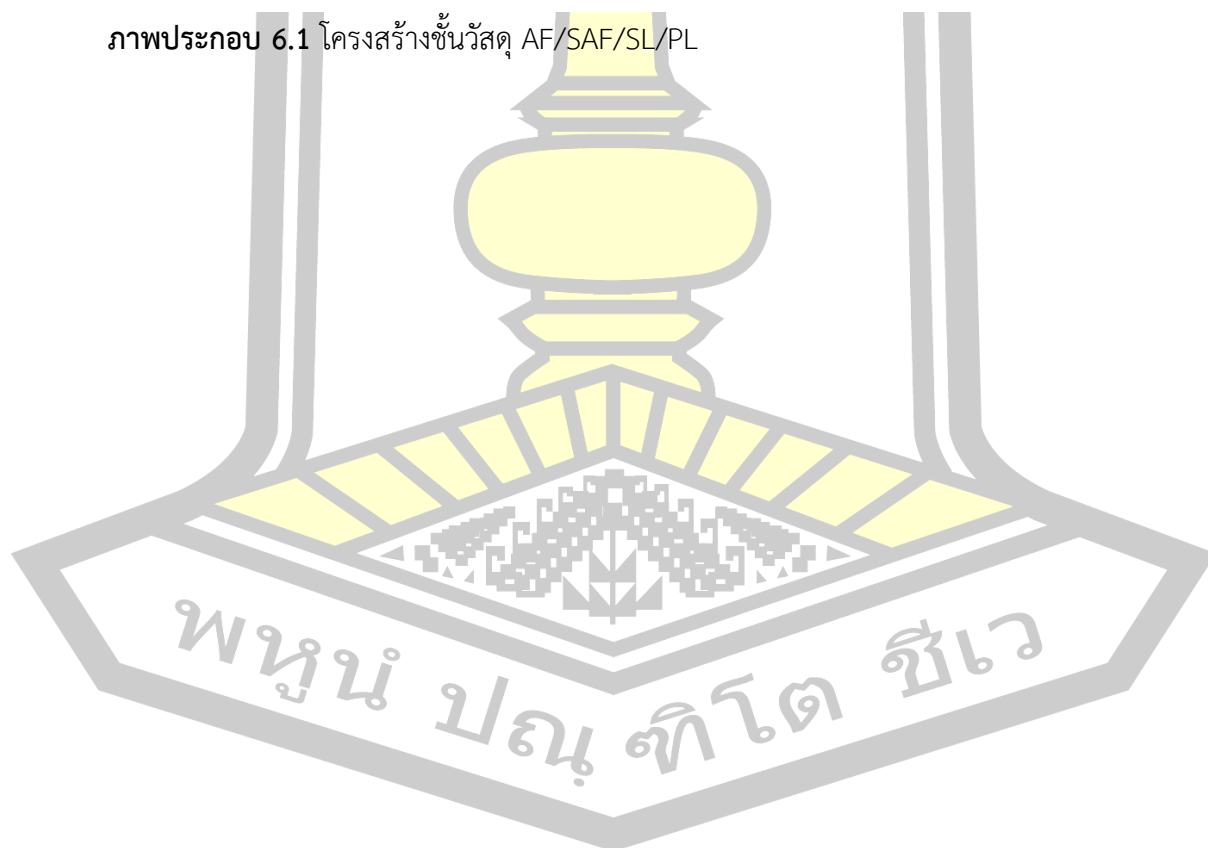
ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุ IrMn/CoFe/Cu/CoFe เพียงโครงสร้างเดียวเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบมัลติสเกลในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกประเภทอื่นๆ เช่น วัสดุโคบอลต์ (cobalt, Co) วัสดุโคบอลต์ไอรอนโบรอน (cobalt iron boron, CoFeB) วัสดุ निकเกิลไอรอน (nickel iron, NiFe) และวัสดุฮอยสเลอร์อัลลอยด์ (Heusler alloy) [183], [184] เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสมแก่การออกแบบโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ต่อไป

นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าแบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นกำหนัดโครงสร้างสปินวาล์วอย่างง่ายที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุ อย่างไรก็ตามโครงสร้างสปินวาล์วที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันจะมีลักษณะโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มชั้นวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก NM และชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น FL ไว้ระหว่างชั้น PL และชั้น SL และสร้างเป็นชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic, SAF) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านข้อมูล [81]–[83] ดังที่ได้อธิบายถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.1.3 ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองแบบมัลติสเกลสำหรับ

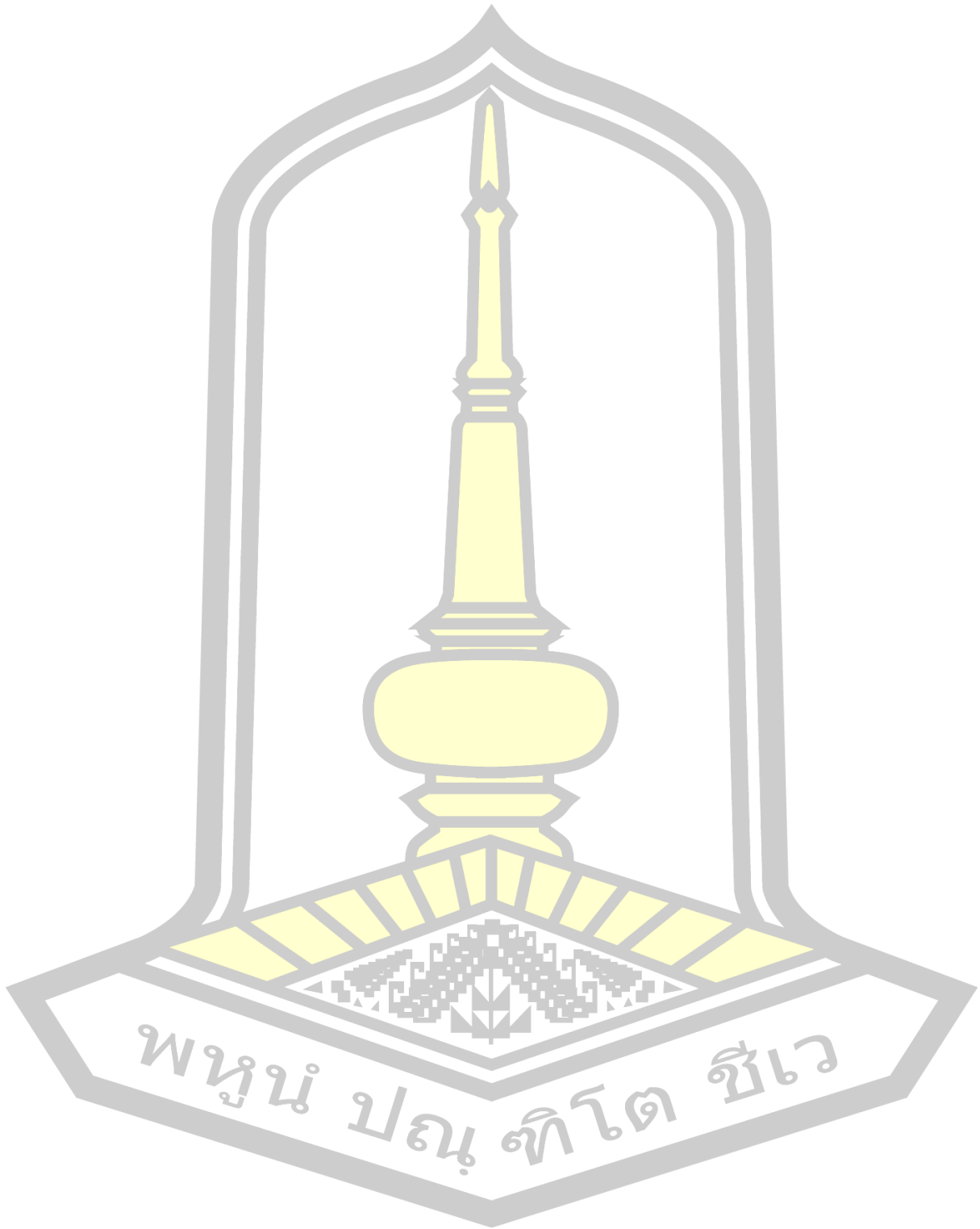
โครงสร้างหัวอ่านข้อมูลมีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้นมีความจำเป็นต้องเพิ่มชั้น SAF ในโครงสร้างชั้นวัสดุ AF/PL/SL/FL ให้กลายเป็นโครงสร้างชั้นวัสดุ AF/SAF/SL/PL ดังแสดงในภาพประกอบ 6.1 เพื่อให้สามารถทำการศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปินและค่าต้านทานทางแม่เหล็กของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลที่มีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้นได้



ภาพประกอบ 6.1 โครงสร้างชั้นวัสดุ AF/SAF/SL/PL



บรรณานุกรม



Bibliography

- [1] M. H. Kryder and C. S. Kim, "After hard drives-what comes next?," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45(10), 2009.
- [2] J. Kim, A. J. Hong, S. M. Kim, E. B. Song, J. H. Park, J. Han, S. Choi, D. Jang, J. T. Moon, and K. L. Wang, "Novel vertical-stacked-array-transistor (VSAT) for ultra-high-density and cost-effective NAND flash memory devices and SSD (solid state drive)," in *Digest of Technical Papers - Symposium on VLSI Technology*, 2009.
- [3] D. Apalkov, A. Khvalkovskiy, S. Watts, V. Nikitin, X. Tang, D. Lottis, K. Moon, X. Luo, E. Chen, A. Ong, A. Driskill-Smith, and M. Krounbi, "Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM)," *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 9(2), 2013.
- [4] A.V. Khvalkovskiy, D. Apalkov, S. Watts, R. Chepulsii, R. S. Beach, A. Ong, X. Tang, A. Driskill-Smith, W. H. Butler, P. B. Visscher, D. Lottis, E. Chen, V. Nikitin, and M. Krounbi, "Basic principles of STT-MRAM cell operation in memory arrays," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 46(7), no. 074001, 2013.
- [5] M. L. Williams, R. L. Comstock, C. D. Graham, and J. J. Rhyne, "An analytical model of the write process in digital magnetic recording," *AIP Conf. Proc.*, vol. 5(1), pp. 738–742, 1972.
- [6] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40(9), p. R149, 2007.
- [7] S. N. Piramanayagam and K. Srinivasan, "Recording media research for future hard disk drives," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321(6), pp. 485–494, 2009.
- [8] G. Ju, Y. Peng, E. K. C. Chang, Y. Ding, A. Q. Wu, X. Zhu, Y. Kubota, T. J. Klemmer, H. Amini, L. Gao, Z. Li Fan, T. Rausch, P. Subedi, M. Ma, S. Kalarickal, C. J. Rea, D. V. Dimitrov, P. W. Huang, K. Wang, X. Chen, C. Peng, W. Chen, J. W. Dykes, M. A. Se, "High density heat-assisted magnetic recording media and advanced characterization - progress and challenges," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51(11), pp. 1–9, 2015.
- [9] S. N. Piramanayagam, "Perpendicular recording media for hard disk drives," *J. Appl. Phys.*, vol. 102(1), p. 2, 2007.

- [10] H. J. Richter, A. Y. Dobin, O. Heinonen, K. Z. Gao, R. J. M. V. D. Veerdonk, R. T. Lynch, J. Xue, D. Weller, P. Asselin, M. F. Erden, and R. M. Brockie, "Recording on bit-patterned media at densities of 1 Tb/in² and beyond," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42(10), pp. 2255–2260, 2006.
- [11] H. J. Richter, A. Y. Dobin, R. T. Lynch, D. Weller, R. M. Brockie, O. Heinonen, K. Z. Gao, J. Xue, R. J. M. V. D. Veerdonk, P. Asselin, and M. F. Erden, "Recording potential of bit-patterned media," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88(22), no. 222512, 2006.
- [12] R. E. Rottmayer, S. Batra, D. Buechel, W. A. Challener, J. Hohlfield, Y. Kubota, L. Li, B. Lu, C. Mihalcea, K. Mountfield, K. Pelhos, C. Peng, T. Rausch, M. A. Seigler, D. Weller, and X. M. Yang, "Heat-assisted magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42(10), pp. 2417–2421, 2006.
- [13] J. G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang, "Microwave assisted magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44(1), pp. 125–131, 2007.
- [14] D. Litvinov, M. H. Kryder, and S. Khizroev, "Recording physics of perpendicular media: Hard layers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 241(2–3), pp. 453–465, 2002.
- [15] S. N. Piramanayagam and T. C. Chong, *Developments in data storage: Materials perspective*, United States: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2011.
- [16] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, "New magnetic anisotropy," *Phys. Rev.*, vol. 102(5), p. 1413, 1956.
- [17] J. Nogués and I. K. Schuller, "Exchange bias," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 192(2), pp. 203–232, 1999.
- [18] M. Kiwi, "Exchange bias theory," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 234(3), pp. 584–595, 2001.
- [19] A. E. Berkowitz and K. Takano, "Exchange anisotropy - A review," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 200(1–3), pp. 552–570, 1999.
- [20] Z. S. Mao, Y. Chen, F. Liu, X. Chen, B. Xu, P. Lu, M. Patwari, H. Xi, C. Chang, B. Miller, D. Menard, B. Pant, J. Loven, K. Duxstad, S. Li and P. R. Zhang, A. Johnston, R. Lamberton, M. Gubbins, T. McLaughlin, J. Gadbois, J. Ding, B. Cross, S. Xue, "Commercial TMR heads for hard disk drives: characterization and extendibility at 300 Gbit/in²," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42(2), pp. 97–102, 2006.

- [21] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61(21), p. 2472, 1988.
- [22] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions," *Nat. Mater.*, vol. 3(12), p. 868, 2004.
- [23] M. Ueno, H. Nagai, T. Sawasaki, and F. Hikami, "Spin-valve magnetoresistance sensor and thin film magnetic head," U.S. Patent No. 6340533, 2002.
- [24] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 19(16), no. 165221, 2007.
- [25] K. O'Grady, L. E. Fernandez-Outon, and G. Vallejo-Fernandez, "A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322(8), pp. 883–899, 2010.
- [26] L. E. Fernandez-Outon, G. Vallejo-Fernandez, S. Manzoor, and K. O'Grady, "Thermal instability in exchange-biased materials," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 9(4), pp. 1127–1132, 2007.
- [27] K. Nishioka, C. Hou, H. Fujiwara, and R. D. Metzger, "Grain size effect on ferro-antiferromagnetic coupling of NiFe/FeMn systems," *J. Appl. Phys.*, vol. 80(8), pp. 4528–4533, 1996.
- [28] K. Nishioka, S. Shigematsu, T. Imagawa, and S. Narishige, "Thickness effect on ferro/antiferromagnetic coupling of Co/CrMnPt systems," *J. Appl. Phys.*, vol. 83(6), pp. 3233–3238, 1998.
- [29] J. H. Lee, S. J. Kim, C. S. Yoon, C. K. Kim, B. G. Park, and T. D. Lee, "Thermal stability of the exchanged biased CoFe/IrMn electrode for the magnetic tunnel junction as a function of CoFe thickness," *J. Appl. Phys.*, vol. 92(10), pp. 6241–6244, 2002.
- [30] M. Ali, C. H. Marrows, M. Al-Jawad, B. J. Hickey, A. Misra, U. Nowak, and K. D. Usadel, "Antiferromagnetic layer thickness dependence of the IrMn/Co exchange-bias system," *Phys. Rev. B*, vol. 68(21), no. 214420, 2003.
- [31] V. Baltz, J. Sort, B. Rodmacq, B. Dieny, and S. Landis, "Size effects on exchange bias in sub-100 nm ferromagnetic-antiferromagnetic dots deposited on prepatterned substrates," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84(24), pp. 4923–4925,

- 2004.
- [32] L. E. Fernández-Outón, K. O'Grady, and M. J. Carey, "Thermal phenomena in IrMn exchange biased systems," *J. Appl. Phys.*, vol. 95(11), pp. 6852–6854, 2004.
- [33] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, "New Magnetic Anisotropy," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105(3), p. 904, 1957.
- [34] E. Fulcomer and S. H. Charap, "Thermal fluctuation aftereffect model for some systems with ferromagnetic-antiferromagnetic coupling," *J. Appl. Phys.*, vol. 43(10), pp. 4190–4199, 1972.
- [35] D. Choo, R. W. Chantrell, R. Lamberton, A. Johnston, and K. O'Grady, "A model of the magnetic properties of coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 101(9), no. 09E521, 2007.
- [36] B. Craig, R. Lamberton, A. Johnston, U. Nowak, R. W. Chantrell, and K. O'Grady, "A model of the temperature dependence of exchange bias in coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 103(7), no. 07C102, 2008.
- [37] J. Barker, B. Craig, R. Lamberton, A. Johnston, R. W. Chantrell, and O. Heinonen, "A model of the exchange bias setting process in magnetic read sensors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95(2), no. 022504, 2009.
- [38] G. Vallejo-Fernandez and J. N. Chapman, "Size effects in submicron exchange bias square elements," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94(26), no. 262508, 2009.
- [39] O. De Haas, R. Schäfer, L. Schultz, K. U. Barholz, and R. Mattheis, "Rotational magnetization processes in exchange biased $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ bilayers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 260(3), pp. 380–385, 2003.
- [40] W. Daeng-am, P. Chureemart, R. W. Chantrell, and J. Chureemart, "Granular micromagnetic model for perpendicular recording media: Quasi-static properties and media characterisation," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 52(42), no. 425002, 2019.
- [41] S. Ghosh and S. N. Mukhopadhyay, "A material based finite element analysis of heterogeneous media involving Dirichlet tessellations," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 104(2), pp. 211–247, 1993.

- [42] R. W. Chantrell, N. Walmsley, J. Gore, and M. Maylin, "Calculations of the susceptibility of interacting superparamagnetic particles," *Phys. Rev. B*, vol. 63(2), no. 024410, 2000.
- [43] P. Chureemart, J. Chureemart, and R. W. Chantrell, "Model of advanced recording media: The angular dependence of the coercivity including the effect of exchange interaction," *J. Appl. Phys.*, vol. 119(6), no. 063903, 2016.
- [44] J. Chureemart, R. Cuadrado, P. Chureemart, and R. W. Chantrell, "Multiscale modeling of spin transport across a diffuse interface," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 443, pp. 287–292, 2017.
- [45] N. Saenphum, J. Chureemart, R. W. Chantrell, and P. Chureemart, "Model of spin transport in noncollinear magnetic systems: Effect of diffuse interfaces," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 484, pp. 238–244, 2019.
- [46] R. F. L. Evans, W. J. Fan, P. Chureemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis, and R. W. Chantrell, "Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 26(10), no. 103202, 2014.
- [47] P. Williams, "The sputtering process and sputtered ion emission," *Surf. Sci.*, vol. 90(2), pp. 588–634, 1979.
- [48] J. Chureemart, "Orientation and thermal stability of advanced recording media," Ph.D. thesis, The University of York, York, England, 2013.
- [49] P. J. Grundy, "Thin film magnetic recording media," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 31(21), p. 2975, 1998.
- [50] D. N. Lambeth, E. M. T. Velu, G. H. Bellesis, L. L. Lee, and D. E. Laughlin, "Media for 10 Gb/in² hard disk storage: Issues and status (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 79(8), pp. 4496–4501, 1996.
- [51] S. Iwasaki and K. Takemura, "An analysis for the circular mode of magnetization in short wavelength recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 11(5), pp. 1173–1175, 1975.
- [52] S. Iwasaki, Y. Nakamura, and K. Ouchi, "Perpendicular magnetic recording with a composite anisotropy film," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 15(6), pp. 1456–1458, 1979.
- [53] S. Iwasaki and Y. Nakamura, "An analysis for the magnetization mode for high density magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13(5), pp. 1272–1277,

1977.

- [54] C. Chang, M. Plumer, C. Brucker, J. Chen, R. Ranjan, J. Van Ek, J. Yu, D. Karns, Y. Kubota, G. Ju, and D. Weller, "Measurements and modeling of soft underlayer materials for perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38(4), pp. 1637–1642, 2002.
- [55] Y. Sonobe, D. Weller, Y. Ikeda, M. Schabes, K. Takano, G. Zeltzer, B. K. Yen, M. E. Best, S. J. Greaves, H. Muraoka, and Y. Nakamura, "Thermal stability and SNR of coupled granular/continuous media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37(4), pp. 1667–1670, 2001.
- [56] J. Yasumori, Y. Sonobe, S. J. Greaves, and K. K. Tham, "Approach to high-density recording using CGC structure," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45(2), pp. 850–855, 2009.
- [57] G. Choe, M. Zheng, B. R. Acharya, E. N. Abarra, and J. N. Zhou, "Perpendicular recording CoPtCrO composite media with performance enhancement capping layer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41(10), pp. 3172–3174, 2005.
- [58] D. Suess, T. Schrefl, S. Fahler, M. Kirschner, G. Hrkac, F. Dorfbauer, and J. Fidler, "Exchange spring media for perpendicular recording," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87(1), no. 012504, 2005.
- [59] R. H. Victora and X. Shen, "Composite Media for Perpendicular Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41(2), pp. 537–542, 2005.
- [60] P. Chureemart, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, P. W. Huang, K. Wang, G. Ju, and J. Chureemart, "Hybrid design for advanced magnetic recording media: combining exchange-coupled composite media with coupled granular continuous media," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 8(2), no. 024016, 2017.
- [61] K. K. Tham, S. Saito, D. Hasegawa, N. Itagaki, S. Hinata, S. Ishibashi, and M. Takahashi, "Effect of inhomogeneous microstructure of granular layer on inter granular/inter layer exchange coupling in stacked perpendicular recording media," *J. Appl. Phys.*, vol. 112(9), no. 093917, 2012.
- [62] O. Saengmart, W. Daeng-am, P. Chureemart, and J. Chureemart, "The effect of media design in advanced recording media by the atomistic spin dynamics simulation," *SWU. Sci. J.*, vol. 33(2), p. 90, 2017.
- [63] T. P. Nolan, B. F. Valcu, and H. J. Richter, "Effect of composite designs on writability and thermal stability of perpendicular recording media," *IEEE*

- Trans. Magn.*, vol. 47(1), pp. 63–68, 2011.
- [64] R. Wood, “Future hard disk drive systems,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321(6), pp. 555–561, 2009.
- [65] S. Khizroev and D. Litvinov, “Perpendicular magnetic recording: Writing process,” *J. Appl. Phys.*, vol. 95(9), pp. 4521–4537, 2004.
- [66] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to magnetic materials*, 2nd edition, United States: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2009.
- [67] Y. Kanai and K. Yamakawa, “Narrow-track perpendicular write heads,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321(6), pp. 518–525, 2009.
- [68] E. Kim, Y. H. Im, Y. Kim, K. J. Lee, K. Lee, and N. Y. Park, “Head design scheme for perpendicular recording with single layered media,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37(4), pp. 1382–1385, 2001.
- [69] M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. Mcdaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y. T. Hsia, and M. F. Erden, “Heat assisted magnetic recording,” *Proc. IEEE*, vol. 96(11), pp. 1810–1835, 2008.
- [70] B. X. Xu, Z. J. Liu, R. Ji, Y. T. Toh, J. F. Hu, J. M. Li, J. Zhang, K. D. Ye, and C. W. Chia, “Thermal issues and their effects on heat-assisted magnetic recording system (invited),” *J. Appl. Phys.*, vol. 111(7), no. 07B701, 2012.
- [71] T. Zhou, M. Zhang, K. M. Cher, H. S. Wong, H. J. Chung, B. H. Low, Y. Yang, Z. Liu, and F. Tjiptoharsono, “Development of spin-torque oscillators and high Ku CoPt media with small grain size for microwave-assisted magnetic recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51(4), pp. 1–7, 2015.
- [72] C. Tsang, “Magnetics of small magnetoresistive sensors (invited),” *J. Appl. Phys.*, vol. 55(6), pp. 2226–2231, 1984.
- [73] H. Hauser, G. Stangl, and J. Hochreiter, “High-performance magnetoresistive sensors,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 81(1–3), pp. 27–31, 2000.
- [74] S. Tumanski, *Thin film magnetoresistive sensors*, United States: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2001.
- [75] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, “Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers,” *Phys. Rev. B*, vol. 43(1), p. 1297, 1991.

- [76] C. Tsang, R. E. Fontana, T. Lin, D. E. Heim, V. S. Speriosu, B. A. Gurney, and M. L. Williams, "Design, fabrication & testing of spin-valve read heads for high density recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30(6), pp. 3801–3806, 1994.
- [77] T. Machita, K. Shimazawa, D. Miyauchi, and T. Chou, "Magnetoresistive device of the CPP type, and magnetic disk system," U.S. Patent No. 7881023, 2011.
- [78] M. Sakai, K. Zhang, K. Takano, C. J. Torng, Y. Li, and P. K. Wang, "Method of forming a hard bias structure in a magnetic head," U.S. Patent No. 7275304, 2007.
- [79] T. Pan, "Ferromagnetic pinning structure including a first section antiferromagnetically coupled to a pinned layer and a second section elongated relative to the first section in a stripe height direction," U.S. Patent No 7436638, 2008.
- [80] S. C. Rudy, C. V. Macchioni, Y. Shen, B. W. Crue Jr, M. T. Harnischfeger, and S. J. Plewes, "Apparatus and method of device stripe height control," U.S. Patent No. 6193584, 2001.
- [81] J. L. Leal and M. H. Kryder, "Spin valves exchange biased by Co/Ru/Co synthetic antiferromagnets," *J. Appl. Phys.*, vol. 83(7), pp. 3720–3723, 1998.
- [82] J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, "Pinned synthetic ferrimagnets with perpendicular anisotropy and tuneable exchange bias," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83(9), pp. 1800–1802, 2003.
- [83] H. A. M. Van Den Berg, W. Clemens, G. Gieres, G. Rupp, W. Schelter, and M. Vieth, "GMR sensor scheme with artificial antiferromagnetic subsystem," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32(5), pp. 4624–4626, 1996.
- [84] S. Mao, Z. Gao, and A. Goyal, "Spin valve head with exchange bias stabilized free layer," U.S. Patent No. 6556392, 2003.
- [85] M. A. Seigler, G. J. Parker, and P. A. Van der Heijden, "Adjustable permanent magnet bias," U.S. Patent No. 6724583, 2004.
- [86] C. Shang, D. Mauri, K. San Ho, A. G. Roy, and M. Mao, "Antiferromagnetically-coupled soft bias magnetoresistive read head, and fabrication method therefore," U.S. Patent No. 8611054, 2012.
- [87] Y. Guo and R. Xiao, "Method and system for providing a read transducer having a composite magnetic shield with smooth interfaces," U.S. Patent No.

8531801, 2013.

- [88] R. Xiao, "Method and system for providing a read transducer having an improved composite magnetic shield," U.S. Patent No. 8780505, 2014.
- [89] D. Mauri, C. C. Hu, M. Mao, K. San Ho, and S. Gider, "Method and system for providing a side shielded read transducer," U.S. Patent No. 8630068, 2014.
- [90] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*, United States: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1991.
- [91] J. Chureemart, P. Chureemart, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, and K. O'Grady, "Magnetic orientation in advanced recording media," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 44(45), no. 455002, 2011.
- [92] J. Chureemart, P. Chureemart, J. Pressesky, T. Nolan, and K. O'Grady, "Media design and orientation in perpendicular media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49(7), pp. 3592–3595, 2013.
- [93] D. Weller, O. Mosendz, G. Parker, S. Pisana, and T. S. Santos, "L₁₀ FePt_{x-y} media for heat-assisted magnetic recording," *Phys. status solidi*, vol. 210(7), pp. 1245–1260, 2013.
- [94] W. H. Meiklejohn, "Exchange anisotropy - A review," *J. Appl. Phys.*, vol. 33(3), pp. 1328–1335, 1962.
- [95] P. Chureemart, *Atomistic modelling of magnetic materials*, มหาสารคาม, ประเทศไทย: ตักศิลาการพิมพ์, 2017.
- [96] P. Bruno and C. Chappert, "Ruderman-Kittel theory of oscillatory interlayer exchange coupling," *Phys. Rev. B*, vol. 46(1), p. 261, 1992.
- [97] R. C. O'Handley, *Modern magnetic materials: Principles and applications*, United States: JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.
- [98] H. A. Kramers, "L'interaction entre les atomes magnétogènes dans un cristal paramagnétique," *Physica*, vol. 1(1-6), pp. 182–192, 1934.
- [99] P. W. Anderson, "Antiferromagnetism. Theory of superexchange interaction," *Phys. Rev.*, vol. 79(2), p. 350, 1950.
- [100] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, "A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27(4), pp. 3475–3518, 1991.

- [101] G. Vallejo-Fernandez, B. Kaeswurm, L. E. Fernandez-Outon, and K. O'Grady, "Effect of the ferromagnetic layer thickness on the blocking temperature in IrMn/CoFe exchange couples," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44(11), pp. 2835–2838, 2008.
- [102] W. F. Brown, "The fundamental theorem of fine-ferromagnetic-particle theory," *J. Appl. Phys.*, vol. 39(2), pp. 993–994, 1968.
- [103] L. Néel, "Théorie du traînage magnétique de diffusion," *J. phys. radium*, vol. 13(5), pp. 249–264, 1952.
- [104] M. P. Sharrock, "Time-dependent magnetic phenomena and particle-size effects in recording media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26(1), pp. 193–197, 1990.
- [105] M. P. Sharrock, "Measurement and interpretation of magnetic time effects in recording media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35(6), pp. 4414–4422, 1999.
- [106] J. T. McKinney, "Kinetic effects in coercivity measurements," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 17(6), pp. 3020–3022, 1981.
- [107] T. Oikawa, M. Nakamura, H. Uwazumi, T. Shimatsu, H. Muraoka, and Y. Nakamura, "Microstructure and magnetic properties of CoPtCr-SiO₂ perpendicular recording media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38(5), pp. 1976–1978, 2002.
- [108] G. Farin, "Surfaces over Dirichlet tessellations," *Comput. Aided Geom. Des.*, vol. 7(1–4), pp. 281–292, 1990.
- [109] K. O'Grady and A. Bradbury, "Particle size analysis in ferrofluids," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 39(1–2), pp. 91–94, 1983.
- [110] Y. Peng, X. W. Wu, J. Pressesky, G. P. Ju, W. Scholz, and R. W. Chantrell, "Cluster size and exchange dispersion in perpendicular magnetic media," *J. Appl. Phys.*, vol. 109(12), no. 123907, 2011.
- [111] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *J. Chem. Phys.*, vol. 21(6), pp. 1087–1092, 1953.
- [112] J. García-Otero, M. Porto, J. Rivasa, and A. Bunde, "Monte Carlo simulation of hysteresis loops of single-domain particles with cubic anisotropy and their temperature dependence," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 203(1–3), pp. 268–270, 1999.

- [113] O. A. Chubykalo, J. Kauffman, B. Lengsfeld, and R. Smirnov-Rueda, "Long-time calculation of the thermal magnetization reversal using Metropolis Monte Carlo," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 242, pp. 1052–1056, 2002.
- [114] E. De Biasi, C. A. Ramos, R. D. Zysler, and D. Fiorani, "Metropolis algorithm for simulating hysteresis in ferromagnetic nanoparticles," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 372(1–2), pp. 345–349, 2006.
- [115] S. I. Ruta, "Computational modelling of interaction effects in Fe_3O_4 nanoparticle systems for comparison with experiments," M.S. thesis, The University of York, York, England, 2013.
- [116] M. El-Hilo, R. W. Chantrell, and K. O'Grady, "A model of interaction effects in granular magnetic solids," *J. Appl. Phys.*, vol. 84(9), pp. 5114–5122, 1998.
- [117] W. Brown, "Thermal fluctuation of fine ferromagnetic particles," *Magn. IEEE Trans.*, vol. 15(5), pp. 1196–1208, 1979.
- [118] A. Moser, K. Takano, D. T. Margulies, M. Albrecht, Y. Sonobe, Y. Ikeda, S. Sun, and E. E. Fullerton, "Magnetic recording: Advancing into the future," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35(19), p. R157, 2002.
- [119] I. Klik, C. R. Chang, and J. Lee, "Master equation approach to anhysteresis of noninteracting particles," *J. Appl. Phys.*, vol. 75(10), pp. 5487–5489, 1994.
- [120] H. Pfeiffer, "Determination of anisotropy field distribution in particle assemblies taking into account thermal fluctuations," *Phys. status solidi*, vol. 118(1), pp. 295–306, 1990.
- [121] S. I. Ruta, "Study of interaction effects in magnetic granular systems for recording media application," Ph.D. thesis, The University of York, York, England, 2017.
- [122] F. T. Yuan, A. C. Sun, C. F. Huang, and J. H. Hsu, "Intra-grain perpendicular percolated L_{11} CoPt thin films," *Nanotechnology*, vol. 25(16), no. 165601, 2014.
- [123] S. Jeong, Y. N. Hsu, D. E. Laughlin, and M. E. McHenry, "Magnetic properties of nanostructured CoPt and FePt thin films," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36(5), pp. 2336–2338, 2000.
- [124] T. Nautiyal and S. Auluck, "Electronic structure, fermi surface, and curie temperature calculations for the Co-Pt system," *Phys. Rev. B*, vol. 60(4), p.

2262, 1999.

- [125] C. Morrison, L. Saharan, Y. Ikeda, K. Takano, G. Hrkac, and T. Thomson, "Quantifying exchange coupling in segregated granular materials," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 46(47), no. 475002, 2013.
- [126] F. E. Luborsky, "Development of elongated particle magnets," *J. Appl. Phys.*, vol. 32(3), pp. S171–S183, 1961.
- [127] J. Lee, C. Brombacher, J. Fidler, B. Dymerska, D. Suess, and M. Albrecht, "Contribution of the easy axis orientation, anisotropy distribution and dot size on the switching field distribution of bit patterned media," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99(6), no. 062505, 2011.
- [128] M. P. Sharrock, "Time dependence of switching fields in magnetic recording media (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 76(10), pp. 6413–6418, 1994.
- [129] R. H. Victora, "Predicted time dependence of the switching field for magnetic materials," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 63(4), p. 457, 1989.
- [130] O. Kitakami, T. Shimatsu, S. Okamoto, Y. Shimada, and A. H. Yutaka, "Sharrock relation for perpendicular recording media with higher-order magnetic anisotropy terms," *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 43(1A), p. L115, 2003.
- [131] D. Paccard, C. Schlenker, O. Massenet, R. Montmory, and A. Yelon, "A new property of ferromagnetic-antiferromagnetic coupling," *Phys. status solidi*, vol. 16(1), pp. 301–311, 1966.
- [132] G. Vallejo-Fernandez, N. P. Aley, L. E. Fernandez-Outon, and K. O'Grady, "Control of the setting process in CoFe/IrMn exchange bias systems," *J. Appl. Phys.*, vol. 104(3), no. 033906, 2008.
- [133] G. Vallejo-Fernandez, T. Deakin, K. O'Grady, S. Oh, Q. Leng, and M. Pakala, "Measurement of the antiferromagnet activity in exchange bias systems," *J. Appl. Phys.*, vol. 107(9), no. 09D709, 2010.
- [134] G. Vallejo-Fernandez, L. E. Fernandez-Outon, and K. O'Grady, "Measurement of the anisotropy constant of antiferromagnets in metallic polycrystalline exchange biased systems," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91(21), no. 212503, 2007.
- [135] G. Vallejo-Fernandez, L. E. Fernandez-Outon, and K. O'Grady, "Antiferromagnetic grain volume effects in metallic polycrystalline exchange

- bias systems,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41(11), no. 112001, 2008.
- [136] C. Schlenker, “Couplage ferro-antiferromagnétique et trainage magnétique dans des couches minces multiples Co-CoO et Ni-NiO,” *Phys. status solidi*, vol. 28(2), pp. 507–517, 1968.
- [137] K. Nishioka, “Thermal decay of ferro/antiferromagnetic exchange coupling in Co/CrMnPt systems,” *J. Appl. Phys.*, vol. 86(11), pp. 6305–6309, 1999.
- [138] T. A. Ostler, “Computer simulations of ultrafast magnetic reversal,” Ph.D. thesis, The University of York, York, England, 2012.
- [139] W. Daeng-am, P. Chureemart, A. Rittidech, L. J. Atkinson, R. W. Chantrell, and J. Chureemart, “Micromagnetic model of exchange bias: Effects of structure and AF easy axis dispersion for IrMn/CoFe bilayers,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 53(4), no. 045002, 2019.
- [140] R. C. Hall, “Magnetic anisotropy and magnetostriction of ordered and disordered cobalt-iron alloys,” *J. Appl. Phys.*, vol. 31(5), pp. S157–S158, 1960.
- [141] N. P. Aley, R. Kroeger, B. Lafferty, J. Agnew, Y. Lu, and K. O’Grady, “Tuning of anisotropy in IrMn/CoFe exchange bias systems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45(10), pp. 3869–3872, 2009.
- [142] G. Vallejo-Fernandez and J. N. Chapman, “Thermal stability of exchange bias nanostructures,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107(9), no. 09D704, 2010.
- [143] K. I. Imakita, M. Tsunoda, and M. Takahashi, “Thickness dependence of exchange anisotropy of polycrystalline Mn₃Ir /Co-Fe bilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97(10), no. 10K106, 2005.
- [144] S. P. Pogossian, D. Spentato, D. T. Dekadjevi, and J. B. Youssef, “Experimental method to determine the misalignment of the easy axis of ferromagnetic and antiferromagnetic films in exchange biased bilayers,” *Phys. Rev. B*, vol. 73(17), no. 174414, 2006.
- [145] R. L. Rodríguez-Suárez, L. H. Vilela-Leão, T. Bueno, J. B. S. Mendes, P. Landeros, S. M. Rezende, and A. Azevedo, “Tunable misalignment of ferromagnetic and antiferromagnetic easy axes in exchange biased bilayers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100(24), no. 242406, 2012.

- [146] J. V. de Siqueira, O. E. da Silva, P. R. Kern, J. P. Gazola, M. Carara, and J. N. Rigue, "Obtaining the anisotropy axes misalignment and dispersion in exchange bias systems by magnetoresistance," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 478, pp. 6–11, 2019.
- [147] D. T. Dekadjevi, T. Jaouen, D. Spenato, S. P. Pogossian, and J. Ben Youssef, "Experimental evidences and driving mechanisms for anisotropic misalignments in exchange coupled systems," *Eur. Phys. J. B*, vol. 80(1), pp. 121–125, 2011.
- [148] H. S. Tarazona, M. Tafur, J. Quispe-Marcatoma, C. V. Landauero, E. Baggio-Saitovitch, and D. S. Schmool, "Thickness effect on the easy axis distribution in exchange biased Co/IrMn bilayers," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 567, pp. 11–16, 2019.
- [149] R. Street and J. C. Woolley, "A study of magnetic viscosity," *Proc. Phys. Soc. Sect. A*, vol. 62(9), p. 562, 1949.
- [150] R. W. Chantrell and J. Hannay, "Thermally activated magnetisation reversal at high frequencies," *J. Magn. Soc. Japan*, vol. 21, pp. 283–289, 1997.
- [151] E. Roduner, *Nanosopic Materials: Size Dependent Phenomena*, Cambridge, England: The Royal Society of Chemistry, 2006.
- [152] P. Chureemart, "Model of spin torque using self-consistent solutions of the magnetisation and spin accumulation," Ph.D. thesis, The University of York, York, England, 2013.
- [153] W. Thomson, "XIX. On the electro-dynamic qualities of metals: Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron," *Proc. R. Soc. London*, vol. 8, pp. 546–550, 1857.
- [154] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange," *Phys. Rev. B*, vol. 39(7), p. 4828, 1989.
- [155] S. M. Thompson, "The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 093001, 2008.
- [156] T. Y. Evgeny, and I. Žutić, *Handbook of spin transport and magnetism*, United States: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

- [157] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. Von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, D. M. Treger, "Spintronics: A spin-based electronics vision for the future," *Science* (80-.), vol. 294(5546), pp. 1488–1495, 2001.
- [158] L. Berger, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current," *Phys. Rev. B*, vol. 54(13), no. 5393, 1996.
- [159] J. C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 159, pp. L1–L7, 1996.
- [160] P. Chureemart, R. Cuadrado, I. D'Amico, and R. W. Chantrell, "Modeling spin injection across diffuse interfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 87(19), no. 195310, 2013.
- [161] W. Boonruesi, "Temperature dependence of spin transport in magnetic multilayer structure," Ph.D. thesis, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand, 2020.
- [162] X. W. Zhou, R. A. Johnson, and H. N. G. Wadley, "Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers," *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 144113, 2004.
- [163] M. Covington, M. AlHajDarwish, Y. Ding, N. J. Gokemeijer, and M. A. Seigler, "Current-induced magnetization dynamics in current perpendicular to the plane spin valves," *Phys. Rev. B*, vol. 84(16), pp. 3103–3105, 2004.
- [164] R. Sbiaa, and S. N. Piramanayagam, "Spin-transfer induced noise in nanoscale magnetoresistive sensors," *J. Appl. Phys.*, vol. 101(7), no. 073911, 2007.
- [165] P. Dauguet, P. Gandit, J. Chaussy, S. Lee, and A. Fert, "Angular dependence of the perpendicular giant magnetoresistance of multilayers," *Phys. Rev. B*, vol. 54(2), 1996.
- [166] S. Urazhdin, R. Loloee, and W. P. Pratt, "Spin transport at interfaces in magnetic multilayers," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 08G504, 2006.
- [167] T. Atireklapvarodom, and R. D. Anderson, "Wafer serialization manufacturing process for read/write heads using photolithography and selective reactive ion etching," US6806035B1, 2004.
- [168] Integral Solutions Int'l, "ISI products." [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/ISIProducts.html>. [Accessed: 26-Feb-2020].

- [169] Integral Solutions Int'l, "QST-2002." [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/QST-2002.html>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [170] Integral Solutions Int'l, "Options." [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/options.html>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [171] Integral Solutions Int'l, "Row/bar level QST tester." [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/Blazer-X5.html>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [172] Integral Solutions Int'l, "Wafer level QST tester." [Online]. Available: <http://www.us-isi.com/WLA-3000.html>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [173] O.G. Heinonen, S. W. Stokes, and J. Y. Yi, "Perpendicular spin torque in magnetic tunnel junctions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105(6), no. 066602, 2010.
- [174] K. Nagasaka, "CPP-GMR technology for magnetic read heads of future high-density recording systems," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321(6), pp. 508–511, 2009.
- [175] W. Wang, H. Sukegawa, and K. Inomata, "Temperature dependence of tunneling magnetoresistance in epitaxial magnetic tunnel junctions using a Co_2 FeAl Heusler alloy electrode," *Phys. Rev. B*, vol. 82(9), pp. 80–83, 2010.
- [176] N. Tezuka, S. Oikawa, I. Abe, M. Matsuura, S. Sugimoto, K. Nishimura, and T. Seino, "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.
- [177] T. Marukame, T. Ishikawa, T. Taira, K. I. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, "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*, vol. 81(13), pp. 1–5, 2010.
- [178] R. Carpenter, A. J. Vick, A. Hirohata, G. Vallejo-Fernandez, and K. O'Grady, "Effect of grain cutting in exchange biased nanostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 17B905, 2014.
- [179] G. Vallejo-Fernandez, N. P. Aley, J. N. Chapman, and K. O'Grady, "Measurement of the attempt frequency in antiferromagnets," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 222505, 2010.
- [180] J. Sinclair, A. Hirohata, G. Vallejo-Fernandez, M. Meinert, and K. O'Grady, "Thermal stability of exchange bias systems based on MnN," *J. Magn. Magn.*

Mater., vol. 476, pp. 278–283, 2019.

- [181] M. Meinert, B. Bükler, D. Graulich, and M. Dunz, “Large exchange bias in polycrystalline MnN/CoFe bilayers at room temperature,” *Phys. Rev. B*, vol. 92, no. 144408, 2015.
- [182] M. Dunz, B. Bükler, and M. Meinert, “Improved thermal stability in doped MnN/CoFe exchange bias systems,” *J. Appl. Phys.*, vol. 124, no. 203902, 2018.
- [183] S. Kasai, Y. K. Takahashi, P. H. Cheng, T. Ikhtiar Ohkubo, K. Kondou, Y. Otani, S. Mitani, and K. Hono, “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(3), pp. 1–5, 2016.
- [184] S. Li, Y. Sakuraba, T. Sasaki, J. Chen, S. Bosu, and K. Hono, “Enhanced current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance by improvement of atomic order of Co_2FeSi Heusler alloy film through Ag doping,” *AIP Adv.*, vol. 8(7), pp. 0–9, 2018.
- [185] D. Pan, A. Ovcharenko, M. Yang, F. Radicati, and F. E. Talke, “Effect of pitch and roll static angle on lubricant transfer between disk and slider,” *Tribology Letters*, vol. 53(1), pp. 261–270, 2014.
- [186] U. Boettcher, L. Matthes, B. Knigge, R. A. De Callafon, and F. E. Talke, “Suppression of cross-track vibrations using a self-sensing micro-actuator in hard disk drives,” *Microsystem technologies*, vol. 18(9–10), pp. 1309–1317, 2012.
- [187] DATLABS DATA RECOVERY SERVICES, “FAULTY HARD DRIVE READ WRITE HEADS.” [Online]. Available: <https://www.datlabsdatarecovery.co.uk/faulty-hard-drive-read-write-heads/>. [Accessed: 24-Mar-2020].
- [188] Seagate, “internal hard drives.” [Online]. Available: <https://www.seagate.com/as/en/internal-hard-drives/hdd/firecuda/>. [Accessed: 24-Mar-2020].

พหุ ประถมศึกษา

ประวัติผู้เขียน

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อ | วาสนา แดงอ่ำ |
| วันเกิด | 24 มีนาคม พ.ศ.2535 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพมหานคร |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | บ้านเลขที่ 5 หมู่ 1 ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู 39000 |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ หนองบัวลำภู อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ หนองบัวลำภู อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) ฟิสิกส์ (เกียรตินิยมอันดับสอง) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2563 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม |
| ทุนวิจัย | 1. PhD studentship supported by Seagate Technology (Thailand) Ltd. 2. Supported funding from The Industry-Academia Partnership Programme (IAPP) for exchange student programme MSU-UoY (York, UK) 3. Student travel grant from The IEEE Magnetic Society for attending MMM Conference 2017 (Pittsburgh, USA) 4. Student travel grant from Faculty of Science, Mahasarakham University for attending INTERMAG Conference 2018 (Singapore) |

ผลงานวิจัย

5. Student travel grant from The IEEE Magnetic Society for attending Magnetic Summer School 2018 (Quito, Ecuador)

1. Daeng-am, W., Chureemart, P., Rittidech, A., Atkinson, L. J., Chantrell, R. W., and Chureemart, J. (2019). Micromagnetic model of exchange bias: effects of structure and AF easy axis dispersion for IrMn/CoFe bilayers. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 53 (2020) 045002.
2. Daeng-am, W., Chureemart, P., Chantrell, R. W., and Chureemart, J. (2019). Granular micromagnetic model for perpendicular recording media: Quasi-static properties and media characterisation. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52 (2019) 425002.
3. Daeng-am, W., Chureemart, P., and Chureemart, J., (2018). Effect of easy axis distribution on exchange bias phenomenon in read element via the granular model. *SWU. Sci. J.*, Vol. 34(2), 79-98.
4. Saengmart, O., Daeng-am, W., Chureemart, P., and Chureemart, J., (2017). The effect of media design in advanced recording media by the atomistic spin dynamics simulation. *SWU. Sci. J.*, Vol. 33(2), 86-106.

