



การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริง  
ระดับจุลภาค

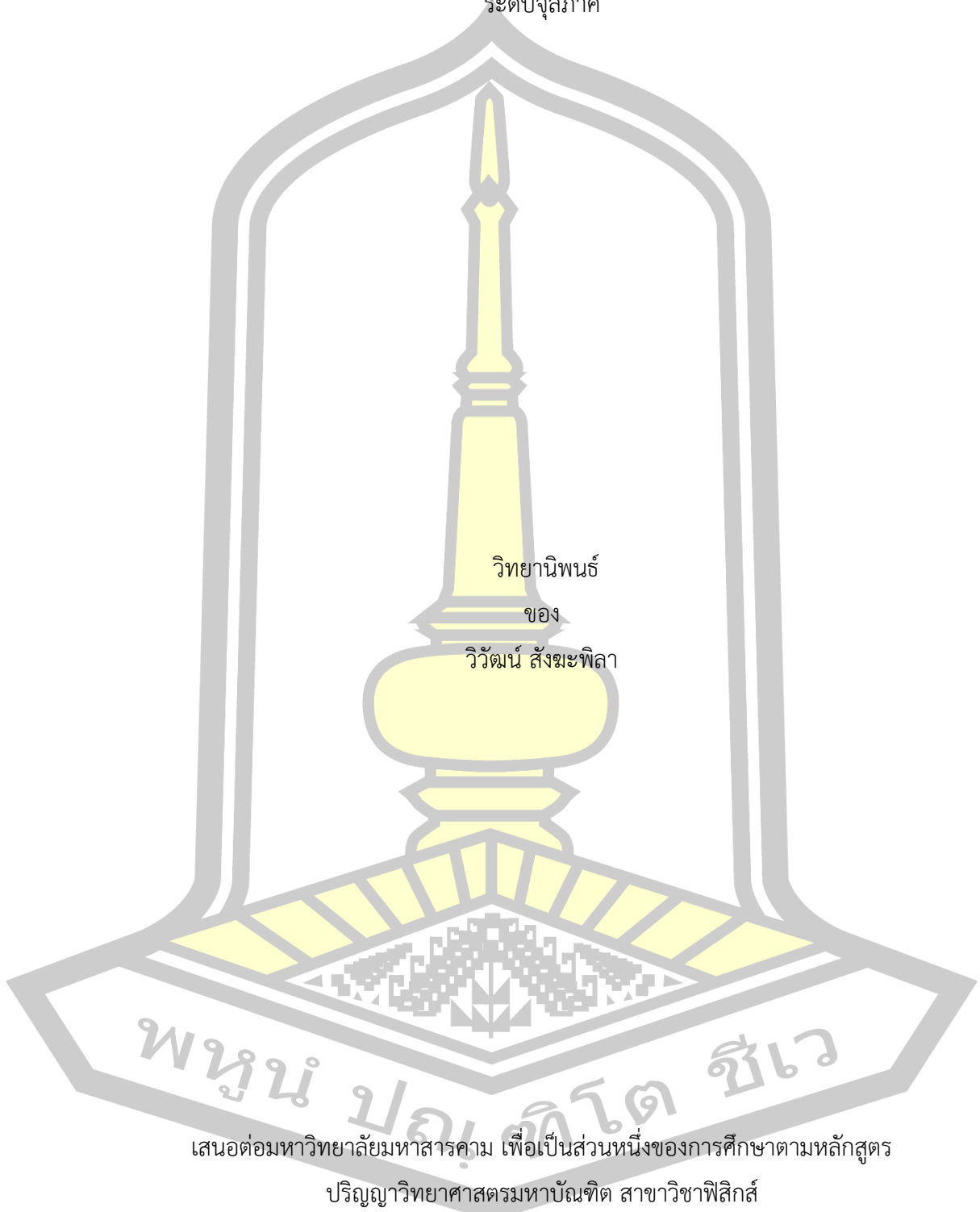
วิทยานิพนธ์  
ของ  
วิวัฒน์ สังฆะพิลา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริง

ระดับจุลภาค



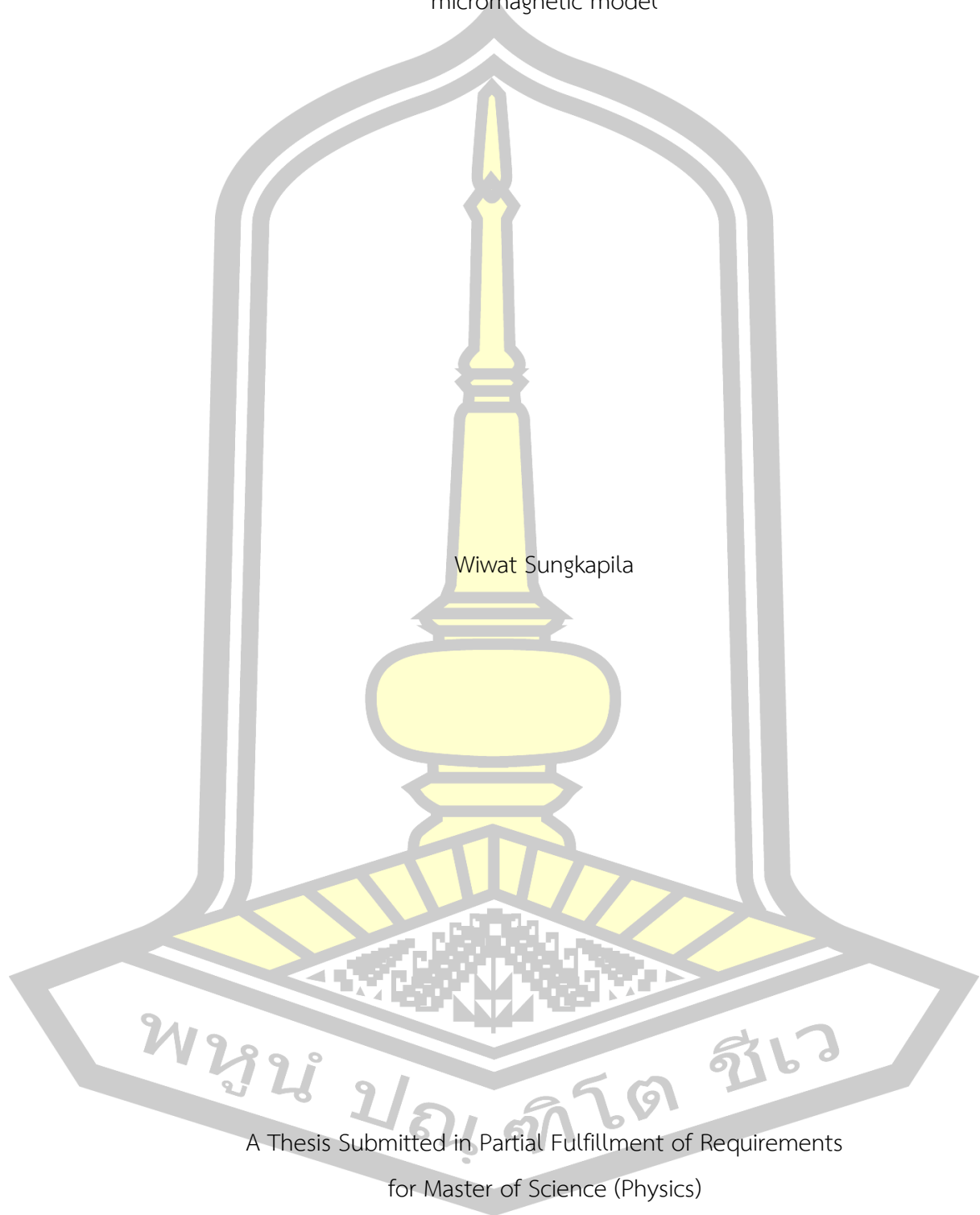
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

The study of exchange bias phenomenon in read head via the realistic  
micromagnetic model



Wiwat Sungkapila

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Science (Physics)

June 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวิวัฒน์ สังฆะพิลา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อาคม แก้วระวัง )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เจษฎา จูรีมาศ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. พรรณวดี จูรีมาศ )

กรรมการ

(รศ. ดร. อรวรรณ ฤทธิเดช )

กรรมการ

(ผศ. ดร. ประธาน ศรีวีไล )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล )

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พูน ปณฺฑิต ชีวะ

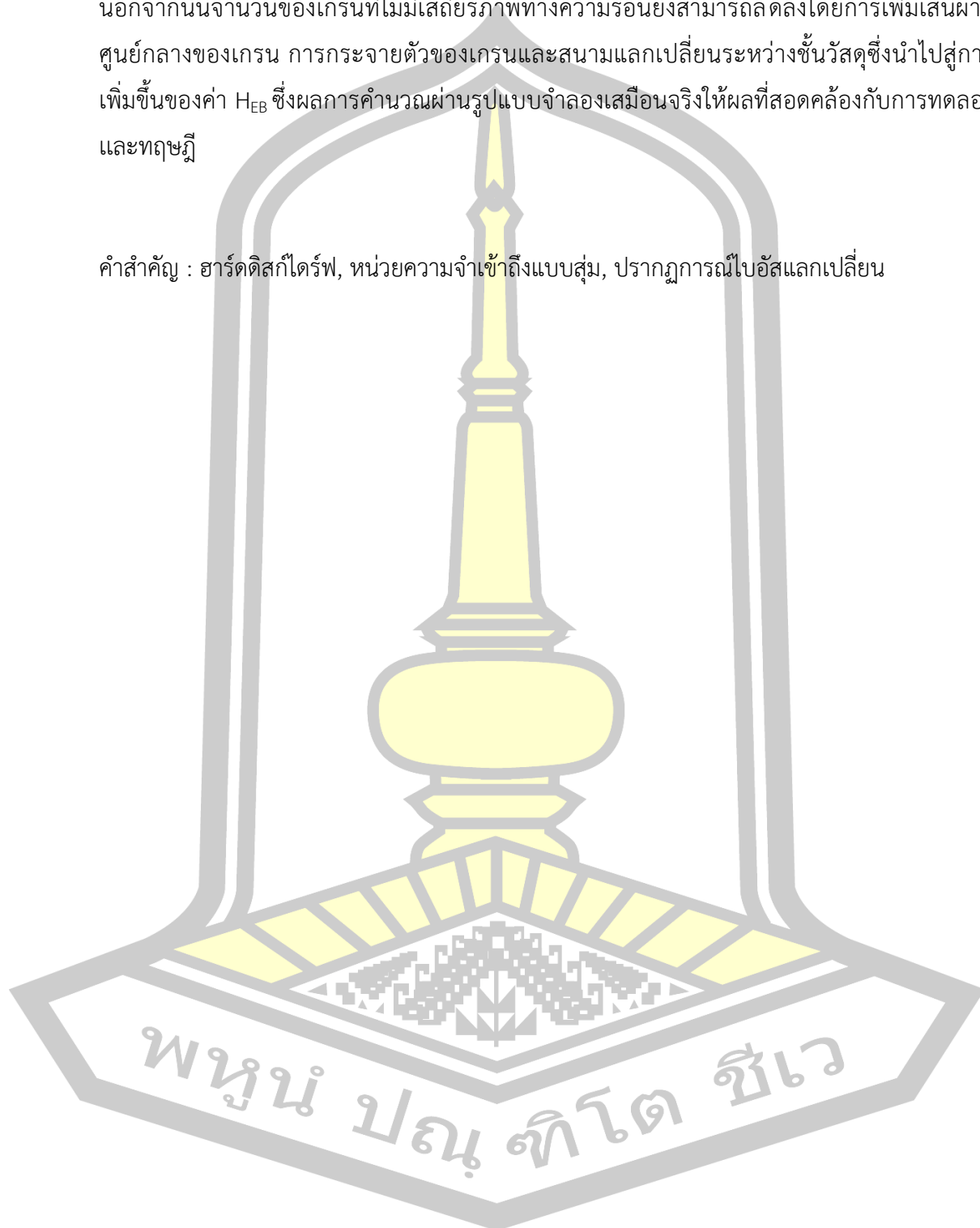
ชื่อเรื่อง	การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาค		
ผู้วิจัย	วิวัฒน์ สังฆะพิลา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา จุริมาศ รองศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี จุริมาศ		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

### บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นเมื่อวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic; FM) เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic; AF) หลังจากกระบวนการฟิลด์คูลิง (field cooling) ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนถูกประยุกต์ใช้ในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเพื่อยืดทิศทางของแมกนิไทเซชันใน FM ในปัจจุบันขนาดของบิตข้อมูลลดลงไปถึง 30 นาโนเมตรซึ่งทำให้องค์ประกอบหลักในส่วนของหัวอ่านข้อมูลมีขนาดที่ลดลงตามไปด้วย ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างระดับจุลภาคมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากดังนั้นแบบจำลองแม่เหล็กทางทฤษฎีจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของโครงสร้างมีขนาดลดลงน้อยกว่า 50 นาโนเมตรพบว่าปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนไม่สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องเนื่องจากแบบจำลองทางแม่เหล็กมาตรฐานระดับจุลภาคไม่ได้ทำการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบของโครงสร้างและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคที่ถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่มีความเสมือนจริง ยิ่งไปกว่านั้นแบบจำลองดังกล่าวยังได้รวมเอากระบวนการเซตเกรนแม่เหล็กก่อนทำการวัดค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ( $H_{EB}$ ) แบบจำลองที่ได้นำเสนอถูกใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า  $H_{EB}$  ได้แก่ ขนาดของโครงสร้าง ความหนาของชั้น AF ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน การกระจายตัวขนาดของเกรน และสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ จากผลการศึกษาพบว่าค่า  $H_{EB}$  มีค่าลดลงด้วยการลดลงของขนาดของโครงสร้างเนื่องจากปริมาตรของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่เกรนภายในระบบมีจำนวนลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $H_{EB}$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้น AF และมีค่าสูงสุดที่ความหนาเท่ากับ 8 นาโนเมตรเนื่องจากเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อชั้น AF มีความหนาที่มากขึ้นกลับพบว่า  $H_{EB}$  มีค่าลดลง

เนื่องจากเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนสูงเกินไปจนไม่สามารถเซตทิศทางของแมกนีไทเซชันได้นอกจากนั้นจำนวนของเกรนที่ไม่มีเสถียรภาพทางความร้อนยังสามารถลดลงโดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน การกระจายตัวของเกรนและสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า  $H_{EB}$  ซึ่งผลการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองเสมือนจริงให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองและทฤษฎี

คำสำคัญ : ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่ม, ปราบกฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน



**TITLE** The study of exchange bias phenomenon in read head via the realistic micromagnetic model

**AUTHOR** Wiwat Sungkapila

**ADVISORS** Assistant Professor Jessada Chureemart , Ph.D.  
Associate Professor Phanwadee Jurimas , Ph.D.

**DEGREE** Master of Science **MAJOR** Physics

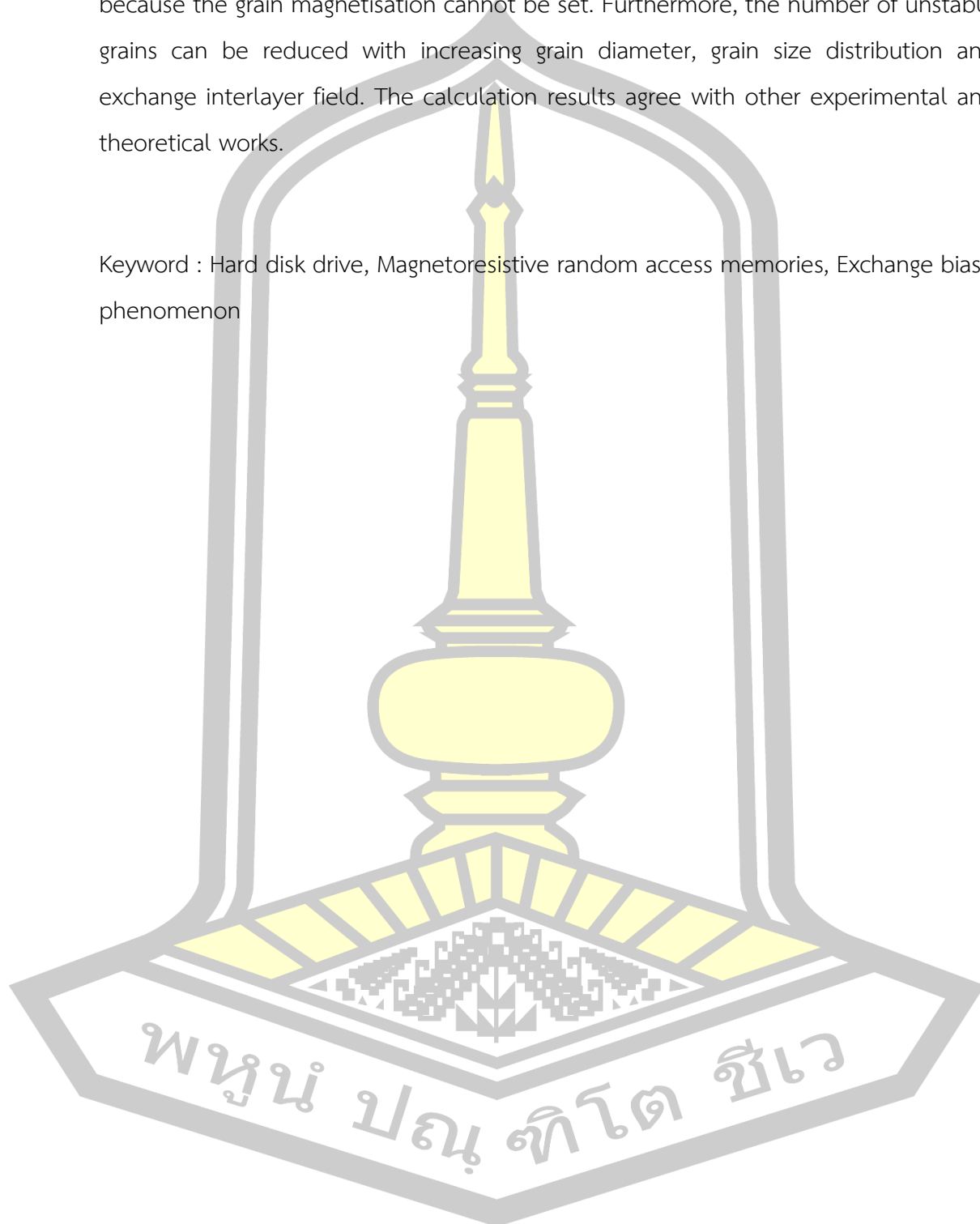
**UNIVERSITY** Mahasarakham **YEAR** 2019  
University

### ABSTRACT

Exchange bias occurs when a ferromagnetic (FM) layer is grown in direct contact with an antiferromagnetic (AF) layer after field cooling process. The exchange bias layer is usually used as read sensor in hard disk drives (HDDs) or in magnetoresistive random-access memories (MRAMs) to pin the direction of magnetisation in the FM layer. Due to the shrink of bit size in current media down to 30 nm, the dimension of the read element is also reduced. The experimental investigation on the exchange bias becomes more complicated at these dimensions, therefore, a theoretical magnetic model are an important role in the study of the exchange bias system. However, the behaviour of exchange bias in sub-50 nm structures is not well understood because standard micromagnetic model do not consider the effect of grain cutting at edge of the structure and exchange interaction between FM and AF layers. In this work we propose a realistic micromagnetic model which has been modified to take into account the grain cutting at the edges and exchange interaction. Moreover, this model allows to include the process of grain setting before starting the measurement of exchange bias field ( $H_{EB}$ ). The proposed model is used to study the effect of the in-plane system size, AF thickness, grain diameter, grain size distribution and exchange interlayer field on  $H_{EB}$ .  $H_{EB}$  is found to decrease with decreasing system size because the volume of cutting grain at edge has increase and the number of grains in system is reduced according to the other experiment and theoretical works.  $H_{EB}$  increases sharply with increasing AF thickness and reaches the maximum at AF thickness of 8 nm because

the thermal stability of grain increases. For the thicker AF layer,  $H_{EB}$  decreases slightly because the grain magnetisation cannot be set. Furthermore, the number of unstable grains can be reduced with increasing grain diameter, grain size distribution and exchange interlayer field. The calculation results agree with other experimental and theoretical works.

Keyword : Hard disk drive, Magnetoresistive random access memories, Exchange bias phenomenon





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจษฎา จุริมาศ อาจารย์ที่ปรึกษาและรองศาสตราจารย์ พรรณวดี จุริมาศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้อาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านยังได้สอนเสมอให้ข้าพเจ้าเป็นผู้ที่มีความกตัญญูต่อผู้มีพระคุณ อ่อนน้อมถ่อมตน เป็นผู้ที่มีความรับผิดชอบซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการเรียนระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนการอยู่ร่วมกับผู้อื่นและการทำงานเป็นทีม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านอย่างสูงยิ่งที่คอยดูแลเอาใจใส่และมอบโอกาสอันมีค่ายิ่งให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อาคม แก้วระวัง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและตรวจสอบข้อบกพร่องพร้อมทั้งให้คำชี้แนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อรวรรณ ฤทธิเดช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและตรวจสอบข้อบกพร่องพร้อมทั้งให้คำชี้แนะ นอกจากนี้ยังเป็นผู้ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้ากำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี ตลอดจนให้คำปรึกษาในด้านการเรียนต่อระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประธาน ศรีวิไล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและตรวจสอบข้อบกพร่องพร้อมทั้งให้คำชี้แนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังคอยดูแลข้าพเจ้าเมื่อครั้งข้าพเจ้าเป็นนิสิตภายในที่ปรึกษาอย่างดีเสมอมา ท่านอาจารย์ประธานเป็นผู้ที่ให้ความรู้และช่วยเหลือข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือ ตลอดจนคำแนะนำและความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าอย่างดีเสมอมา

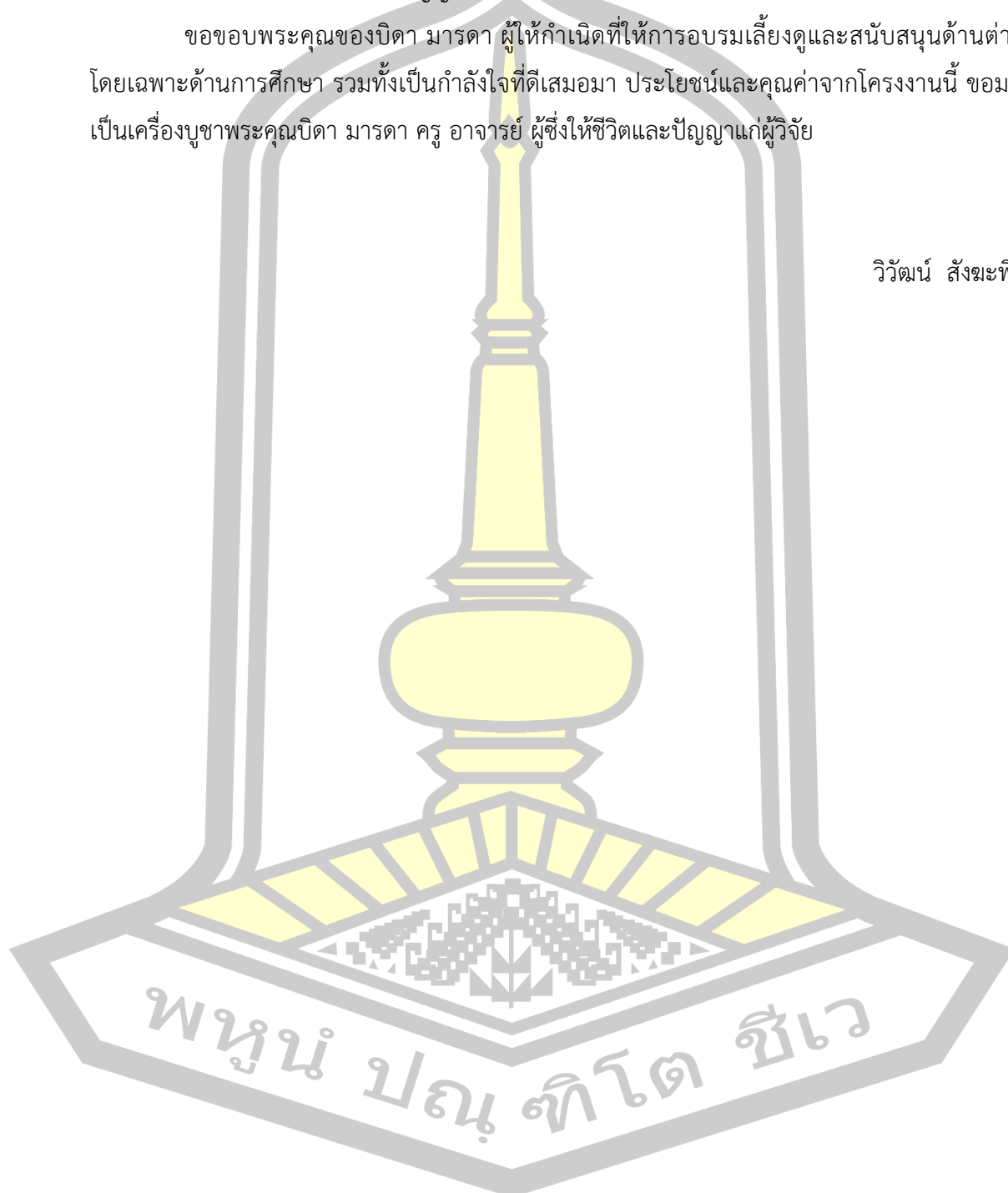
ขอขอบพระคุณพี่ๆ และน้องๆ หน่วยวิจัยการคำนวณและการทดลองด้านแม่เหล็ก รวมทั้งเพื่อนๆ หน่วยวิจัยพลาสมา ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณช่วงเวลา 2 ปีที่ได้อยู่ร่วมกันในบ้านหลังนี้ที่มีทั้งพี่ น้องและเพื่อนที่คอยช่วยเหลือกันอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยที่ให้ความช่วยเหลือในด้านของทุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการดำรงชีวิตประจำวันรวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการเข้าร่วมกิจกรรมอบรมและสัมมนาในงานวิชาการต่างๆ

ขอขอบพระคุณกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ช่วยเหลือในด้านของทุนวิจัยโดยโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) ประจำปีงบประมาณ 2562

ขอขอบพระคุณของบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนด้านต่างๆ โดยเฉพาะด้านการศึกษา รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ประโยชน์และคุณค่าจากโครงการนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ ผู้ซึ่งให้ชีวิตและปัญญาแก่ผู้วิจัย

วิวัฒน์ สังฆะพิลา

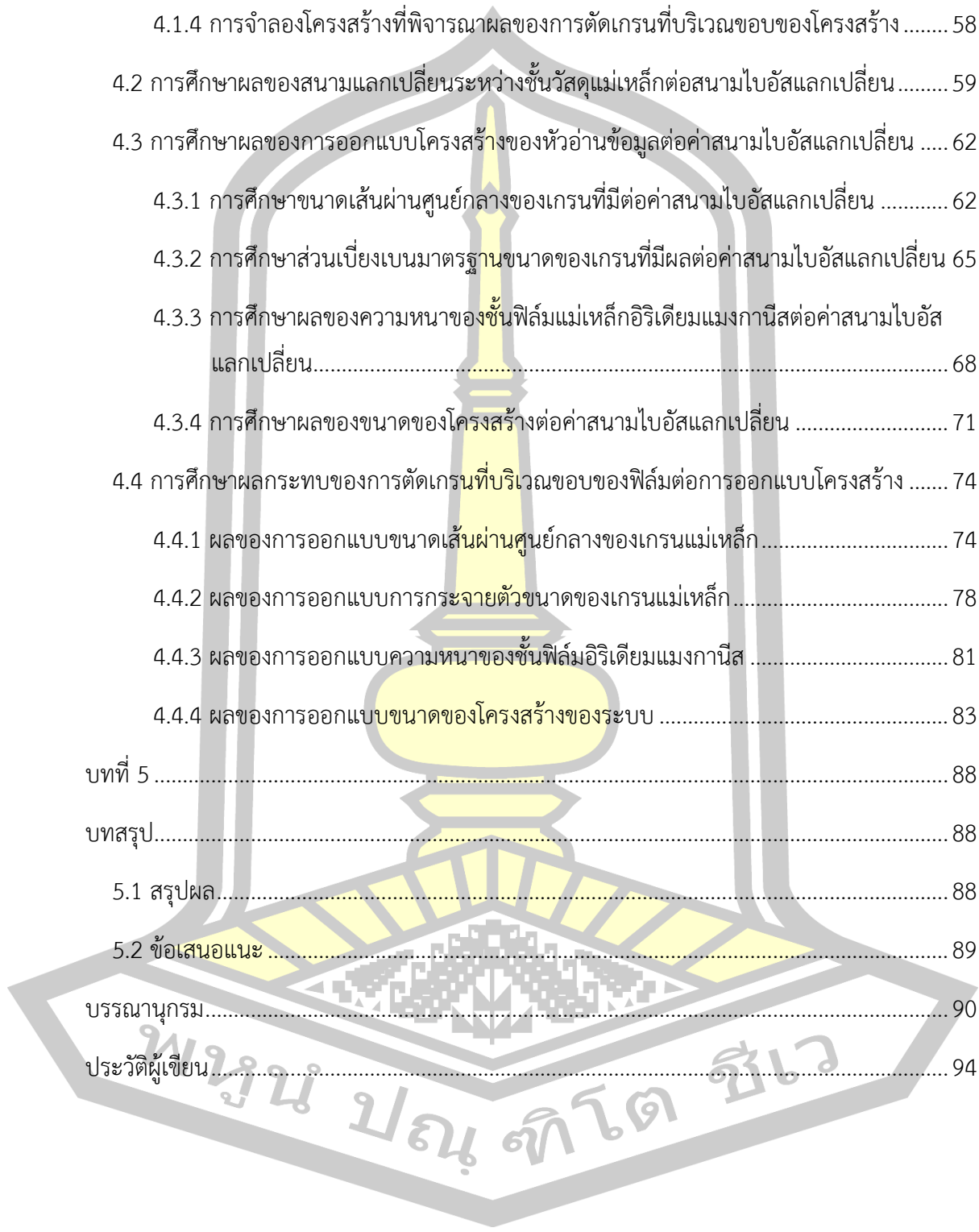


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	6
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.4 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 .....	8
ทฤษฎีและปริทัศน์เอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ปริมาณทางแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1.1 เส้นแรงแม่เหล็กและความแรงสนามแม่เหล็ก.....	8
2.1.2 สนามแม่เหล็กหรือความแรงสนามแม่เหล็ก.....	9
2.1.3 โมเมนต์แม่เหล็ก.....	10
2.1.4 สนามแม่เหล็กภายในวัสดุและสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก.....	12
2.2 ประเภทของวัสดุแม่เหล็ก.....	14
2.1.1 วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก.....	14

2.1.2	วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก.....	16
2.1.3	วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก.....	18
2.1.4	วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	20
2.3	ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก.....	22
2.3.1	ปริมาณแอนไอโซโทรปี.....	22
2.3.1.1	แอนไอโซโทรปีผลึก.....	22
2.3.1.2	แอนไอโซโทรปีรูปร่าง.....	25
2.3.2	พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน.....	28
2.3.3	พลังงานความร้อน.....	30
2.3.4	พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก.....	33
2.4	ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน.....	35
2.4.1	ทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน.....	35
2.4.2	กระบวนการ setting process.....	38
บทที่ 3	.....	41
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	.....	41
3.1	การศึกษาพลวัตของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์.....	41
3.2	การศึกษาพลวัตของวัสดุแม่เหล็กด้วยสมการ LLG.....	43
3.3	วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	47
3.4	ขั้นตอนการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยสมการ LLG.....	49
บทที่ 4	.....	52
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	.....	52
4.1	การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงสำหรับศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน.....	52
4.1.1	การจำลองโครงสร้างของเกรนในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน.....	53
4.1.2	การจำลองโครงสร้างในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน.....	55

4.1.3 การจำลองโครงสร้างในกรณีที่มีการกระจายตัวขนาดของเกรนแตกต่างกัน .....	56
4.1.4 การจำลองโครงสร้างที่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง .....	58
4.2 การศึกษาผลของสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กต่อสนามไบอัสแลกเปลี่ยน .....	59
4.3 การศึกษาผลของการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน .....	62
4.3.1 การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่มีต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน .....	62
4.3.2 การศึกษาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนที่มีผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน .....	65
4.3.3 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีสต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน.....	68
4.3.4 การศึกษาผลของขนาดของโครงสร้างต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน .....	71
4.4 การศึกษาผลกระทบของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของฟิล์มต่อการออกแบบโครงสร้าง .....	74
4.4.1 ผลของการออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก.....	74
4.4.2 ผลของการออกแบบการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก.....	78
4.4.3 ผลของการออกแบบความหนาของชั้นฟิล์มอริเดียมแมงกานีส .....	81
4.4.4 ผลของการออกแบบขนาดของโครงสร้างของระบบ .....	83
บทที่ 5 .....	88
บทสรุป.....	88
5.1 สรุปผล.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	89
บรรณานุกรม.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	94



## สารบัญตาราง

หน้า

- ตาราง 2.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของอะตอมในระดับชั้นพลังงานต่างๆ [8]..... 19
- ตาราง 2.2 ลักษณะการจัดเรียงของอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน  $3d$  และ  $4s$  ของธาตุโลหะทรานซิชัน [8] ..... 19



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1.1	แผนภาพแสดงโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอย่างง่าย..... 1
ภาพประกอบ 1.2	แผนภาพแสดงการเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกและมีการจ่ายกระแสซึ่งมีทิศทางของสปินแบบสุมผ่านโครงสร้างของหัวอ่าน (ก) แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางเดียวกัน (ข) แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางแตกต่างกัน ..... 3
ภาพประกอบ 1.3	แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระดับมหภาค [4]..... 4
ภาพประกอบ 1.4	ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีการเลื่อนตามแนวแกนของสนามแม่เหล็กภายนอกเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [1]..... 5
ภาพประกอบ 2.1	แผนภาพแสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่ A (ก) กรณีที่สนามแม่เหล็กขนานกับเวกเตอร์ปกติ (ข) กรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับเวกเตอร์ปกติ (ค) กรณีที่สนามแม่เหล็กทำมุม $\theta$ กับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ A หรือเวกเตอร์ปกติ ..... 9
ภาพประกอบ 2.2	แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก (ข) การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุในอะตอม [7]..... 11
ภาพประกอบ 2.3	แผนภาพแสดงการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (ก) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ (ข) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายในวัสดุ [7]..... 13
ภาพประกอบ 2.4	แผนภาพแสดงเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (ก) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุไดอะแมกเนติก (1) และวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก (2) (ข) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก [8] ..... 14
ภาพประกอบ 2.5	แผนภาพแสดงแบบจำลองลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก ก) กรณีที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก ข) กรณีที่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก [7]..... 15
ภาพประกอบ 2.6	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก [7] ..... 15

ภาพประกอบ 2.7	แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก [7].....	16
ภาพประกอบ 2.8	แผนภาพแสดงการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) ในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก (ข) ในสถานะที่วัสดุถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอก [7].....	17
ภาพประกอบ 2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกที่อุณหภูมิใดๆ [7].....	17
ภาพประกอบ 2.10	แผนภาพแสดงจากจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก [7].....	18
ภาพประกอบ 2.11	แผนภาพแสดงการซ้อนทับของแถบพลังงานของธาตุโลหะทรานซิชัน [8].....	20
ภาพประกอบ 2.12	แผนภาพแสดงการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [7].....	21
ภาพประกอบ 2.13	แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากผลของอุณหภูมิ [8].....	21
ภาพประกอบ 2.14	การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศทางที่แตกต่างกัน (ก) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของเหล็ก (Fe) (ข) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของนิกเกิล (Ni) [8].....	23
ภาพประกอบ 2.15	เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของโคบอลต์ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางที่แตกต่างกัน [8].....	25
ภาพประกอบ 2.16	แผนภาพแสดงปริมาณพลังงาน magnetostatic energy ของวัสดุแม่เหล็กในขณะที่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกเป็นศูนย์ [8].....	26
ภาพประกอบ 2.17	แผนภาพแสดงโครงสร้างของวัสดุแบบทรงคล้ายทรงกลมแบบข้าง [8].....	27
ภาพประกอบ 2.18	แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างอิเล็กตรอนของโมเลกุลไฮโดรเจน [8].....	29



ภาพประกอบ 2.19	กราฟ Bethe-Slater curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง exchange integral กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างอะตอมกับรัศมีวงโคจรของระดับชั้นพลังงาน 3d [8].....	30
ภาพประกอบ 2.20	ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวในกรณีที่ไม่พิจารณาผลของความร้อน (ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน x y และ z ที่ช่วงเวลาใดๆ (ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน x และ y เมื่อมองจากด้านบนหรือแนวแกน z [15] .....	32
ภาพประกอบ 2.21	ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวในกรณีพิจารณาผลของความร้อน (ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน x y และ z ที่ช่วงเวลาใดๆ (ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน x และ y เมื่อมองจากด้านบนหรือแนวแกน z [15] .....	33
ภาพประกอบ 2.22	ลักษณะวงปิดฮีสเทอรีซิสของชั้นวัสดุ Co เชื่อมต่อกับชั้นวัสดุ CoO ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน [1] .....	36
ภาพประกอบ 2.23	แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลูปวงปิดในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในช่วงต่างๆ [4] .....	37
ภาพประกอบ 2.24	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแลกเปลี่ยนที่ขึ้นกับเวลา $\ln(t_{set})$ [16]...	39
ภาพประกอบ 3.1	(ก) การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (ข) การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหวนเข้าสู่สนามประสิทธิผล [15]...	44
ภาพประกอบ 3.2	วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์ (Euler's method) สามารถให้ค่าประมาณที่มีค่าสูง (ซ้าย) หรือต่ำกว่าค่าจริง (ขวา) [15].....	47
ภาพประกอบ 3.3	วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Heun scheme จะทำการพิจารณาค่าประมาณของตำแหน่งถัดไปด้วยค่าอนุพันธ์ของจุดเริ่มต้นด้วยวิธีออยเลอร์(ซ้าย) จากนั้นจะหาค่าอนุพันธ์เฉลี่ยของจุดเริ่มต้นและจุดถัดไปที่ประมาณค่าด้วยวิธีออยเลอร์เพื่อหาค่าตำแหน่งสุดท้ายที่มีความถูกต้องมากขึ้น (ขวา) [15] .....	49
ภาพประกอบ 3.4	แผนภาพแสดงการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยสมการ LLG ที่มีการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลข Huen scheme .....	50

- ภาพประกอบ 4.1** ผลการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน (ก) โครงสร้างขนาด  $25 \times 25 \text{ nm}^2$  (ข) โครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  (ค) โครงสร้างขนาด  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  (ง) โครงสร้างขนาด  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  ..... 54
- ภาพประกอบ 4.2** ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นาโนเมตร (ข) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นาโนเมตร (ค) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นาโนเมตร (ง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ในโครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  ..... 56
- ภาพประกอบ 4.3** ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีผลของการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) การกระจายตัวของเกรน 0 (ข) การกระจายตัวของเกรน 0.1 (ค) การกระจายตัวของเกรน 0.2 (ง) การกระจายตัวของเกรน 0.3 (จ) การกระจายตัวของเกรน 0.4 (ฉ) การกระจายตัวของเกรน 0.5 โครงสร้างที่ทำการศึกษามีขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ..... 57
- ภาพประกอบ 4.4** ผลการจำลองโครงสร้างของเกรนวัสดุแม่เหล็ก (ก) กรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง (ข) กรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ในโครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  . 59
- ภาพประกอบ 4.5** ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ..... 60
- ภาพประกอบ 4.6** ขนาดของค่าสนามไป้อสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากวงปิดฮีสเทอรีซิสในกรณีที่มีขนาดของสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีค่าแตกต่างกัน ..... 62
- ภาพประกอบ 4.7** ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ..... 63
- ภาพประกอบ 4.8** ขนาดของค่าสนามไป้อสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากวงปิดฮีสเทอรีซิสในกรณีที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร [15] ..... 64

ภาพประกอบ 4.9	ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวของเกรน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง.....	66
ภาพประกอบ 4.10	ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่การกระจายตัวของเกรนมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ...	67
ภาพประกอบ 4.11	การจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยใน 3 มิติ .....	68
ภาพประกอบ 4.12	ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง .....	69
ภาพประกอบ 4.13	ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมกกาเนสที่ความหนาแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง.....	70
ภาพประกอบ 4.14	ผลการศึกษาขนาดของโครงสร้างที่มีต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งแสดงลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง.....	72
ภาพประกอบ 4.15	ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้าง 25x25 50x50 100x100 200x200 500x500 และ 750x750 nm <sup>2</sup> ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง [5].....	73
ภาพประกอบ 4.16	การจำลองโครงสร้างเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอย (ก) ขนาดของเกรน 8 นาโนเมตรและไม่มีผลของการตัดขอบเกรน (ข) ขนาดของเกรน 8 นาโนเมตรและมีผลของการตัดขอบเกรน (ค) ขนาดของเกรน 10 นาโนเมตรและไม่มีผลของการตัดขอบเกรน (ง) ขนาดของเกรน 10 นาโนเมตรและมีผลของการตัดขอบเกรน .....	75
ภาพประกอบ 4.17	ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบ.....	76
ภาพประกอบ 4.18	การเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่มีการพิจารณาและไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน.....	77

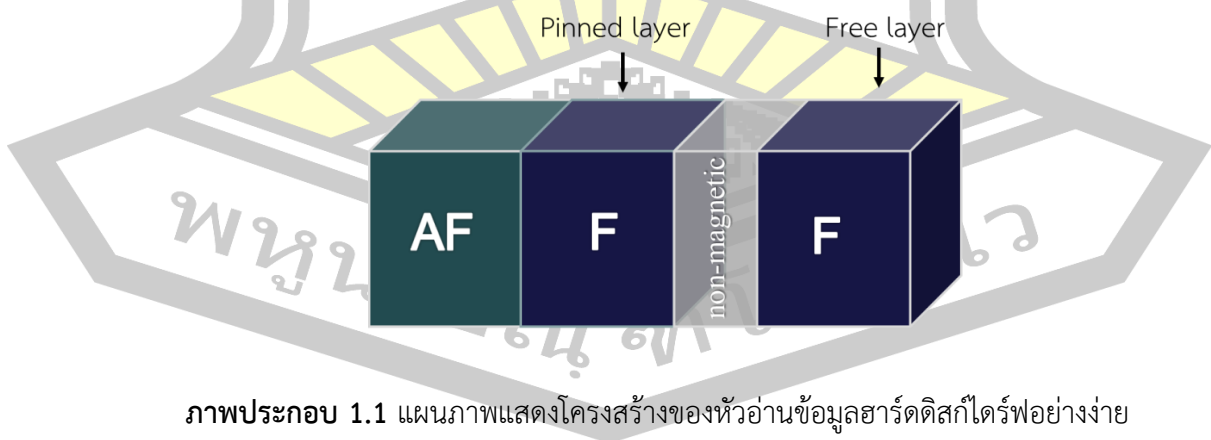
<b>ภาพประกอบ 4.19</b>	แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอย (ก) การกระจายตัวของเกรนเป็นศูนย์และไม่มีการตัดขอบเกรน (ข) การกระจายตัวของเกรนเป็นศูนย์และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ค) การกระจายตัวของเกรน 0.2 และไม่มีการตัดขอบเกรน (ง) การกระจายตัวของเกรน 0.2 และพิจารณาผลของการตัดเกรน.....	78
<b>ภาพประกอบ 4.20</b>	ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ขนาดการกระจายตัวของเกรนแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ชอบ.....	79
<b>ภาพประกอบ 4.21</b>	เปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่มีการกระจายตัวของเกรนแตกต่างกัน.....	80
<b>ภาพประกอบ 4.22</b>	ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ความหนาของชั้นอิริเดียมแมงกานีสแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ชอบ.....	81
<b>ภาพประกอบ 4.23</b>	เปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่มีความหนาแตกต่างกัน [5].....	82
<b>ภาพประกอบ 4.24</b>	ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรมไวโรนอย (ก) โครงสร้าง 50x50 nm <sup>2</sup> และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ข) โครงสร้าง 50x50 nm <sup>2</sup> และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ค) โครงสร้าง 75x75 nm <sup>2</sup> และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ง) โครงสร้าง 75x75 nm <sup>2</sup> และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน.....	84
<b>ภาพประกอบ 4.25</b>	ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ชอบของโครงสร้าง.....	85
<b>ภาพประกอบ 4.26</b>	เปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่มีขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน [5].....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

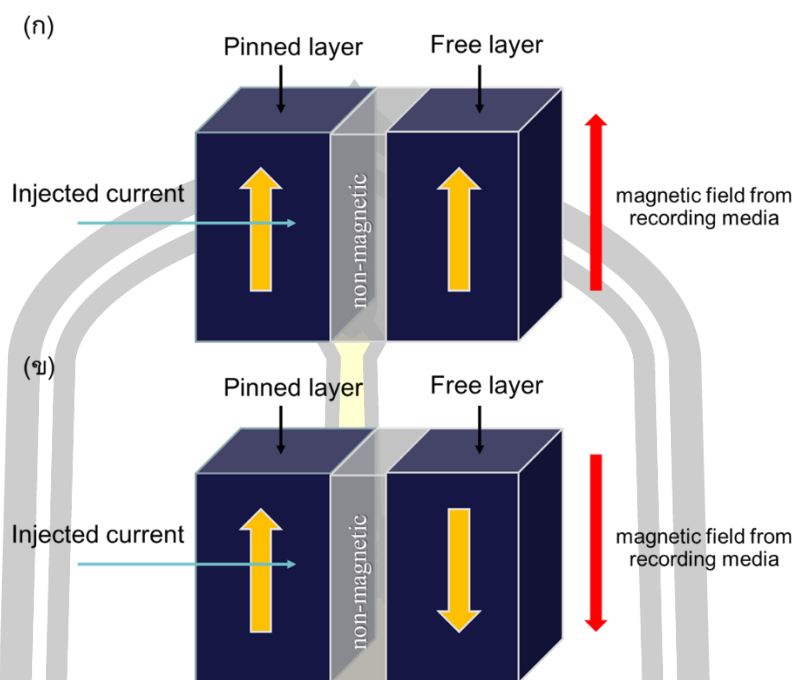
ในปัจจุบันเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อวิถีชีวิต เศรษฐกิจ และสังคมของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางซึ่งถูกนำมาใช้ร่วมกับกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มีความต้องการให้อุปกรณ์มีค่าความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สูงขึ้นและขนาดของอุปกรณ์ที่ลดลง นำไปสู่การพัฒนาและการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยพบว่าการเพิ่มค่าความจุและการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องพัฒนาองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกันคือ แผ่นบันทึกข้อมูล (recording media) หัวเขียน (write head) และหัวอ่าน (read head) จากการลดขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าว ส่งผลให้พฤติกรรมและคุณสมบัติของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของหัวอ่านข้อมูลซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความคาดเคลื่อนในการอ่านข้อมูล เนื่องจากผลของความไม่เสถียรทางความร้อนในอุปกรณ์นำไปสู่การหมุนกลับทิศทางการแมกนีไทเซชันของชั้นอ้างอิงในหัวอ่านข้อมูล โดยลักษณะโครงสร้างอย่างง่ายของหัวอ่านข้อมูลสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 1.1



ภาพประกอบ 1.1 แผนภาพแสดงโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อย่างง่าย

หัวอ่านข้อมูลเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมก

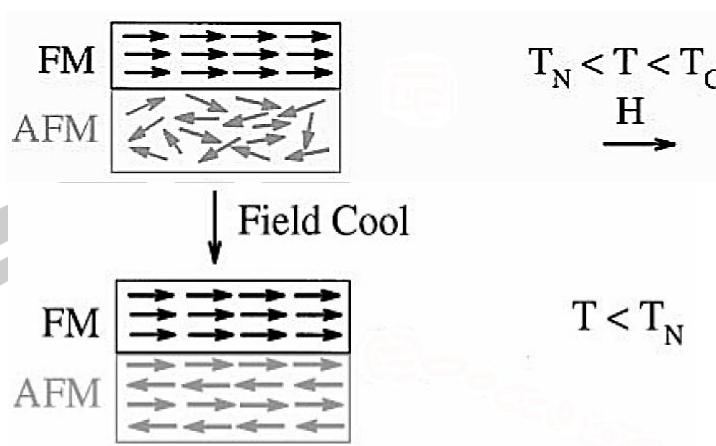
เนติกสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กและเชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรกเรียกว่า ชั้นที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงหรือชั้นพิน (pinned layer) เนื่องจาก แมกนีไทเซชันในชั้นดังกล่าวถูกยึดทิศทางโดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [1] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic materials) โดยชั้นดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวอ้างอิงในการตรวจวัดสัญญาณจากแผ่นบันทึกข้อมูล นอกจากนี้ โครงสร้างของหัวอ่านยังประกอบไปด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกอีกชั้นวางเชื่อมต่อกับชั้นพินที่เรียกว่า ชั้นอิสระ (free layer) โดยชั้นอิสระและชั้นพินถูกคั่นด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเพื่อไม่ให้เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวถูกเรียกว่า สปินวาล์ว (spin valve) ในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล หัวอ่านข้อมูลจะมีการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นบันทึกข้อมูลโดยแมกนีไทเซชันในแต่ละบิตข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูลจะเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ (free layer) เปลี่ยนแปลงตามทิศทางของแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูล สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูลจะดำเนินการโดยทำการอ่านข้อมูล พบว่า จะต้องทำการป้อนกระแสไฟฟ้าทะลุผ่านโครงสร้างของสปินวาล์วจะมีผลทำให้เกิดค่าความต้านทานที่เรียกว่า ความต้านทานเชิงแม่เหล็ก (giant magnetoresistance; GMR) หรือ (tunneling magnetoresistance; TMR) [2], [3] ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระ โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็นสองกรณี คือ กรณีที่แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระมีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (parallel orientation) ทำให้ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กมีค่าต่ำซึ่งใช้แทนบิตข้อมูล 0 และในกรณีที่แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระมีทิศตรงข้ามกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (anti-parallel orientation) ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กมีค่าสูงซึ่งใช้แทนบิตข้อมูล 1 ในการอ่านข้อมูลของหัวอ่าน ดังแสดงในภาพประกอบ 1.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



**ภาพประกอบ 1.2** แผนภาพแสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กของชั้นอิสระด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกและมีการจ่ายกระแสซึ่งมีทิศทางของสปินแบบสลับผ่านโครงสร้างของหัวอ่าน (ก) แม่เหล็กในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางเดียวกัน (ข) แม่เหล็กในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางแตกต่างกัน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ชั้นพินมีความสำคัญอย่างมากในการอ่านข้อมูลของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจาก ชั้นพินจะทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทิศทางของแม่เหล็กในชั้นอิสระ สำหรับการรักษาทิศทางของแม่เหล็กในชั้นพินสามารถทำได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติก สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนสามารถอธิบายได้โดยภาพประกอบ 1.3

พูนุ ปณฺ ทิโต ชิว

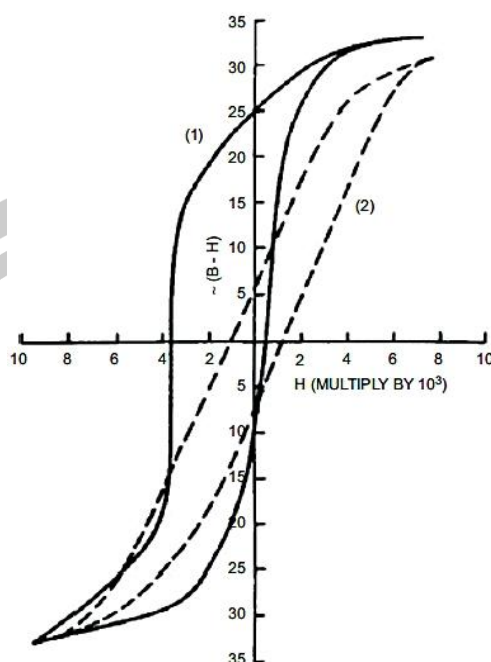


ภาพประกอบ 1.3 แผนภาพแสดงการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระดับมหภาค [4]

จากภาพประกอบ 1.3 เมื่อนำเอาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกัน โดยให้อุณหภูมิแก่ระบบสูงกว่า  $T_N$  แต่น้อยกว่า  $T_C$  กล่าวคือ  $T_N < T < T_C$  พร้อมทั้งมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก  $H$  ส่งผลให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่ชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกยังคงมีทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นแบบสุ่มเนื่องจากผลของอุณหภูมิ เมื่อทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าต่ำกว่า  $T_N$  และ  $T_C$  ส่งผลให้ชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในทิศทางตรงกันข้ามในแต่ละแลตทิซย่อย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก พบว่า แมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ส่งผลให้แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรถูกยึดทิศทางเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแมกเนติก นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กผ่านการวัดวงปิดฮีสเทอรีซิสจะพบว่าลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสจะมีการเลื่อนออกจากแนวแกนสมมาตร ดังแสดงในภาพประกอบ 1.4

พหุบัณฑิต ชีวะ





**ภาพประกอบ 1.4** ลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่มีการเลื่อนตามแนวแกนของสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [1]

จากภาพประกอบ 1.4 พบว่า เมื่อทำการตรวจวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกในกรณีที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน จะทำให้ได้ลูปวงปิดที่มีลักษณะสมมาตรซึ่งแสดงได้ดังลูปวงปิดที่มีลักษณะเป็นเส้นประ แต่ในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน พบว่า ลูปวงปิดที่ได้จะมีการเลื่อนออกจากแกนสมมาตรตามแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอกเนื่องจากผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก นอกจากนี้ ผลของปรากฏการณ์ดังกล่าวยังทำให้ค่าสนามเคอร์เออซีวิตี (coercivity field) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กที่มีสภาพคงค้างทางแม่เหล็กอยู่นั้นหมดสภาพความเป็นแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ปริมาณที่บอกถึงขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดเรียกว่า สนามแลกเปลี่ยน (exchange field) ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับค่าพลังงานอุปสรรค (energy barrier) [5] ภายในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งเป็นปริมาณที่สำคัญในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก สนามหักล้าง และพลังงานความร้อน โดยค่าพลังงานดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเลื่อนของลูปวงปิดเป็นผลมาจากชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กหรือค่าพลังงานอุปสรรคดังแสดงได้ตามสมการ [5]

$$\Delta E = K_{AF} V_{AF} \left[ 1 - \frac{H^*}{H_K} \right]^2 \quad (1.1)$$

เมื่อ  $V_{AF}$  เป็นปริมาตรของเกรนในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร  $K_{AF}$  เป็นค่าแอนไอโซโทรปีของเกรนในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร  $H^*$  เป็นสนามแลกเปลี่ยนจากชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร และ  $H_K$  เป็นสนามแอนไอโซโทรปีเสมือนที่มีลักษณะคล้ายกับสนามแอนไอโซโทรปีในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร จากสมการ (1.1) จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นฟิล์มคือค่าแอนไอโซโทรปีหรือคุณสมบัติภายในของชั้นวัสดุแม่เหล็ก โดยในกรณีที่ว่าค่าแอนไอโซโทรปีมีค่าสูง การเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันมีทิศทางออกจากทิศแกนง่ายจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกที่สูงขึ้น นอกจากนี้ ปริมาตรของเกรนยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชัน โดยในปี 2009 กอนซาโล เฟอร์นันเดซและคณะ (Vallejo-Fernandez et al) [5] ได้นำเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีอย่างง่ายในการอธิบายพฤติกรรมของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เป็นผลมาจากขนาดและความหนาของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลการตัดที่ขอบของเกรนสำหรับการคำนวณการเลื่อนของลูปวงปิด โดยผลจากการคำนวณพบว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถอธิบายผลของโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองในงานวิจัยของกอนซาโล และคณะ ยังมีข้อบกพร่องเนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่ายซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของอันตรกิริยาระหว่างเกรนแต่ละเกรนในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก และผลของอุณหภูมิ นอกจากนี้ ผลของการตัดที่ขอบของเกรนได้ถูกพิจารณาโดยการประมาณและถูกนำไปคำนวณหลังจากการคำนวณปริมาณค่าสนามแลกเปลี่ยน จากความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองดังกล่าว นำไปสู่จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างในระดับจุลภาคแบบมาตรฐานที่มีความเสมือนจริง เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้นต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

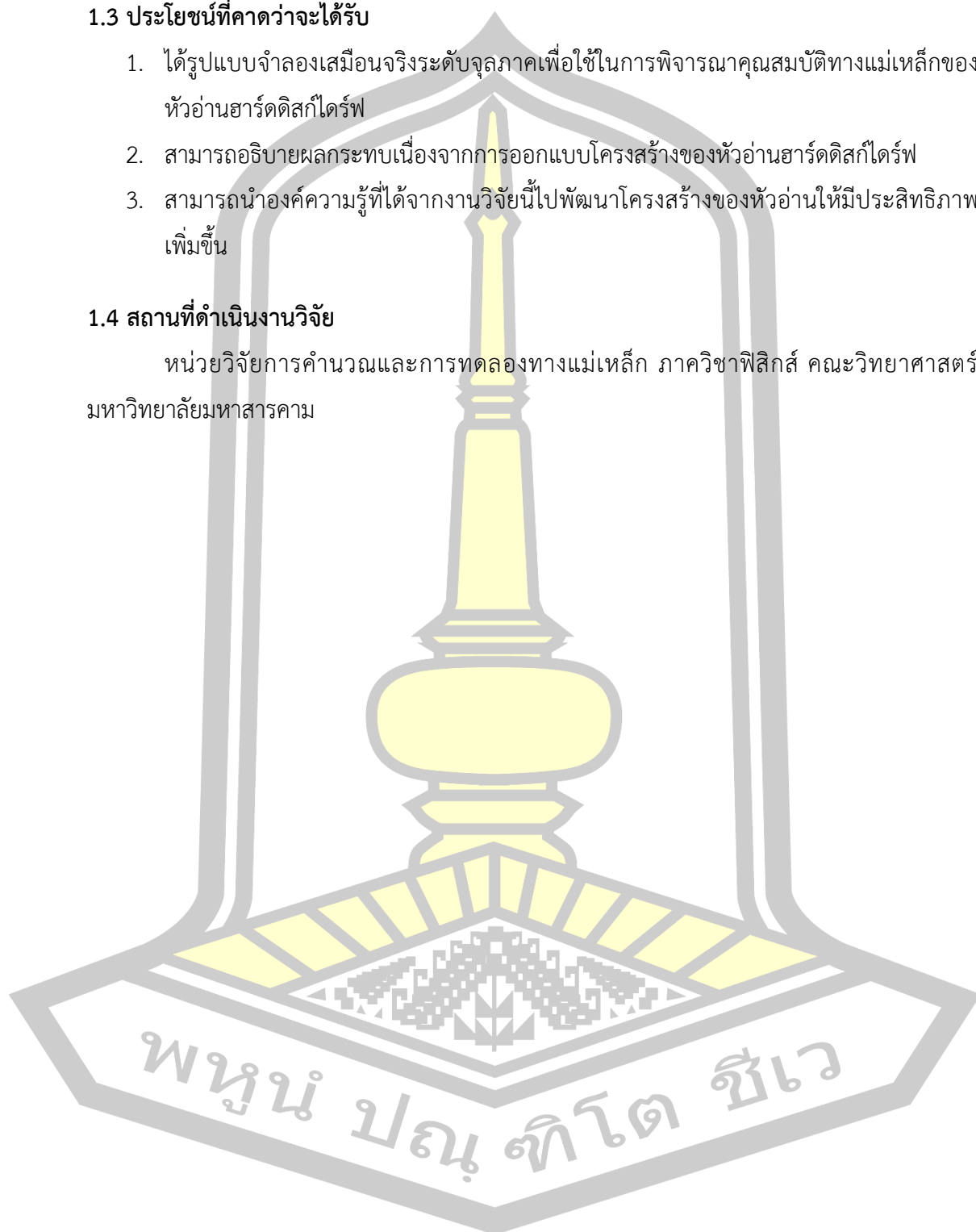
1. พัฒนารูปแบบจำลองเสมือนจริงทางคอมพิวเตอร์ระดับจุลภาคเพื่อใช้พิจารณาผลของการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล
2. ศึกษาผลกระทบของการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟต่อผลของความเสถียรภาพทางความร้อนผ่านการพิจารณาค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน
3. ศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นฟิล์ม ขนาดของเกรน และการกระจายตัวของขนาดของเกรนต่อผลของความเสถียรภาพทางความร้อน

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รูปแบบจำลองเสมือนจริงระดับจุลภาคเพื่อใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ
2. สามารถอธิบายผลกระทบเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ
3. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปพัฒนาโครงสร้างของหัวอ่านให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

### 1.4 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

หน่วยวิจัยการคำนวณและการทดลองทางแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและปริทัศน์เอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาผลของการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจพื้นฐาน สมบัติเฉพาะตัวและธรรมชาติของวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภท เพื่อทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับปริมาณพื้นฐานทางแม่เหล็ก ในลำดับต่อไปกล่าวถึงประเภทของวัสดุแม่เหล็ก ได้แก่ วัสดุไดอะแมกเนติก วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก และวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะถูกกล่าวโดยละเอียดเนื่องจากเป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการเกิดปรากฏการณ์ไบฮัสแลกเปลี่ยนและทฤษฎีพื้นฐานที่นำไปสู่การเกิดปรากฏการณ์ไบฮัสแลกเปลี่ยนซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการยัดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิงของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### 2.1 ปริมาณทางแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง

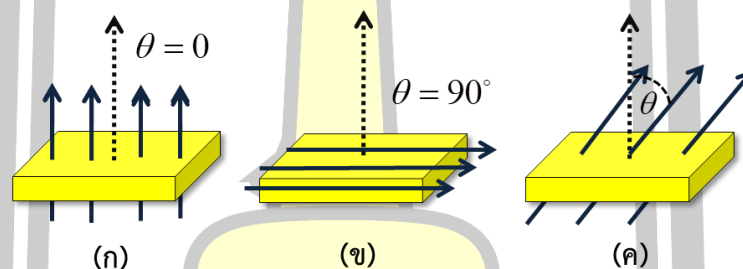
ในการศึกษาวัสดุแม่เหล็กและการนำไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปริมาณพื้นฐานทางแม่เหล็ก ได้แก่ ฟลักซ์แม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็ก ความแรงสนามแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และสภาพรับไวเชิงแม่เหล็ก เป็นต้น โดยนิยามและความหมายของปริมาณพื้นฐานทางแม่เหล็กดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 เส้นแรงแม่เหล็กและความแรงสนามแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux;  $\Phi_B$ ) คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กหรือปริมาณสนามแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่หนึ่งๆ ซึ่งมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (weber:  $Wb$ ) โดยปริมาณของฟลักซ์แม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่  $A$  ใดๆ สามารถคำนวณได้จากการรวมปริมาณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่เล็กๆ  $d\vec{a}$  ซึ่งนิยามได้ตามสมการ

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a} = BA \cos \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\vec{B}$  คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) หรือความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น ( $Wb / m^2$ ) หรือ เทสลา ( $T$ )  $A$  เป็นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $m^2$ ) และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่างทิศของสนามแม่เหล็กกับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ (normal vector) ที่สนามแม่เหล็กทะลุผ่าน จากสมการ (2.1) สามารถแบ่งแยกการพิจารณาได้เป็น 3 กรณี โดยในกรณีแรกสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์พื้นที่  $A$  ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1(ก) พบว่าในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่  $A$  จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $\Phi_B = BA$  ในกรณีที่สองซึ่งเป็นกรณีที่สนามแม่เหล็กมีทิศขนานกับเวกเตอร์พื้นที่  $A$  ดังภาพประกอบ 2.1 (ข) พบว่าในกรณีนี้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่จะมีค่าเป็นศูนย์กล่าวคือ  $\Phi_B = 0$  และในกรณีที่สามเป็นกรณีที่สนามแม่เหล็กทำมุม  $\theta$  กับเวกเตอร์พื้นที่ ดังภาพประกอบ 2.1 (ค) พบว่าปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ที่มีค่าเท่ากับ  $\Phi_B = BA \cos \theta$  นอกจากนี้ ในกรณีที่เส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านพื้นที่ผิวปิดใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎของเกาส์ (Gauss's law) ของสนามแม่เหล็ก [6]



**ภาพประกอบ 2.1** แผนภาพแสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ทะลุผ่านพื้นที่  $A$  (ก) กรณีที่สนามแม่เหล็กขนานกับเวกเตอร์ปกติ (ข) กรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับเวกเตอร์ปกติ (ค) กรณีที่สนามแม่เหล็กทำมุม  $\theta$  กับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่  $A$  หรือเวกเตอร์ปกติ

### 2.1.2 สนามแม่เหล็กหรือความแรงสนามแม่เหล็ก

ความแรงสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength;  $H$ ) เป็นปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กหรือความเข้มสนามแม่เหล็กต่อสภาพซาบซิมได้ทางแม่เหล็กซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\vec{H}$  คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ( $A \cdot m$ )

$\mu$  คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (permeability) มีหน่วยเป็น ( $Wb / A \cdot m$ ) สำหรับสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของอวกาศ (permeability of free space:  $\mu_0$ ) มีค่าเท่ากับ

$$4\pi \times 10^{-7} Wb / A \cdot m$$

### 2.1.3 โมเมนต์แม่เหล็ก

โมเมนต์แม่เหล็กสามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณาแท่งแม่เหล็กที่ประกอบไปด้วยขั้วบวก (+p) และขั้วลบ (-p) ที่บริเวณปลายสุดของแท่งแม่เหล็กโดยระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองเท่ากับ  $l$  ซึ่งแท่งแม่เหล็กถูกวางทำมุม  $\theta$  กับสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ (uniform magnetic field;  $H$ ) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 (ก) ซึ่งจะทำให้เกิดทอร์กกระทำบนแท่งแม่เหล็กเพื่อหมุนให้แท่งแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก

$$(\rho H \sin \theta) \left( \frac{l}{2} \right) + (\rho H \sin \theta) \left( \frac{l}{2} \right) = \rho H l \sin \theta \quad (2.3)$$

เมื่อแทนค่า  $H = 1 \text{ Oe}$  และ  $\theta = 90^\circ$  ในสมการ (2.3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$m = pl \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) นิยามให้โมเมนต์แม่เหล็กคือปริมาณโมเมนต์ทอร์กเนื่องจากสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอขนาด 1 Oe ที่ทำให้แท่งแม่เหล็กทำมุม  $90^\circ$  กับแท่งแม่เหล็ก ในทางกลศาสตร์ควอนตัมได้อธิบายถึงจุดกำเนิดของโมเมนต์แม่เหล็ก โดยอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมมีโมเมนต์แม่เหล็กมาจากสองแหล่งกำเนิดด้วยกัน โดยส่วนแรกมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส และส่วนที่สองมีความสัมพันธ์กับการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 (ข) โดยสามารถพิจารณาการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กได้ดังต่อไปนี้

#### 1. โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบวงโคจร

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสเสมือนว่าเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเป็นลูปรอบพื้นที่  $A$  ดังภาพประกอบ 2.10 นำไปสู่การเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ

$$\vec{m} = I \cdot \vec{A} \quad (2.5)$$

จากนิยามของกระแส  $I = q/t = -e/t$  และ พื้นที่  $A = \pi r^2$

$$m_{orbit} = -\frac{e\pi r^2}{t} \quad (2.6)$$

โดย  $m_{orbit}$  คือโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส กำหนดให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยเวลา  $t = 2\pi r / v$

$$m_{orbit} = \frac{-e\pi r^2 v}{2\pi r} = \frac{erv}{2} = -\frac{erv}{2} \frac{m_e}{m_e} = -\frac{eL}{2m_e} \quad (2.7)$$

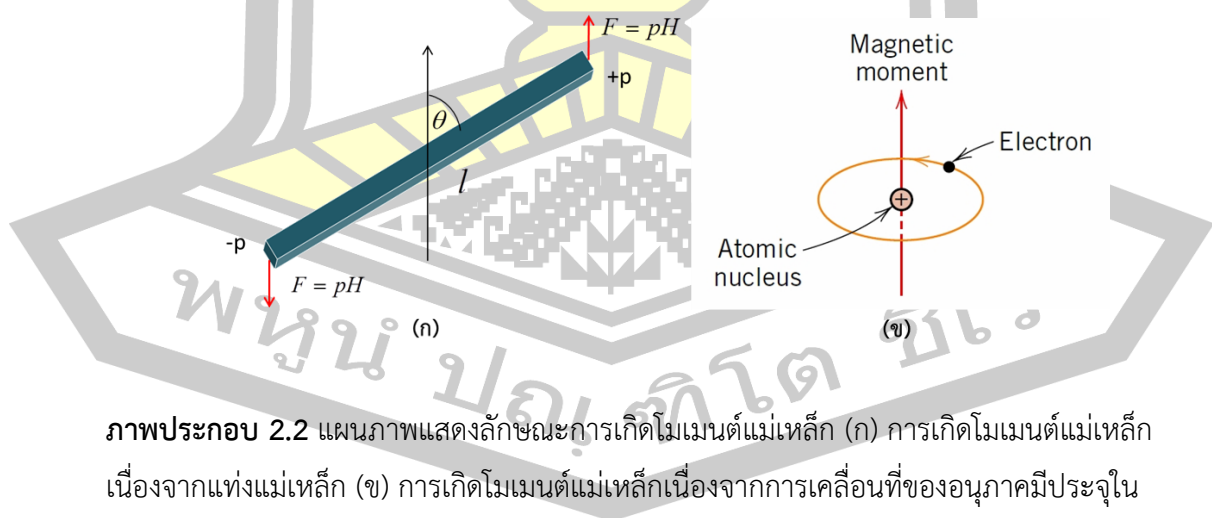
โดย  $L$  คือโมเมนต์เชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $m_e v r$  และ  $m_e$  คือมวลของอิเล็กตรอน ในทางควอนตัมโมเมนต์เชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $n\hbar$  ดังนั้น

$$m_{orbit} = -\frac{e\hbar n}{2m_e} \quad (2.8)$$

$n$  คือระดับชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอน โดยที่ระดับพลังงานต่ำสุด  $n=1$  โมเมนต์แม่เหล็กมีค่าเป็น

$$m_{orbit} = -\frac{e\hbar}{2m_e} = -9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) คือปริมาณพื้นฐานทางแม่เหล็กที่เรียกว่า บอห์รแมกนีตรอน (Bohr magnetron:  $\mu_B$ ) ในระบบ SI  $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  และในระบบ CGS  $\mu_B = 0.927 \times 10^{-20} \text{ erg / Oe}$  หรือ  $emu$



ภาพประกอบ 2.2 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากแท่งแม่เหล็ก (ข) การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุในอะตอม [7]

## 2. การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหรือสปิน

การเคลื่อนที่รอบตัวเองของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดบ่วงกระแสของอิเล็กตรอนโดยเรียกว่า บ่วงกระแสยังผล ซึ่งนำไปสู่การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเกิดขึ้น การคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง ( $\mu_s$ ) มีค่าเท่ากับโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

$$\mu_s = \mu_{orbit} = \frac{eh}{4\pi m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (2.10)$$

### 2.1.4 สนามแม่เหล็กภายในวัสดุและสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งแยกการพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน ในส่วนแรกยกตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าภายในลวดโซลินอยด์ ดังภาพประกอบ 2.3 (ก) เป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}_i$  ภายในขดลวด โดยทิศทางของสนามดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากกฎมือขวา โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของความแรงสนามแม่เหล็กได้ตามสมการ

$$\vec{B}_i = \mu_0 \vec{H} \quad (2.11)$$

จากนั้น เมื่อนำวัสดุแม่เหล็กไปวางไว้ในขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายในขดลวด ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 (ข) พบว่า สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายในตัวของวัสดุเอง โดยความแรงแม่เหล็กของวัสดุดังกล่าวมีค่าเท่ากับขนาดของแมกนีไทเซชัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กหรือการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเนื่องจากวัสดุ ตามสมการ

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M} \quad (2.12)$$

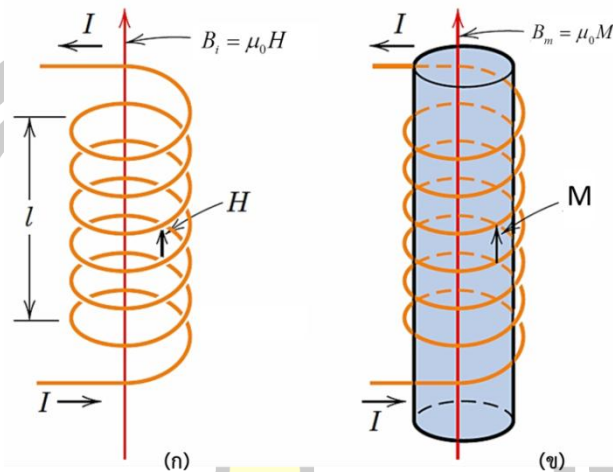
เมื่อ  $M$  คือความแรงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำวัสดุแม่เหล็กด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกหรือแมกนีไทเซชัน (magnetization:  $M$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด เช่น การจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก ปริมาณของโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีไทเซชันในรูปของผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุ สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V} \quad (2.13)$$



เมื่อ  $\sum \vec{m}$  เป็นโมเมนต์แม่เหล็กรวมในวัสดุแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $A \cdot m^2$

$V$  เป็นปริมาตรของวัสดุแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $m^3$



ภาพประกอบ 2.3 แผนภาพแสดงการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (ก) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ (ข) การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายในวัสดุ [7]

ดังนั้น ปริมาณสนามแม่เหล็กรวมจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์และสนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำภายในวัสดุ ดังสมการ

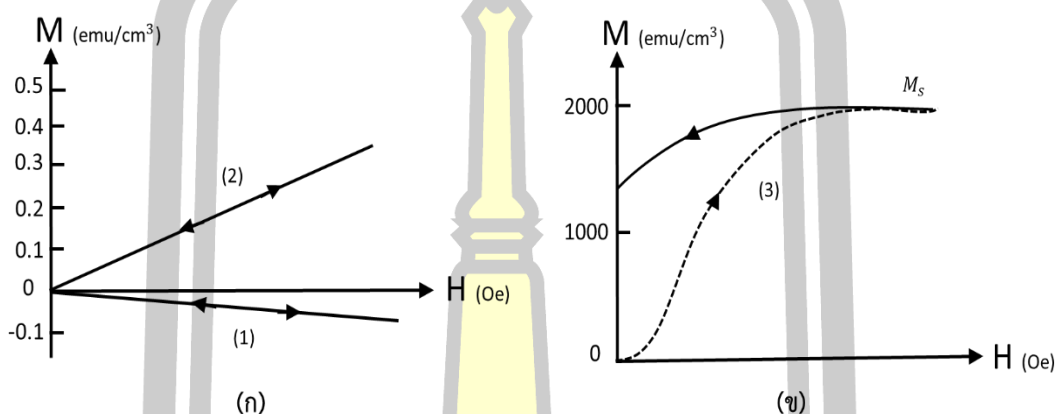
$$\begin{aligned}\vec{B} &= \vec{B}_i + \vec{B}_m \\ \vec{B} &= \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \\ \vec{B} &= \mu_0(1 + \chi)\vec{H}\end{aligned}\quad (2.14)$$

นิยามให้  $\chi$  คือสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$\chi = \frac{M}{H}\quad (2.15)$$

ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กเป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการตอบสนองหรือความไวต่อการเป็นแม่เหล็กของวัสดุ โดยค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในของวัสดุแต่ละประเภท สำหรับวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกปริมาณสภาพรับไว้ทางแม่เหล็กมีค่าเป็นลบที่น้อยมากและมีการเปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กภายนอกแบบเชิงเส้นดังแสดงในเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (1) ในภาพประกอบ 2.4 (ก) สำหรับวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก พบว่าปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุมีค่าน้อยมากและมีขนาดเป็นบวก โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันต่อ

สนามแม่เหล็กภายนอกมีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังแสดงในเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (2) ในภาพประกอบ 2.4 (ก) และสำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกพบว่าปริมาณสภาพรับไว้เชิงแม่เหล็กของวัสดุมีค่าเป็นบวกที่สูงมาก โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือ มีสภาพรับไว้เชิงแม่เหล็กหลายค่าดังแสดงในเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (3) ในภาพประกอบ 2.4 (ข)



**ภาพประกอบ 2.4** แผนภาพแสดงเส้นโค้งแมกนีไทเซชัน (ก) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุไดอะแมกเนติก (1) และวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก (2) (ข) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก [8]

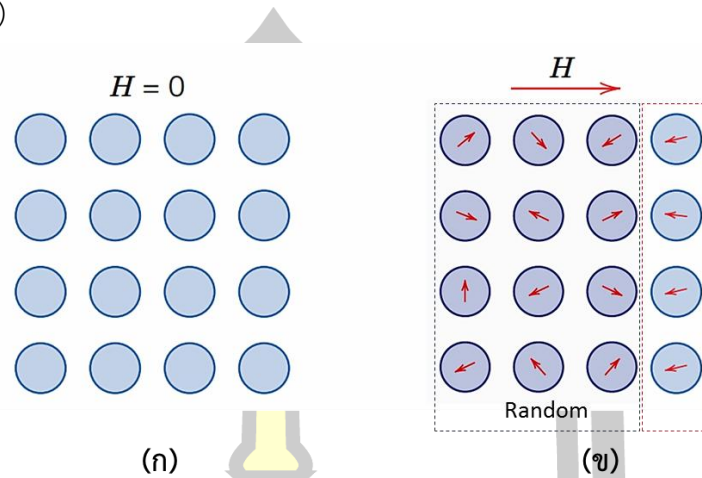
## 2.2 ประเภทของวัสดุแม่เหล็ก

วัสดุแม่เหล็กเป็นวัสดุที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละประเภท โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กที่สำคัญประกอบไปด้วยกัน 4 ประเภท ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยรายละเอียดของวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภทจะถูกอธิบายตามลำดับดังต่อไปนี้

### 2.1.1 วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก

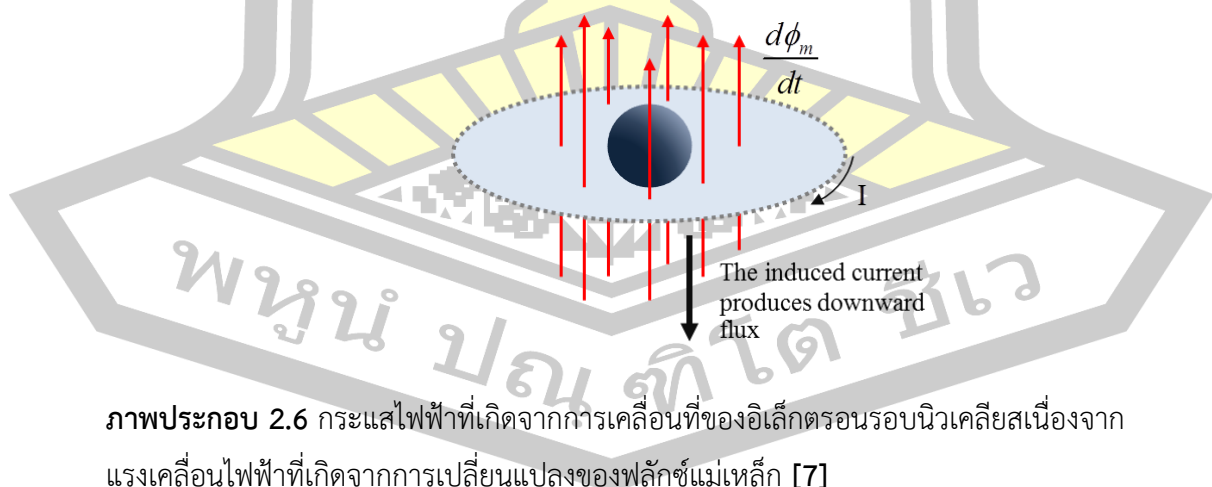
วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกเป็นวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก เนื่องจากมีการจัดเรียงของอิเล็กตรอนวงนอกสุดแบบเต็มส่งผลให้วัสดุดังกล่าวไม่มีปริมาณของโมเมนต์แม่เหล็กดังแสดงในภาพประกอบ 2.5 (ก) จนกระทั่งเริ่มมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก วัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบวงโคจรเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก โดยขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กที่

ถูกเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมากและยังมีทิศทางตรงข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5 (ข)



ภาพประกอบ 2.5 แผนภาพแสดงแบบจำลองลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก ก) กรณีที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก ข) กรณีที่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก [7]

การตอบสนองของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกต่อสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ [6] โดยพบว่าค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุนี้มีค่าเป็นลบ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force; emf) ในทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6

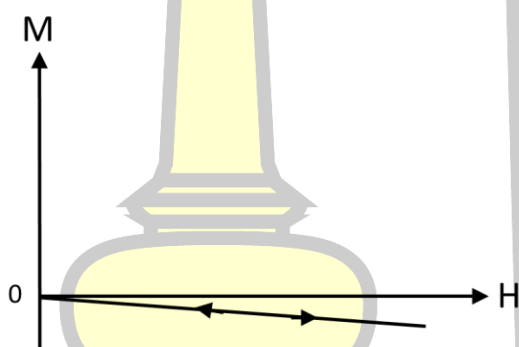


ภาพประกอบ 2.6 กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก [7]

กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่รอบรูปเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นฟลักซ์ต่อสภาพรับไว้ทางแม่เหล็กหรือความแรงของสนามแม่เหล็ก ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta \vec{m} = -\frac{e^2 r^2 \mu_0}{4m} \vec{H} \quad (2.16)$$

โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกจะมีค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กประมาณ  $-10^{-6}$  ถึง  $-10^{-5}$  [8] นอกจากนี้ เมื่อทำการวัดเส้นโค้งแมกนีไทเซชันพบว่าค่าสภาพรับไว้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติกมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 และมีค่าไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ตัวอย่างวัสดุประเภทแม่เหล็กไดอะแมกเนติก ได้แก่ ตะวณิยังยวด บิสมัท พรอท เงิน เพชร ตะกั่ว แกรไฟต์ ทองแดง น้ำ เป็นต้น

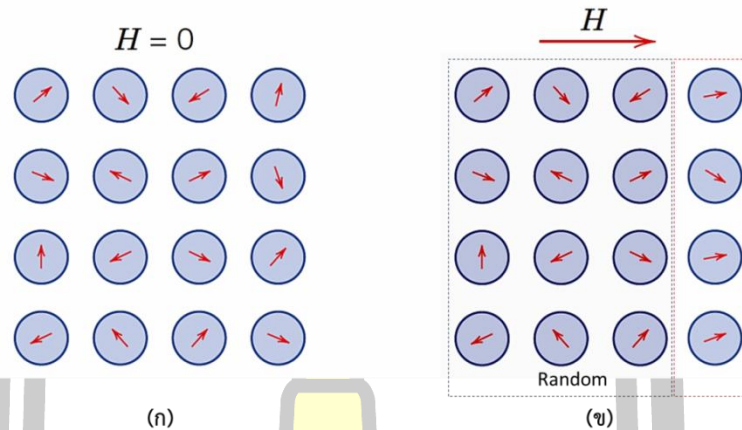


ภาพประกอบ 2.7 แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กไดอะแมกเนติก [7]

### 2.1.2 วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก

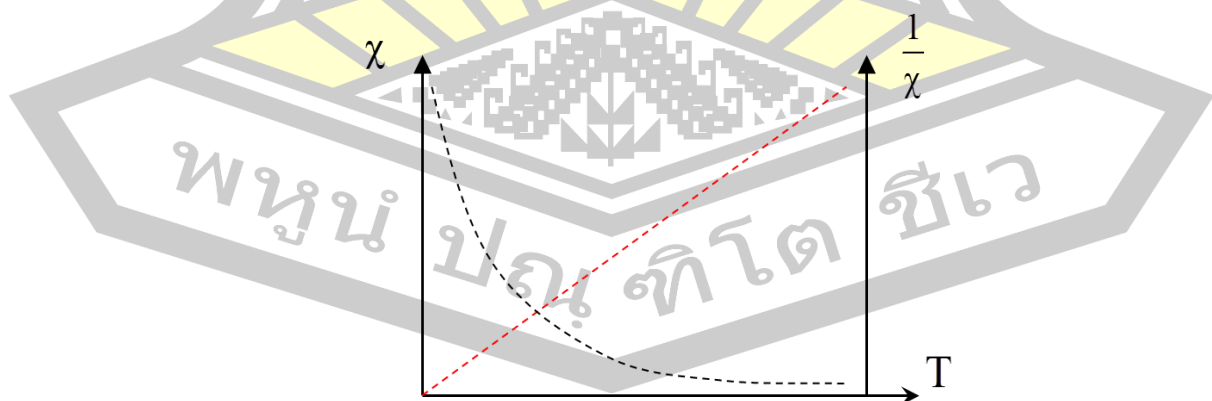
วัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกเป็นวัสดุที่โมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าประมาณ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-2}$  [7] โดยทั่วไปวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกจะมีโมเมนต์ที่มีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มเนื่องจากสปินโมเมนต์และโมเมนต์แม่เหล็กวงโคจรหักล้างกันไม่สมบูรณ์ถึงแม้ว่าจะไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกในสภาวะดังกล่าวโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุจะมีทิศทางแบบอิสระเนื่องจากผลของความแปรปรวนเชิงความร้อนซึ่งส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมและแมกนีไทเซชันมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 (ก) แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแก่วัสดุพบว่าจะมีโมเมนต์แม่เหล็ก

เพียงบางส่วนที่มีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกและโมเมนต์แม่เหล็กอีกบางส่วนยังคงมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่ส่งผลต่อวัสดุประเภทนี้ ส่งผลให้ปริมาณสภาพรับไว้ทางแม่เหล็กมีค่าบวกอ่อนๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8 (ข)



**ภาพประกอบ 2.8** แผนภาพแสดงการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็ก (ก) ในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก (ข) ในสถานะที่วัสดุถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอก [7]

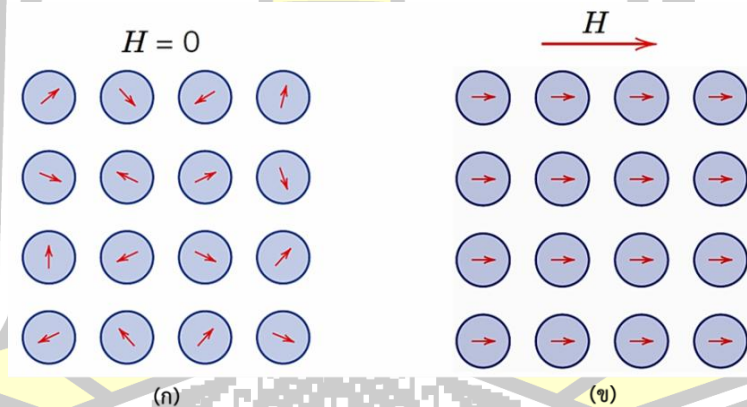
นอกจากนี้พบว่าค่าความเป็นแม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกหรือค่าสภาพรับไว้ทางแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลของอุณหภูมิ เมื่อพลังงานความร้อน ( $k_B T$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกมีค่าลดลงและเข้าสู่ศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของพลังงานความร้อนสามารถเอาชนะผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอก โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กต่ออุณหภูมิสามารถได้ด้วยฟังก์ชันของ Langevin ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กกับอุณหภูมิ สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.9



**ภาพประกอบ 2.9** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกที่อุณหภูมิใดๆ [7]

### 2.1.3 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กสูงซึ่งมีค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กสูงถึง  $10^6$  ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก พบว่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มซึ่งทำให้แมกนีไทเซชันในวัสดุมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 (ก) เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแก่วัสดุ พบว่าแมกนีไทเซชันในวัสดุมีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 (ข) นอกจากนี้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะเกิดสภาพคงค้างทางแม่เหล็กและการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันต่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นแบบเชิงเส้น กล่าวคือ ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าไม่คงที่ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุถึงจุดๆหนึ่งหรือเรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) หรือ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ส่งผลทำให้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก [8] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกพบมากในโลหะทรานซิชัน เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และยังพบในวัสดุจำพวกโลหะหายาก เช่น แกโดลิเนียม เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.10 แผนภาพแสดงการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก [7]

คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน ซึ่งถูกนำเสนอโดย E.C. Stoner Mott และ J.C. Slater โดยทฤษฎีแถบพลังงานได้อาศัยทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามกฎการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) ที่กล่าวว่า “ อิเล็กตรอน 2 ตัว ในอะตอมเดียวกันจะมีเลข

ควอนตัม  $n, l, m_l, m_s$  เหมือนกันทั้งสี่ค่าไม่ได้ ” โดยการจัดเรียงของอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานย่อยในแต่ละระดับชั้นพลังงานหลัก ดังแสดงได้ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของอะตอมในระดับชั้นพลังงานต่างๆ [8]

Shell	K	L	M	N
Subshell	1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s ...
Capacity	2	2 6	2 6 10	2 ...

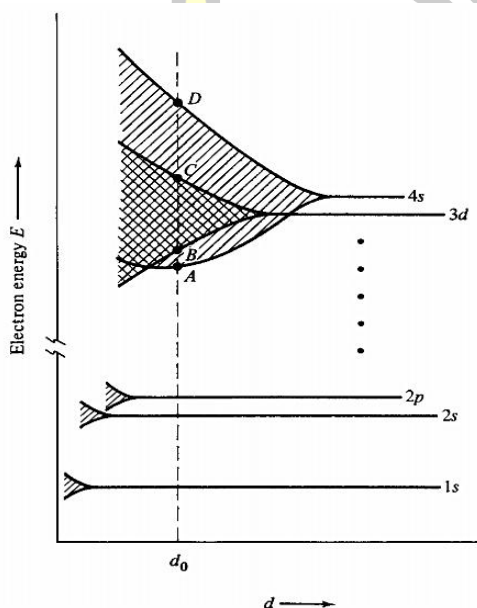
เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานของธาตุที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก เช่น Ca ซึ่งมีจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมเท่ากับ 20 ตัว ดังนั้นการจัดเรียงของอิเล็กตรอนของแต่ละระดับชั้นพลังงานคือ  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$  จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นพลังงานมีการจัดเรียงแบบเต็มชั้นส่งผลให้ธาตุแคลเซียมไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาธาตุจำพวกโลหะทรานซิชัน เช่น ไทเทเนียม (Ti) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) พบว่ามีระดับชั้นพลังงานนอกสุดคือ 3d และ 4s ซึ่งมีการจัดเรียงของอิเล็กตรอนแบบไม่เต็มชั้น โดยอิเล็กตรอนจะถูกจัดเรียงในระดับชั้นพลังงาน 4s ก่อนแล้วจึงมาจัดเรียงในระดับชั้นพลังงาน 3d จึงทำให้พลังงานรวมของอะตอมมีค่าต่ำและมีความเสถียรกว่า สำหรับอะตอมของธาตุโลหะทรานซิชันระดับชั้นพลังงาน 3d และ 4s อยู่ใกล้กันมากและเกิดการซ้อนทับกันระหว่างระดับชั้นพลังงานดังกล่าว

ตาราง 2.2 ลักษณะการจัดเรียงของอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน 3d และ 4s ของธาตุโลหะทรานซิชัน [8]

Number of electron in shell	Transition Element											
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
3d	0	0	1	2	3	5	5	6	7	8	10	10
4s	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2
3d+4s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

เมื่อพิจารณาก่อนวัสดุที่ประกอบไปด้วยจำนวนอะตอม N อะตอม ระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมจะมีการเรียงตัวชิดกันในระดับพลังงานที่ใกล้กันมาก ตัวอย่างเช่น ที่ระดับชั้นพลังงาน 1s สามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้สูงสุด 2 ตัว และมีทิศทางตรงกันข้ามซึ่งเป็นไปตามกฎการกีดกันของเพาลี ในกรณีที่วัสดุประกอบไปด้วย N อะตอม ระดับชั้นพลังงาน 1s จะถูกแยกออกเป็น N ระดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกิดเป็นแถบพลังงานที่ต่อเนื่องของระดับชั้นพลังงาน 1s

ในกรณีของโลหะทรานซิชันจะเกิดการซ้อนทับกันของแถบพลังงาน 3d และ 4s ดังแสดงในภาพประกอบ 2.11 ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากชั้น 4s ไปยังชั้น 3d โดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินโมเมนต์ของอะตอมที่อยู่ข้างเคียงส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของสปินที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งรายละเอียดของค่าปริพันธ์แลกเปลี่ยนจะกล่าวในหัวข้อ 2.3



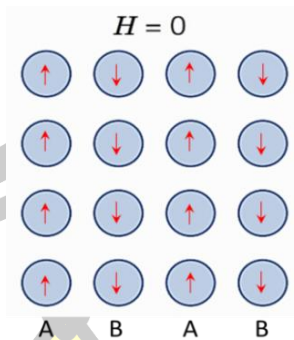
ภาพประกอบ 2.11 แผนภาพแสดงการซ้อนทับของแถบพลังงานของธาตุโลหะทรานซิชัน [8]

#### 2.1.4 วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงทิศทางของโมเมนต์ภายในแต่ละแลตทิซย่อยไปในทิศทางเดียวกัน โดยโมเมนต์แม่เหล็กของแลตทิซย่อย A จะมีการจัดเรียงทิศทางตรงข้ามกับโมเมนต์แม่เหล็กของแลตทิซ B ที่อยู่ข้างเคียงสลับกันไป ดังภาพประกอบ 2.12 ส่งผลให้เกิดการหักล้างกันของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุ วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุจำพวกโลหะผสมและออกไซด์ เช่น เหล็กแมงกานีส (FeMn) นิกเกิลออกไซด์ (NiO) โคบอลต์ออกไซด์ (CoO)

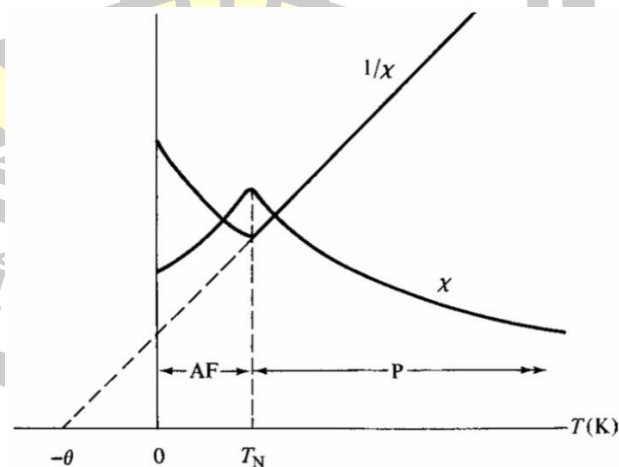
พูน ปณ ทิโต ชิว





ภาพประกอบ 2.12 แผนภาพแสดงการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [7]

วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กเป็นบวกเล็กน้อยทุกๆ อุณหภูมิ แต่สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กยังคงมีการเปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 2.13 เมื่ออุณหภูมิมิค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ  $T(0) < T \leq T_N$  พบว่า ปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ที่อุณหภูมิต่ำโมเมนต์แม่เหล็กจากที่เคยมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ ได้รับผลจากปริมาณพลังงานความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น โมเมนต์แม่เหล็กบางตัวจึงเกิดการเบี่ยงเบนทิศทางออกจากสมดุลส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุหักล้างกันไม่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กจึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิวิกฤติซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิของนีล (Neel temperature) แต่เมื่อมีการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าอุณหภูมิของนีล ( $T > T_N$ ) พบว่า ปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กจะมีค่าลดลงและมีค่าลู่เข้าสู่ศูนย์ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของนีล ปริมาณพลังงานความร้อนจะส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม โดยวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการเปลี่ยนคุณสมบัติไปเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก



ภาพประกอบ 2.13 แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากผลของอุณหภูมิ [8]

## 2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

ในการออกแบบหรือนำวัสดุแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องเข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานและพลวัตของแมกนีไทเซชันซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับทั้งปัจจัยภายในและภายนอกวัสดุ เช่น ปริมาณแอนไอโซโทรปี ปฏิสัมพันธ์การแลกเปลี่ยน พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก พลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

### 2.3.1 ปริมาณแอนไอโซโทรปี

แอนไอโซโทรปีเป็นปริมาณที่มีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติภายในวัสดุ (intrinsic magnetic properties) ของวัสดุแต่ละประเภท โดยปริมาณแอนไอโซโทรปีจะส่งผลกระทบต่อรูปร่างของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของแต่ละประเภทหรือแม้แต่ในวัสดุประเภทเดียวกันเอง เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแก่วัสดุ โดยลักษณะของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันที่แตกต่างกันมีผลเนื่องมาจากปริมาณแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น แอนไอโซโทรปีผลึก (crystal anisotropy หรือ magnetocrystalline anisotropy) แอนไอโซโทรปีรูปร่าง (shape anisotropy) แอนไอโซโทรปีความเครียด (stress anisotropy) แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน (exchange anisotropy) โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะปริมาณแอนไอโซโทรปีผลึกและแอนไอโซโทรปีรูปร่าง เนื่องจากปริมาณทั้งสองเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

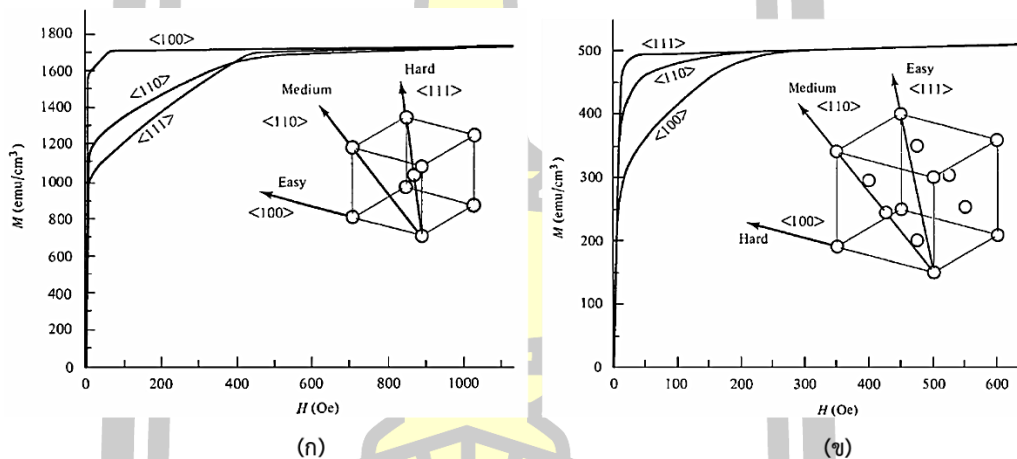
#### 2.3.1.1 แอนไอโซโทรปีผลึก

ผลึกเป็นของแข็งที่มีองค์ประกอบเป็นอะตอม โมเลกุล หรือ ไอออน ซึ่งอยู่รวมกันอย่างมีระเบียบ เป็นรูปแบบที่ซ้ำกันและแผ่ขยายออกไปในเนื้อที่สามมิติ โครงสร้างผลึกประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์ย่อยที่เรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละประเภท สำหรับโครงสร้างผลึกของวัสดุแม่เหล็กโครงสร้างภายในวัสดุที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งเรียกปัจจัยนี้ว่า แอนไอโซโทรปีผลึก (crystal anisotropy) ปัจจัยดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุ โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ทำให้แมกนีไทเซชันในวัสดุมีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมดหรือแมกนีไทเซชันอิมิตัวด้วยค่าสนามที่น้อยที่สุดจะเรียกทิศทางนี้ว่า ทิศแกนง่าย (easy axis direction) ในทางตรงกันข้ามทิศทางที่ใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกในการทำให้แมกนีไทเซชันในวัสดุเข้าสู่จุดอิมิตัวเรียกว่า ทิศแกนยาก (hard axis direction)

สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นแบบ BCC (body center cubic) เช่น เหล็ก (Fe) เมื่อทำการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศทาง  $\langle 100 \rangle$   $\langle 110 \rangle$  และ  $\langle 111 \rangle$  พบว่า ทิศแกนง่าย

ของเหล็กคือเซตของทิศ  $\langle 100 \rangle$  โดยปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้แมกนีไทเซชันในวัสดุเข้าสู่จุดอิ่มตัวมีค่าน้อยกว่า 100 Oe ในขณะที่เซตของทิศ  $\langle 111 \rangle$  ซึ่งเป็นทิศแกนยากจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกมากกว่า 400 Oe จึงจะทำให้แมกนีไทเซชันของเหล็กเข้าสู่จุดอิ่มตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 (ก)

สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบ FCC (face center cubic) เช่น นิกเกิล (Ni) เมื่อทำการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศ  $\langle 100 \rangle$   $\langle 110 \rangle$  และ  $\langle 111 \rangle$  พบว่า ทิศที่ง่ายต่อการกระตุ้นให้แมกนีไทเซชันของนิกเกิลเข้าสู่จุดอิ่มตัวคือเซตของทิศ  $\langle 111 \rangle$  ซึ่งใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกน้อยกว่า 50 Oe ในขณะที่ทิศ  $\langle 100 \rangle$  จำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงในการเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในวัสดุเข้าสู่จุดอิ่มตัว ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 (ข) จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า วัสดุแม่เหล็กที่อยู่ในระบบผลึกเดียวกันคือ คิวบิก แต่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันจะมีทิศแกนง่ายที่แตกต่างกันไปด้วย



**ภาพประกอบ 2.14** การเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศทางที่แตกต่างกัน (ก) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของเหล็ก (Fe) (ข) เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของนิกเกิล (Ni) [8]

ปริมาณของแอนไอโซโทรปีผลึกสามารถอธิบายในรูปของพลังงานที่พยายามจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันตามทิศแกนง่าย เมื่อทำการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแมกนีไทเซชันภายในวัสดุจากที่เคยมีแนวโน้มหันไปในทิศแกนง่ายจะมีการเบี่ยงเบนไปตามทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก โดยพลังงานที่สนามแม่เหล็กภายนอกจะต้องเอาชนะในการเบี่ยงเบนทิศทางของแมกนีไทเซชันออกจากทิศแกนง่ายเรียกว่า พลังงานแอนไอโซโทรปีผลึก (crystal anisotropy energy) สำหรับพลังงานแอนไอโซโทรปีของโครงสร้างแบบลูกบาศก์ สามารถแสดงได้ตามสมการ [9]

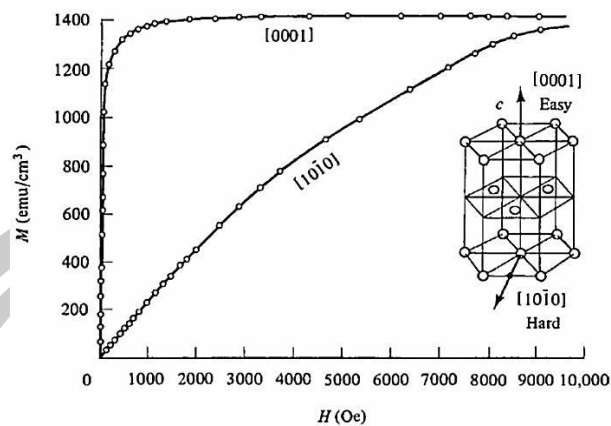
$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \dots \quad (2.17)$$

เมื่อ  $K_0, K_1, K_2, \dots$  แทนค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant) และ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  แทนค่าของ  $\cos a, \cos b, \cos c$  โดยที่  $a, b, c$  เป็นมุมที่กระทำกับแกนของผลึก ตามลำดับ จากสมการ (2.17) พจน์แรกทางด้านขวามือเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับมุมจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ต้องการเปรียบเทียบพลังงานในทิศทางที่แตกต่างกัน และพจน์ที่สามเป็นพจน์ที่มีค่าน้อยมาก โดยทั่วไปจะถูกละทิ้งในการพิจารณาค่าพลังงานแอนไอโซโทรปี

สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) เช่น โคบอลต์ (Co) เป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงแบบ close packed structure หรือเรียกว่า hexagonal close packed พบว่า ทิศที่ง่ายต่อการเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันเข้าสู่จุดอิมิตัวคือ  $\langle 0001 \rangle$  และมีทิศแกนยากคือ  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  ซึ่งลักษณะเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของทั้งสามโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.15 สำหรับรูปแบบสมการของพลังงานแอนไอโซโทรปีของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลซึ่งมีทิศแกนง่ายเพียงแกนเดียวหรือที่เรียกแอนไอโซโทรปีแกนเดียว (uniaxial anisotropy) โดยพลังงานแอนไอโซโทรปีของโครงสร้างลักษณะดังกล่าว สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$E = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots \quad (2.18)$$

เมื่อ  $K_0, K_1, K_2, \dots$  เป็นค่าคงที่แอนไอโซโทรปี มีหน่วยเป็น  $[J/m^3]$  และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่าย จากสมการ (2.18) พจน์แรกทางด้านขวามือเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่ายจึงไม่ค่อยมีความสำคัญสำหรับค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ต้องการเปรียบเทียบพลังงานในทิศทางที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเทอมที่เป็นอนุกรม แต่เนื่องจากเทอมเหล่านี้มีค่าน้อยมากโดยทั่วไปจะถูกละทิ้งในการพิจารณาค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีสำหรับวัสดุแม่เหล็กที่เป็นพหุผลึก (polycrystal) ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยผลึกหลายผลึกเรียงกันในทิศทางต่างๆกัน แอนไอโซโทรปีผลึกอาจมีการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ไม่ว่าจะให้สนามแม่เหล็กในทิศทางใด การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีลักษณะการตอบสนองที่เหมือนกัน



ภาพประกอบ 2.15 เส้นโค้งแมกนีไทเซชันของโคบอลต์ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางที่แตกต่างกัน [8]

### 2.3.1.2 แอนไอโซโทรปีรูปร่าง

แอนไอโซโทรปีรูปร่างเป็นผลเนื่องมาจากรูปร่างและความสมมาตรของวัสดุแม่เหล็ก ปริมาณแอนไอโซโทรปีรูปร่างมีความสัมพันธ์กับปริมาณพลังงานที่เรียกว่า magnetostatic energy ( $E_{ms}$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetising field) ภายในวัสดุ โดยผลของปริมาณดังกล่าวสามารถอธิบายได้ตามสมการ [8]

$$W = \int_0^M H \cdot dM \quad (\text{erg} / \text{cm}^3) \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) สามารถคำนวณค่าปริพันธ์และแสดงให้อยู่ในระบบหน่วย SI ได้ตามสมการ

$$W = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2} \quad (\text{J} / \text{m}^3) \quad (2.20)$$

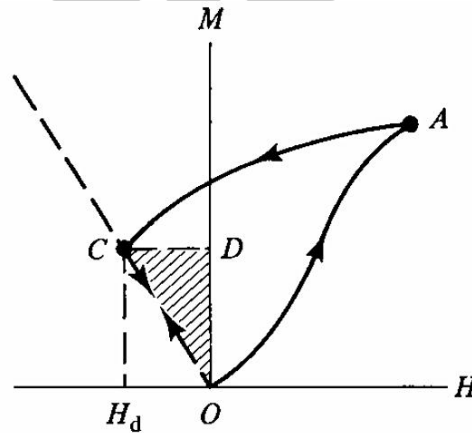
เมื่อ  $\mu$  คือสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กในอากาศมีค่าประมาณ 1 ดังนั้น สมการ (2.20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$W = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (\text{J} / \text{m}^3) \quad (2.21)$$

ที่  $W$  แทนงานที่เกิดขึ้นต่อปริมาตร จากสมการ (2.21) สามารถเขียนสมการแสดงปริมาณพลังงาน magnetostatic energy ได้ตามสมการ [8]

$$E_{ms} = \frac{\mu_0}{2} \int H_d^2 dv \quad (2.22)$$

ที่  $dv$  คือปริมาตรเล็กๆ ที่ถูกอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตร แต่อย่างไรก็ตาม การหาผลเฉลยของสมการ (2.22) มีความยุ่งยากในการคำนวณเป็นอย่างมาก ดังนั้น วิธีที่ง่ายในการคำนวณพลังงาน magnetostatic energy คือการคำนวณพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยม OCD ดังภาพประกอบ 2.16



ภาพประกอบ 2.16 แผนภาพแสดงปริมาณพลังงาน magnetostatic energy ของวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกเป็นศูนย์ [8]

จากภาพประกอบ 2.16 เมื่อให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแก่วัสดุ แมกนีไทเซชันภายในวัสดุจะมีการจัดเรียงทิศทางการทิศสนามแม่เหล็กภายนอก จนกระทั่งแมกนีไทเซชันในวัสดุทุกตัวหันตามทิศสนามแม่เหล็กภายนอกหรือเข้าสู่จุดอ้อมตัวที่จุด A เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก กล่าวคือ  $H = 0$  พบว่า ปริมาณแมกนีไทเซชันมีการลดลงมาที่ตำแหน่ง C เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กหักล้างภายในตัววัสดุแม่เหล็ก จากผลดังกล่าวสามารถแสดงปริมาณพลังงานที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหักล้างหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า self-energy โดยพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่ถูกแรเงา OCD ซึ่งค่าความชันของเส้นตรง OC มีค่าเท่ากับ  $-1/N_d$  เมื่อ  $N_d$  เป็นสัมประสิทธิ์สนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing coefficient) โดยพื้นที่สามเหลี่ยม OCD ระหว่าง M และ H สามารถประมาณได้ตามสมการ [8]

$$E_{ms} = \frac{1}{2} H_d M \quad (2.23)$$

เมื่อ M คือแมกนีไทเซชันที่จุด C จากสมการ (2.23) สามารถเขียนในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการ

$$E_{ms} = -\frac{1}{2} \vec{H}_d \cdot \vec{M} \quad (2.24)$$

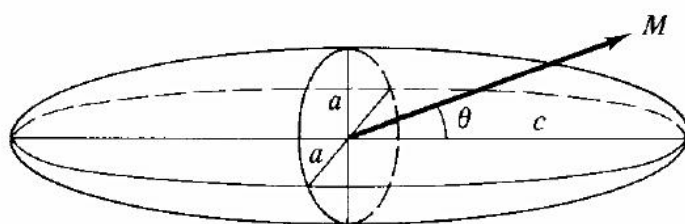
จากสมการ 2.24 พบว่าเครื่องหมายลบแสดงถึงทิศทางของสนามหักล้าง  $\vec{H}_d$  ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแมกนีไทเซชัน  $\vec{M}$  ความสัมพันธ์ของพลังงานศักย์ต่อหน่วยปริมาตรของแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กจากภายนอก  $H_a$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_p = -\vec{H}_a \cdot \vec{M} \quad (2.25)$$

ปริมาณพลังงานของแม่เหล็กเนื่องจากสนามในตัวของมันเองและสนามแม่เหล็กจากภายนอก มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบสมการ (2.25) ดังนั้น สมการดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของ  $N_d$  โดยแทน  $H_d = N_d M$

$$E_{ms} = -\frac{1}{2} N_d M^2 \quad (cgs) \quad (2.26)$$

เพื่อกลับเข้าสู่การพิจารณาผลของแอนไอโซโทรปีรูปร่าง สามารถทำได้โดยการพิจารณาวัสดุที่มีรูปร่างแบบทรงคล้ายทรงกลมแบบข้าง (prolate spheroid) ซึ่งมีรูปคล้ายลูกรีบีหรือเมล็ดข้าว โดยที่แกน  $c$  คือ semi-major axis และแกน  $a$  คือ semi-minor axis ดังแสดงในภาพประกอบ 2.17



ภาพประกอบ 2.17 แผนภาพแสดงโครงสร้างของวัสดุแบบทรงคล้ายทรงกลมแบบข้าง [8]

จากภาพประกอบ 2.17 แมกนีไทเซชันทำมุม  $\theta$  กับแกน semi-major axis ซึ่งสามารถแตกเวกเตอร์  $M$  ตามแนวแกน  $c$  และ  $a$  ได้เป็น  $M \cos \theta$  และ  $M \sin \theta$  ตามลำดับ ดังนั้น สมการ 2.26 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E_{ms} = \frac{1}{2} [(M \cos \theta)^2 N_c + (M \sin \theta)^2 N_a] \quad (2.27)$$

ที่  $N_c$  และ  $N_a$  เป็นสัมประสิทธิ์สนามหักล้างตามแนวแกน  $c$  และ  $a$  ตามลำดับ จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ  $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$  สามารถเขียนสมการ (2.27) ใหม่ได้เป็น

$$E_{ms} = \frac{1}{2} M^2 N_c + \frac{1}{2} M^2 (N_a - N_c) \sin^2 \theta \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) พบว่า ปริมาณพลังงาน magnetostatic energy มีค่าขึ้นอยู่กับระหว่างมุมแมกนีไทเซชันและ semi-major axis ซึ่งมีรูปแบบเดียวกันกับพลังงานแอนไอโซโทรปีฟลักแกนเดียวตาม

สมการ (2.18) ดังนั้น แกน  $c$  หรือ semi-major axis จึงเปรียบเสมือนทิศแกนง่ายของวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (2.18) กับสมการ (2.28) สามารถแสดงค่าคงที่แอนไอโซโทรปีรูปร่าง ได้ดังสมการ

$$K_s = \frac{1}{2}(N_a - N_c)M^2 \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.29) เมื่อความยาวของแกน  $c$  มีค่าเท่ากับความยาวแกน  $a$  กล่าวคือ วัสดุจะมีรูปร่างเปลี่ยนจาก prolate spheroid ไปเป็นทรงกลมรัศมี  $a$  ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์หักล้าง  $N_c = N_a$  ส่งผลให้วัสดุที่มีรูปร่างทรงกลมไม่มีผลของแอนไอโซโทรปีรูปร่าง

การพิจารณาค่าสนามหักล้างหรือสนามคู่ขั้วในรูปแบบจำลอง สามารถคำนวณได้โดยใช้เทคนิคของ Boerner และคณะ [10] โดยเริ่มจากการแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกเป็นชิ้นเล็กๆ ที่เรียกว่า supercell โดยโมเมนต์แม่เหล็กจะถูกคำนวณโดยการรวมสปินทั้งหมดในแต่ละ supercell โดยโมเมนต์แม่เหล็กดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณค่าสนามหักล้างระหว่าง supercell ในวัสดุ ตามความสัมพันธ์ดังสมการ [11]

$$\bar{H}_{dip} = \sum_{i \neq j} \left[ \frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij}}{|\hat{r}_{ij}|^5} - \frac{\hat{\mu}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\hat{\mu}_j$  คือโมเมนต์แม่เหล็กของ supercell ที่ตำแหน่ง  $j$

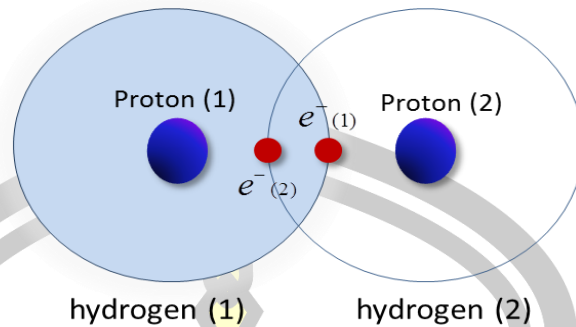
$\hat{r}_{ij}$  คือเวกเตอร์ของระยะห่างระหว่าง supercell ที่ตำแหน่ง  $i$  และ  $j$

$|\hat{r}_{ij}|$  คือขนาดของเวกเตอร์ระยะห่างระหว่าง supercell ที่ตำแหน่ง  $i$  และ  $j$

### 2.3.2 พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน

ในทฤษฎีสนามโมเลกุลของ Weiss ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกมีความสัมพันธ์กับค่าสนามสมมติหรือที่เรียกว่า สนามโมเลกุล แต่ไม่ได้กล่าวถึงที่มาของสนามดังกล่าว จนกระทั่งในปี 1928 ไฮเซนเบิร์กได้อธิบายถึงต้นกำเนิดของสนามโมเลกุลโดยใช้ทฤษฎีทางกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งกล่าวว่าสนามโมเลกุลเกิดจากแรงแลกเปลี่ยน (exchange force) การอธิบายของไฮเซนเบิร์กสามารถพิจารณาได้จากอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอมที่อยู่ใกล้กันจนเกิดโมเลกุลของอะตอมไฮโดรเจนที่เถียร ดังภาพประกอบ 2.18





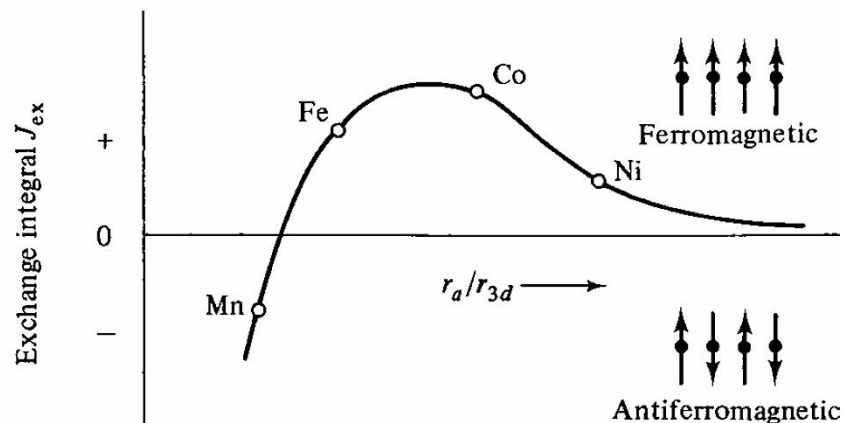
ภาพประกอบ 2.18 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างอิเล็กตรอนของโมเลกุลไฮโดรเจน [8]

ในอะตอมของไฮโดรเจนแต่ละตัวประกอบไปด้วย โปรตอนและอิเล็กตรอน เมื่ออะตอมทั้งสองอยู่ใกล้กันมากพอ โดยอนุภาคที่มีประจุเหมือนกันจะเกิดแรงผลักร และอนุภาคที่มีประจุแตกต่างกันจะเกิดแรงดึงดูด ซึ่งเรียกรวมกันว่า แรงคูลอมบ์ (coulomb force) นอกจากนี้ยังมีอีกแรงซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอน ถ้าสปินมีการจัดเรียงในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งจะทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนที่มีความเสถียร แต่ถ้าสปินมีการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันจะทำให้เกิดแรงผลักร แรงแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นไปตามกฎการกีดกันของเพาลี เมื่ออะตอมไฮโดรเจนทั้งสองรวมกันเป็นโมเลกุล อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสของแต่ละอะตอมมีโอกาสที่จะสลับตำแหน่งกัน ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาปริมาณพลังงานแลกเปลี่ยนเข้าไปในพลังงานรวมของระบบ โดยไฮเซนเบิร์กได้เสนอรูปแบบของพลังงานแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน 2 ตัว คือ  $i$  และ  $j$  ซึ่งมีโมเมนต์เชิงมุมเป็น  $S_i\hbar$  และ  $S_j\hbar$  ได้ดังสมการ [8]

$$E_{ex} = -2J_{ex} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j = -2J_{ex} |S_i| |S_j| \cos \theta \quad (2.31)$$

เมื่อ  $J_{ex}$  คือปริพันธ์การแลกเปลี่ยนปฏิสัมพันธ์ระหว่างสปินตัวที่  $i$  และ  $j$  และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่างสปินตัวที่  $i$  และ  $j$

พลังงานแลกเปลี่ยนเป็นจุดกำเนิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยพบว่าปริพันธ์การแลกเปลี่ยนของวัสดุทั้งสองสามารถมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกราฟของ Bethe-Slater ในภาพประกอบ 2.19



ภาพประกอบ 2.19 กราฟ Bethe-Slater curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง exchange integral กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างอะตอมกับรัศมีวงโคจรของระดับชั้นพลังงาน 3d [8]

จากภาพประกอบ 2.18 สำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก พบว่าปริพันธ์การแลกเปลี่ยนปฏิสัมพันธ์มีค่าเป็นบวก เมื่อพิจารณาค่าพลังงานแลกเปลี่ยนในสมการ (2.31) โดยพบว่าการจัดเรียงทิศทางของสปินมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ  $\cos\theta=1$  หรือ  $\theta=0$  จึงจะทำให้พลังงานแลกเปลี่ยนมีค่าต่ำสุด สำหรับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก พบว่าปริพันธ์การแลกเปลี่ยนปฏิสัมพันธ์ของวัสดุจะมีค่าเป็นลบ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาพลังงานแลกเปลี่ยนในสมการ (2.31) พบว่าพลังงานแลกเปลี่ยนจะมีค่าต่ำสุดเมื่อสปินในวัสดุมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ  $\cos\theta=-1$  หรือ  $\theta=\pi$

### 2.3.3 พลังงานความร้อน

พลังงานความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนส่งผลต่อทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุ เช่น สำหรับวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกผลของความร้อนจะส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเป็นแบบสุ่ม และสำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกแล้ววัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อผลของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุทั้งสองเปลี่ยนสภาพไปเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก กล่าวคือแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม จากผลของพลังงานความร้อนส่งผลให้มีความน่าจะเป็นที่ความร้อนจะสามารถเอาชนะผลของพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันจากกฎของอาร์เร็นเนียสและนีลส์ (Arrhenius-Neel law) [12] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

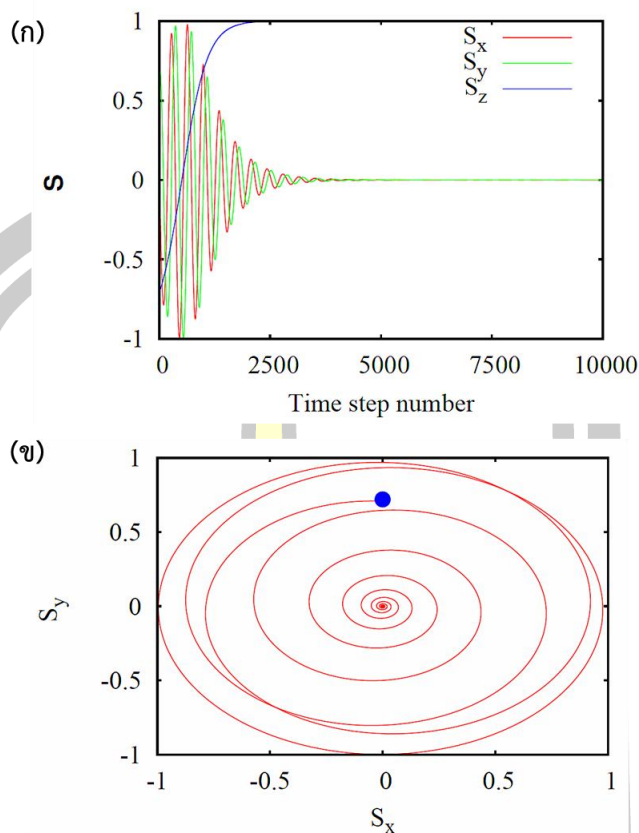
$$\tau^{-1} = f_0 \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right] \quad (2.32)$$

เมื่อ  $f_0$  คือค่าคงที่ของความถี่ (frequency factor) ของการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งมีค่าประมาณ  $10^9 \text{ s}^{-1}$  จากสมการ (2.32) พบว่า ระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กกับพลังงานเนื่องจากความร้อน ซึ่งสมการดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนในหัวข้อข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กสำหรับการคำนวณในรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้วิธีการทางสถิติเข้ามาช่วย เนื่องจากผลของความร้อนหรืออุณหภูมิต่างกันไม่สามารถอธิบายด้วยรูปแบบหรือสมการที่แน่นอน ในการพิจารณาผลของความร้อนอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าผลของอุณหภูมิต่างกันสามารถแสดงได้ด้วยสนามแบบสุ่มซึ่งมีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน โดยสนามที่เกิดจากการผันผวนทางความร้อนสามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการ [13,14]

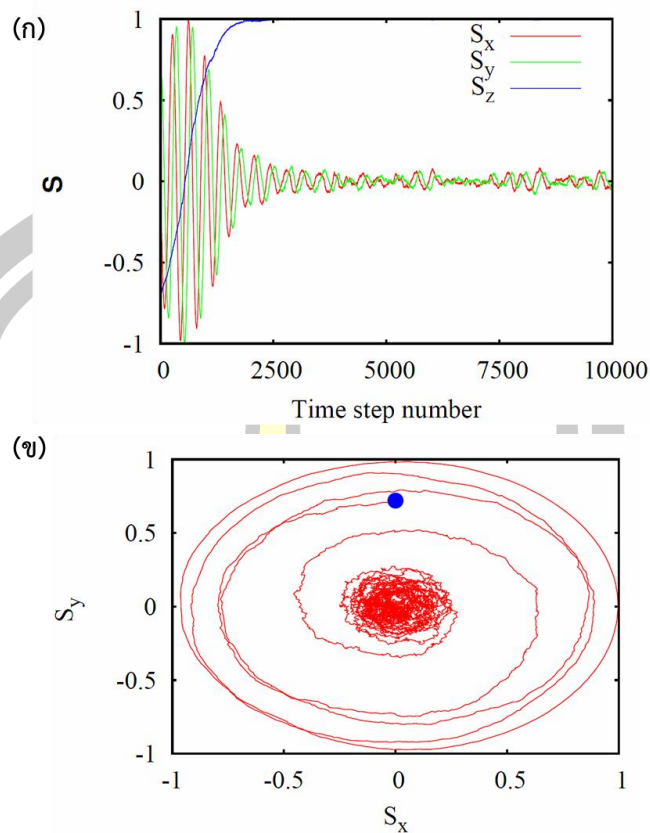
$$H_{th}^i(t) = \Gamma(t) \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\Gamma(t)$  คือฟังก์ชันที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน  $\alpha$  คือค่าคงที่ความหน่วงซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเร็วในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบ  $k_B$  คือค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (Boltzmann constant)  $T$  คืออุณหภูมิของระบบมีหน่วยเป็นเคลวิน  $\gamma$  คืออัตราส่วนไจโร (gyromagnetic constant) และ  $\mu_s$  คือขนาดของสปินโมเมนต์ ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันหรือสปินในระบบเนื่องจากผลของความร้อนสามารถพิจารณาได้จากสมการ LLG โดยการรวมผลของสนามเนื่องจากความร้อนจากสมการ (2.33) ในเทอมของสนามประสิทธิผล เพื่อความสะดวกในการศึกษาผลของความร้อนสำหรับการคำนวณด้วยแบบจำลองทางแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวเนื่องจากจะไม่มีผลของอันตรกิริยาระหว่างสปินอื่นๆ โดยสปินเริ่มต้นวางตัวอยู่ในทิศ  $(0, 0.707, -0.707)$  จากนั้นให้สนามประสิทธิผลกระทำต่อสปินในทิศแกน  $z$  ซึ่งสามารถแสดงผลจากการคำนวณได้ดังต่อไปนี้



**ภาพประกอบ 2.20** ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวในกรณีที่ไม่พิจารณาผลของความร้อน (ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ที่ช่วงเวลาใดๆ (ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เมื่อมองจากด้านบนหรือแนวแกน  $z$  [15]

ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทิศทางของสปินในระบบจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามประสิทธิผล โดยทิศทางของสปินเริ่มต้นจะถูกเหนี่ยวนำให้มีการจัดเรียงทิศทางตามทิศทางของสนามประสิทธิผลตามแนวแกน  $z$  ซึ่งส่งผลให้ทิศทางของสปินในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เกิดการกวัดแกว่งและเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลหรือเข้าสู่ทิศของสนามประสิทธิผลเมื่อเวลาผ่านไป ดังภาพประกอบ 2.20 (ก) การกวัดแกว่งของทิศทางสปินในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุนวนเข้าสู่สนามประสิทธิผล ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ในภาพประกอบ 2.20 (ข) แต่เมื่อมีการพิจารณาผลของอุณหภูมิโดยกำหนดให้อุณหภูมิของระบบมีค่าเป็น 0.01 เคลวิน พบว่าอุณหภูมิส่งผลให้การกวัดแกว่งของสปินเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการเคลื่อนที่ของสปินเข้าสู่สมดุลจำเป็นต้องใช้เวลานานขึ้น ดังภาพประกอบ 2.21 (ก) เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสปินในแนวแกน  $x$  และ  $y$  พบว่าผลของความร้อนจะทำให้เกิดการกวัดแกว่งของทิศทางของสปินระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนวนเข้าสู่สนามประสิทธิผล ดังภาพประกอบ 2.21 (ข)



**ภาพประกอบ 2.21** ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของสปินเดี่ยวในกรณีที่พิจารณาผลของความร้อน (ก) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ที่ช่วงเวลาใดๆ (ข) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสปินในแนวแกน  $x$  และ  $y$  เมื่อมองจากด้านบนหรือแนวแกน  $z$  [15]

### 2.3.4 พลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก

พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กหรือพลังงานอุปสรรค (energy barrier) เป็นปริมาณพลังงานที่พยายามรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไม่ให้เปลี่ยนแปลงตามปัจจัยภายในและภายนอก เช่น สนามแม่เหล็กภายนอก สนามหักล้าง พลังงานความร้อน เป็นต้น ดังนั้น เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้พลังงานที่มีค่ามากพอที่จะเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในระบบที่พิจารณา มีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยวซึ่งแมกนีไทเซชันภายในวัสดุมีการจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกัน พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กเกิดจากผลต่างระหว่างค่าพลังงานสูงสุดและค่าพลังงานต่ำสุดของพลังงานรวมในระบบซึ่งประกอบไปด้วยพลังงาน 2 ส่วน คือ พลังงานแอนไอโซโทรปีและพลังงานจากภายนอก (Zeeman energy) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_{total} = E_a + E_p \quad (2.34)$$

เมื่อ  $E_{total}$  คือพลังงานรวมของระบบ  $E_a$  เป็นพลังงานแอนไอโซโทรปี และ  $E_p$  เป็นพลังงานภายนอกซึ่งในกรณีนี้ได้พิจารณาเฉพาะสนามแม่เหล็กภายนอก (applied field) จากสมการ (2.34) เมื่อแทนค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีและพลังงานภายนอกซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่ายของวัสดุ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$E_{total} = KV \sin^2 \theta - M_s VH \cos \theta \quad (2.35)$$

เมื่อ  $K$  คือค่าแอนไอโซโทรปี  $V$  คือปริมาตรของเกรนแต่ละเกรนภายในวัสดุแม่เหล็ก และ  $\theta$  คือมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่าย จากสมการ (2.35) สามารถคำนวณค่าพลังงานสูงสุดและต่ำสุดได้จากการหาจุดที่อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมต่อมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่ายมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการ

$$\frac{dE_{total}}{d\theta} = 2KV \sin \theta \cos \theta + M_s VH \sin \theta = 0 \quad (2.36)$$

เมื่อพิจารณา (2.36) พบว่า สมการจะเป็นจริงเมื่อค่า  $\sin \theta = 0$  กล่าวคือ  $\theta = 0$  และ  $\theta = 180^\circ$  และเมื่อ  $\cos \theta = -HM_s / 2K$  ดังนั้น จากสมการ (2.35) สามารถเขียนพลังงานรวมของระบบต่ำสุดและสูงสุดได้ดังสมการ

$$E_{min} = M_s VH \quad \text{และ} \quad E_{max} = KV \sin^2 \theta - VHM_s \left[ -\frac{HM_s}{2K} \right] \quad (2.37)$$

จากสมการ (2.37) เทอมของพลังงานรวมสูงสุดสามารถจัดรูปใหม่ได้โดยใช้เอกลักษณ์ตรีโกณ  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$  ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E_{max} &= KV(1 - \cos^2 \theta) - VHM_s \left[ -\frac{HM_s}{2K} \right] \\ &= KV \left[ 1 - \left( \frac{HM_s}{2K} \right)^2 + 2 \left( \frac{HM_s}{2K} \right)^2 \right] \\ &= KV \left[ 1 + \left( \frac{HM_s}{2K} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.38)$$

จากนิยามของพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพลังงานรวมสูงสุดและพลังงานรวมต่ำสุด กล่าวคือ  $\Delta E = E_{max} - E_{min}$  ดังนั้น ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta E = KV \left[ 1 + \left( \frac{HM_s}{2K} \right)^2 \right] - M_s VH$$

$$\begin{aligned}
 &= KV \left[ 1 - 2 \left( \frac{HM_s}{2K} \right) + \left( \frac{HM_s}{2K} \right)^2 \right] \\
 &= KV \left( 1 - \frac{HM_s}{2K} \right)^2
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

จากสมการ (2.39) สามารถเขียนค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กใหม่ได้เป็น

$$\Delta E = KV \left( 1 - \frac{H}{H_K} \right)^2 \tag{2.40}$$

เมื่อ  $H_K = 2K / M_s$  คือค่าสนามแอนไอโซโทรปีภายในวัสดุแม่เหล็ก จากสมการ (2.40) พบว่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กจะมีค่าต่ำสุดเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเท่ากับค่าสนามแอนไอโซโทรปีของวัสดุ กล่าวคือ  $H = H_K$  ดังนั้น เมื่อต้องการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของวัสดุตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ปริมาณของสนามแม่เหล็กภายนอกต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับปริมาณสนามแอนไอโซโทรปีของวัสดุ นอกจากนั้น พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กยังมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แอนไอโซโทรปีและปริมาตรของเกรนแต่ละเกรนในวัสดุแม่เหล็ก แต่เนื่องจากปริมาตรของเกรนในวัสดุมีการกระจายตัว กล่าวคือ เกรนในวัสดุมีขนาดที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กเกิดขึ้น [5]

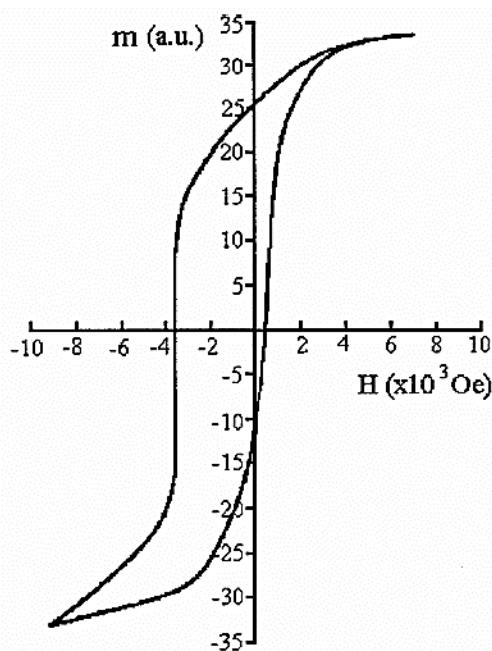
## 2.4 ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นปรากฏการณ์สำคัญอย่างมากในการพัฒนาประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนถูกนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งมีส่วนช่วยในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินเพื่อใช้เป็นชั้นอ้างอิงในการอ่านข้อมูลโดยในการนำปรากฏการณ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานและปัจจัยที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) หรือ แอนไอโซโทรปีแลกเปลี่ยน (exchange anisotropy) เป็นแมกเนติกแอนไอโซโทรปีชนิดใหม่ซึ่งถูกค้นพบในปี 1956 โดยไมเคิลจอร์นและป็น [1] ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กในระบอบจุลภาค โดยโครงสร้างที่ศึกษาประกอบไปด้วยแกนภายในที่ทำจากโคบอลต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและเปลือกหุ้มที่ทำจากโคบอลต์ออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

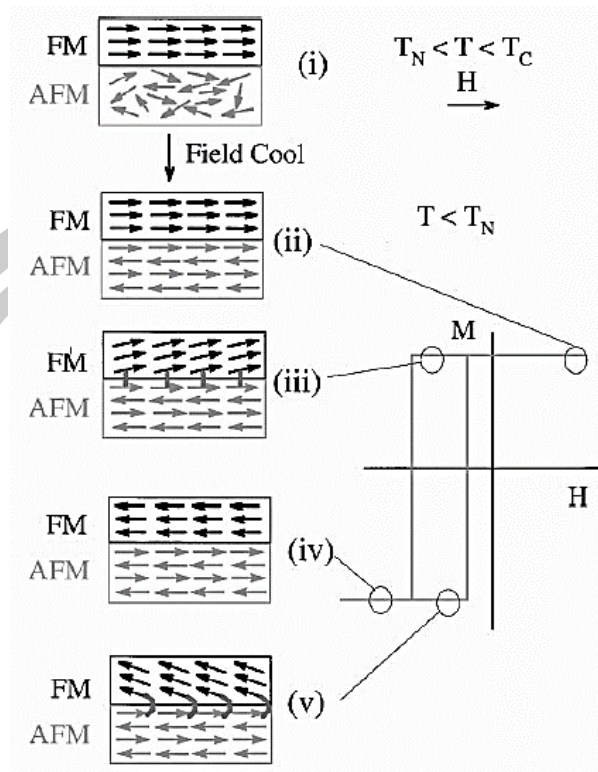
ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะที่อุณหภูมิมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของนิก โดยแรงทอร์กแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นวัสดุทั้งสองที่บริเวณรอยต่อมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน เมื่อทำการวัดเส้นโค้งแมกนีไทเซชันของวัสดุพบว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลต่อการเลื่อนของฮิสเทอรีซิสลูปออกจากแกนสมมาตร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.22



ภาพประกอบ 2.22 ลักษณะวงปิดฮิสเทอรีซิสของชั้นวัสดุ Co เชื่อมต่อกับชั้นวัสดุ CoO ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน [1]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมีผลทำให้การกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกทำได้ยากขึ้น เนื่องจากผลของอันตรกิริยาที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุทั้งสองซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าสนามแลกเปลี่ยนและค่าสนามเคอร์เออซีวิตี ในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน การนำเอาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถทำให้ระบบสามารถแสดงปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทางความร้อนและการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาช่วย เพื่อให้ง่ายในการอธิบายกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจึงมีการพิจารณาระบบในระดับมหภาค ดังแสดงในภาพประกอบ 2.23





ภาพประกอบ 2.23 แผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลูปวงปิดในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในช่วงต่างๆ [4]

ในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเริ่มจากการนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกโดยมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกและมีการกำหนดอุณหภูมิของระบบมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของนิกลแต่มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของคูรี กล่าวคือ  $T_N < T < T_C$  ดังแสดงในภาพประกอบ 2.23 (i) สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกแมกนีไทเซชันภายในวัสดุจะมีการจัดเรียงตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก แต่สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะเปลี่ยนไปเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติกโดยโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุจะมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มเนื่องจากอุณหภูมิของระบบมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของนิกลส่งผลให้ระบบไม่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ เมื่อทำการวัดลูปวงปิดในกรณีนี้จะทำให้ได้ลูปวงปิดที่มีความสมมาตรเนื่องจากอำนาจทางแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเฉพาะส่วนของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก จากนั้นเมื่อทำการลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของนิกลและคูรี กล่าวคือ  $T < T_N < T_C$  พบว่าโมเมนต์แม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจากที่เคยมีการจัดเรียงทิศทางแบบสุ่มได้มีการจัดเรียงทิศทางใหม่ โดยโมเมนต์แม่เหล็กในแลตทิซย่อยของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่บริเวณรอยต่อจะมีการจัดเรียงทิศทางตามทิศของโมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน โดยโมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะออก

แรงทอร์กบังคับให้แมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรมีการจัดเรียงในทิศเดียวกันและเมื่อทำการวัดลูปวงปิดในกรณีดังกล่าวสามารถแสดงลักษณะการเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันได้ดังภาพประกอบ 2.23 (ii) จากนั้นเมื่อนำสนามแม่เหล็กจากภายนอกออกและให้สนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กเริ่มต้น พบว่าแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะยังไม่จัดเรียงตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากเกิดการลอคทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุดังภาพประกอบ 2.23 (iii) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมากพอจนสามารถเอาชนะผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อส่งผลให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะจัดเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกดังภาพประกอบ 2.23 (iv) จากนั้นเมื่อทำการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศทางตรงกันข้าม พบว่าแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสามารถผันกลับทิศทางได้อย่างง่ายอันเป็นผลมาจากแรงทอร์กจากชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรซึ่งพยายามเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันของชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกให้มีการจัดเรียงในทิศขนานกับแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังภาพประกอบ 2.23 (v) โดยทั่วไปความแรงของการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนสามารถพิจารณาได้จากปริมาณของค่าสนามแลกเปลี่ยน (exchange bias field;  $H_{EB}$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$H_{EB} = \frac{H^+ + H^-}{2} \quad (2.41)$$

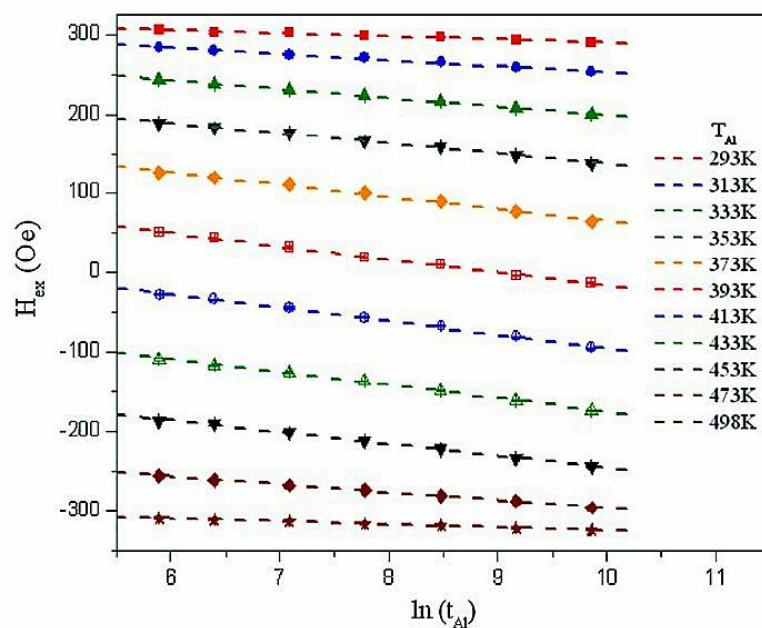
เมื่อ  $H^+$  และ  $H^-$  เป็นปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้วัสดุไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กในทิศแกนบวกและในทิศแกนลบของลูปวงปิด ตามลำดับ นอกจากนั้นการเลื่อนของลูปวงปิดยังส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสนามเคอร์เออซีวิตี (coercivity field;  $H_C$ ) ซึ่งเป็นปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ทำให้สภาพแม่เหล็กของวัสดุถูกทำลาย กล่าวคือ  $M=0$

#### 2.4.2 กระบวนการ setting process

ในการนำปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนไปประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากการทำให้อุณหภูมิของระบบมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของซิลจะทำให้โครงสร้างของวัสดุถูกทำลายเนื่องจากผลของอุณหภูมิจะทำให้ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเกิดการหลอมรวมกันซึ่งส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้น สำหรับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้คือ IrMn ซึ่งอุณหภูมิของซิลมีค่าเท่ากับ 690 เคลวิน แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีการ

ค้นพบว่าอุณหภูมิของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของนิลประมาณ 475 องศาเคลวิน สามารถทำให้เกิดการลอคทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุทั้งสอง ด้วยกระบวนการ setting process ที่อาศัยการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation) ซึ่งถูกอธิบายโดย Fulcomer และ Charap [14]

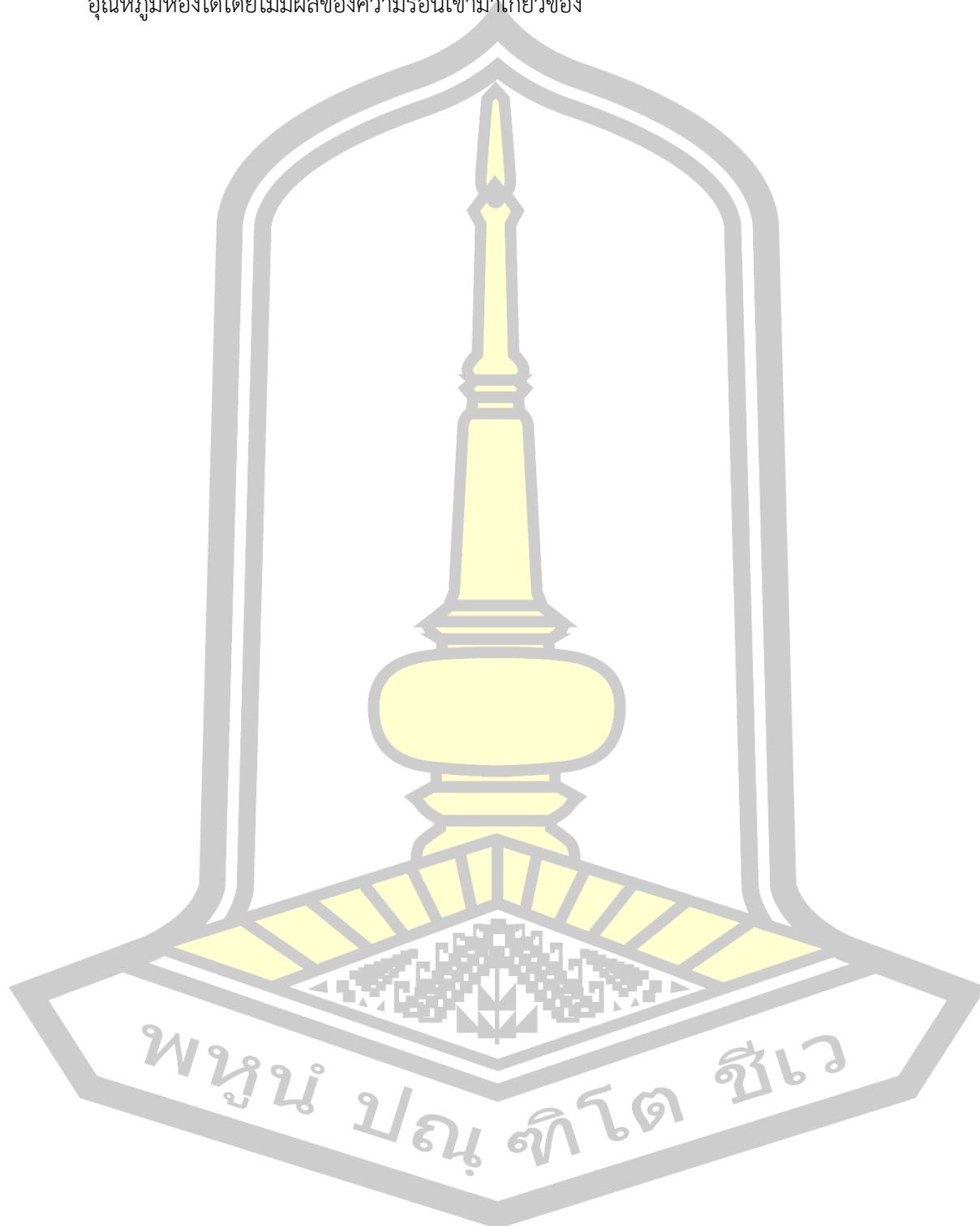
กระบวนการ setting process เริ่มต้นด้วยการให้อุณหภูมิแก่ชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่เชื่อมต่อกับชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจนถึงอุณหภูมิ  $T_{set}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถเซตชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่บริเวณรอยต่อได้พร้อมทั้งให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกในทิศแกนลบ ( $H_{set}$ ) ซึ่งมีปริมาณที่มากพอที่จะทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรเข้าสู่จุดอิมิตัวในทิศแกนลบและจากนั้นปล่อยระบบทิ้งไว้เป็นเวลา 90 นาที ( $t_{set}$ ) เมื่อทำการวัดค่าสนามแลกเปลี่ยน ( $H_{ex}$ ) กับ  $\ln(t_{set})$  สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแลกเปลี่ยนที่ช่วงเวลา  $\ln(t_{set})$  ใดๆ ได้ดังภาพประกอบ 2.24



ภาพประกอบ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสนามแลกเปลี่ยนที่ขึ้นกับเวลา  $\ln(t_{set})$  [16]

จากภาพประกอบ 2.24 พบว่าในกรณีดังกล่าวได้กำหนดให้  $T_{set} = 498 K$  ซึ่งได้อ้างอิงผลการคำนวณจากงานวิจัยของเคลวินและคณะ [16] โดยจากผลการคำนวณพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแลกเปลี่ยนมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นและมากไปกว่านั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแลกเปลี่ยนที่ช่วงเวลา  $\ln(t_{set})$  ใดๆ มีค่าน้อยมาก ( $<1\%$ ) จากกระบวนการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการวัดค่าสนามแลกเปลี่ยนที่อุณหภูมิใดๆ หลังจากทำกระบวนการ setting process จะมีค่า

เปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยอาศัยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้สามารถสามารถวัดฮีสเทอริซิสม์ที่  
อุณหภูมิห้องได้โดยไม่มีผลของความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมหรือคุณสมบัติทางวัสดุแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสามารถทำได้โดยอาศัยแบบจำลองทางแม่เหล็กในระดับจุลภาคแบบมาตรฐาน (standard micromagnetic model) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็ก การศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กแต่ละชั้นจะใช้วิธีการที่แตกต่างกันในการพิจารณา เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของวัสดุแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่ถูกใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยในการอธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสามารถอธิบายได้ด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo method) และการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของแลนดาวน์-ลิฟต์ซิทซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert; LLG) ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันโตโดยเริ่มจากวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการแลนดาวน์-ลิฟต์ซิทซ์-กิลเบิร์ต ในลำดับสุดท้ายจะแสดงผลการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเบื้องต้นเนื่องจากผลกระทบของโครงสร้างของเกรนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การศึกษาพลวัตของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเกิดจากการนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่แตกต่างกันของชั้นวัสดุทั้งสอง สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเป็นชั้นที่ง่ายต่อการเหนี่ยวนำหรือเรียกว่า วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic materials) และสำหรับชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นชั้นวัสดุที่ยากต่อการเหนี่ยวนำซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาที่นานในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของวัสดุประเภทนี้ซึ่งส่งผลให้วิธีการที่ใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์มีความแตกต่างกัน สำหรับวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์[17] เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบแข็งและมีค่าแอนไอโซโทรปีสูงซึ่งทำให้เหนี่ยวนำทิศทางได้ยาก โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันในแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นผลมาจากการกระตุ้นทางความร้อน (activation thermal) ซึ่งส่งผลให้มี

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากปริมาณความร้อนที่สามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กได้ การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันด้วยการกระตุ้นทางความร้อนสามารถอธิบายได้ตามกฎของอาเรเนียส-นีล (Arrhenius-Neel law) [17] แสดงดังตามสมการ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp(-\Delta E / k_B T) \quad (3.1)$$

โดยที่  $\tau^{-1} = \tau_{12}^{-1} + \tau_{21}^{-1}$  คือระยะเวลาคลายตัวรวม (total relaxation time) ซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุด (two minima energy state)  $f_0$  คือแฟกเตอร์ความถี่ของการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของโมเมนต์แม่เหล็ก (attempt frequency)  $\Delta E$  คือปริมาณพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก  $k_B$  คือค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (Boltzmann constant) และ  $T$  คืออุณหภูมิของระบบมีหน่วยเป็นเคลวิน ในการคำนวณค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างผลรวมของพลังงานในระบบสูงสุดและผลรวมของพลังงานในระบบต่ำสุดซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามสมการ [18]

$$E = \left( \frac{KV}{k_B T} \right) \sin^2 \theta - \left( \frac{M_S V H_T}{k_B T} \right) \cos(\theta - \theta_H) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $K$  คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปี  $V$  คือปริมาตรเกรนของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร  $M_S$  คือปริมาณแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization)  $H_T$  คือสนามเฉพาะบริเวณรวม (total local field)  $\theta$  แทนมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับ total local field และ  $\theta_H$  แทนมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่าย โดยค่าสนามเฉพาะบริเวณรวมเกิดจากผลรวมของสนามดังสมการ

$$\vec{H}_T = \vec{H}_{anis} + \vec{H}_{th} + \vec{H}_{ex}^{AF} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\vec{H}_{anis}$  คือสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field)  $\vec{H}_{th}$  คือสนามเนื่องจากความร้อน (thermal field) และ  $\vec{H}_{ex}^{AF}$  คือสนามแลกเปลี่ยนเนื่องจากชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่กระทำต่อเกรนแต่ละเกรนในระบบซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{ex}^{AF} = z H_{ex}^{int} \frac{A_i}{A_j} \hat{m}_{FM} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $z = t_{AF} / t_{FM}$  โดยที่  $t_{AF}$  และ  $t_{FM}$  คือความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกตามลำดับ และ  $\hat{m}_{FM}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กในเกรน FM สำหรับการพิจารณาพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีทิศแกนง่ายทำมุมกับทิศของสนามเฉพาะบริเวณ พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงซึ่งจำเป็นต้องใช้

วิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยในการประมาณค่า ซึ่งค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก ในกรณีที่มีมุม  $\theta_H$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์สามารถประมาณได้ตามสมการ [19]

$$\Delta E(H_T, \psi) = KV \left[ 1 - |H_T| / g(\psi) \right]^{\kappa(\psi)} \quad (3.5)$$

โดยที่  $g(\psi) = [\cos^{2/3}(\psi) + \sin^{2/3}(\psi)]^{-3/2}$  และ  $\kappa(\psi) = 0.86 + 1.14g(\psi)$  เมื่อ  $\psi$  คือมุมที่แสดงทิศทางแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่มีทิศทางตามทิศทางของสนามแม่เหล็กเฉพาะบริเวณ จากค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กจากสมการ (3.5) สามารถนำไปพิจารณาความน่าจะเป็นในการผันกลับทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันในแต่ละเกรนได้ตามสมการ [20]

$$P_t = \frac{(1 - e^{-t_m/\tau})}{(1 + e^{-\Delta E/k_B T})} \quad (3.6)$$

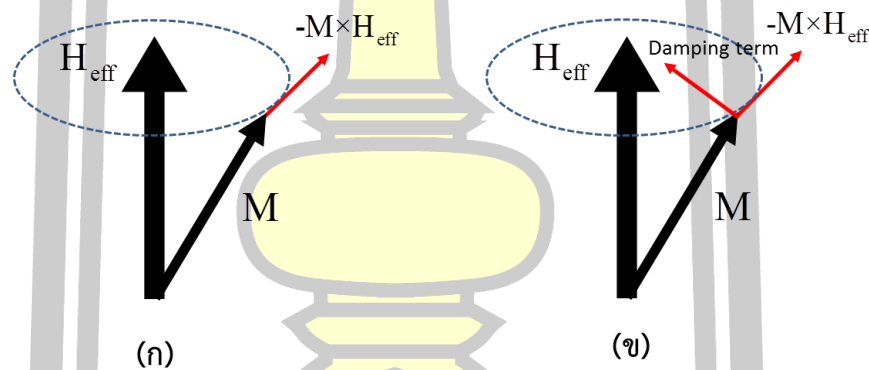
เมื่อ  $t_m$  คือระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลง (measuring time) ความน่าจะเป็นจากสมการ (3.6) สามารถคำนวณได้จากการแทนความสัมพันธ์จากสมการ (3.9) และ (3.13) ตามลำดับ การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือการเปลี่ยนแปลงสถานะสามารถพิจารณาได้จากการนำค่าความน่าจะเป็น  $P_t$  ไปเปรียบเทียบกับตัวเลขสุ่ม  $x$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยในกรณีที่  $P_t > x$  การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันไปยังสถานะใหม่จะถูกยอมรับด้วยความน่าจะเป็น  $P_t$  แต่เมื่อ  $P_t < x$  การเปลี่ยนแปลงสถานะจะไม่ถูกยอมรับ โดยเกรนจะสร้างทิศทางของแมกนีไทเซชันใหม่และนำไปคำนวณความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะจนกระทั่งเกรนทั้งหมดในระบบเกิดการเปลี่ยนสถานะ

### 3.2 การศึกษาพลวัตของวัสดุแม่เหล็กด้วยสมการ LLG

สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเป็นชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กแบบอ่อนซึ่งเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการเหนี่ยวนำทิศทาง สำหรับวิธีการที่ใช้อธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่เหมาะสมคือ สมการแลนดาวน์ ลิฟต์ชิตซ์ กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert; LLG) ซึ่งได้อธิบายถึงพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุเนื่องจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field) ที่ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในระบบแสดงถึงความสัมพันธ์ตามสมการ [21]

$$\frac{\partial \hat{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} \hat{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)} \left[ \hat{M} \times (\hat{M} \times \vec{H}_{eff}) \right] \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (absolute gyromagnetic ratio)  $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant)  $\hat{M}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โร และ  $\vec{H}_{eff}$  คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field) จากสมการ (3.7) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่สองลักษณะ โดยในทอมแรกได้แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (precessional motion) ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 (ก) และในทอมที่สองแสดงถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหน่วง (damping motion) เข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล เนื่องจากเกิดแรงทอร์กมากระทำกับแมกนีไทเซชันในทิศตั้งฉากกับสนามประสิทธิผล ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 (ข) การเคลื่อนที่แบบหน่วงเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ความหน่วงซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษาระบบที่สภาวะสมดุลควรกำหนดให้ค่าคงที่ความหน่วงมีค่าที่สูงเพื่อลดระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลของระบบ โดยค่าคงที่ความหน่วงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



ภาพประกอบ 3.1 (ก) การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (ข) การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหน่วงเข้าสู่สนามประสิทธิผล [15]

ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกในโครงสร้างแบบสองชั้นสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.7) เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลซึ่งเป็นผลรวมของสนามทั้งหมดที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการ

$$\vec{H}_{eff} = \vec{H}_{ex} + \vec{H}_{anis} + \vec{H}_{dip} + \vec{H}_{ex}^{FM} + \vec{H}_{th} + \vec{H}_{app} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\vec{H}_{ex}$  คือสนามแลกเปลี่ยน (exchange field) ระหว่างสปินภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก  $\vec{H}_{anis}$  คือสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field)  $\vec{H}_{dip}$  คือสนามแม่เหล็กคู่ขั้ว (dipolar



field) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ  $\vec{H}_{ex}^{FM}$  คือสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (exchange interlayer field)  $\vec{H}_{app}$  คือสนามแม่เหล็กจากภายนอก (applied field) และ  $\vec{H}_{th}$  คือสนามเนื่องจากความร้อนหรืออุณหภูมิ (thermal field) สมการ (3.8) แสดงค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดจากผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ส่งผลต่อพลวัตแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุซึ่งรายละเอียดของสนามดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากปริมาณสนามแลกเปลี่ยนภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินภายในวัสดุ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ [22]

$$\vec{H}_{ex}^i = H_{exch} \sum_j \left( \frac{L_{ij}}{L_m} \right) \left( \frac{A_m}{A_j} \right) \hat{m}_j \quad (3.9)$$

โดยที่  $H_{exch} = J_m L_m / a^2 M_s A_m$  เมื่อ  $J_m$  คือการแลกเปลี่ยนระหว่างเกรน  $i$  และเกรน  $j$   $L_m$  คือค่าเฉลี่ยระยะเชื่อมตติระหว่างเกรน  $L_{ij}$  คือระยะการเชื่อมตติระหว่างเกรน  $i$  และเกรน  $j$   $A_m$  คือค่าเฉลี่ยพื้นที่พื้นผิวของเกรน  $a$  คือค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) และ  $M_s$  คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) และ  $\hat{m}_j$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้เคียงเกรน  $j$  สำหรับปริมาณสนามแอนไอโซโทรปีมีความสัมพันธ์กับการที่สปินภายในวัสดุพยายามจัดเรียงทิศทางให้อยู่ในทิศแกนง่าย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังสมการ

$$H_{anis} = \frac{2K(T)}{M(T)} (\hat{m} \cdot \hat{e}) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $K(T)$  คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีที่อุณหภูมิใดๆ (anisotropy constant)  $\hat{m}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันและ  $\hat{e}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศแกนง่าย (easy axis direction) สำหรับสนามแม่เหล็กคู่อั้วเป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแมกนีไทเซชันส่งผลให้วัสดุมีสภาพความเป็นแม่เหล็กลดลง ซึ่งในการคำนวณในรูปแบบจำลองจะทำการแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกเป็นชิ้นเล็กๆที่เรียกว่า supercell โดยค่าสนามดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$H_{DA}^{i-grain} = \frac{1}{N} \sum_{i-cube}^N H_{dip}^{i-cube} \quad (3.11)$$

โดยที่  $H_{dip}^{i-cube} = \sum_j M_s^j V_j [3(\hat{m}_j \cdot \hat{r}_{ij}) \hat{r}_{ij} - \hat{m}_j] V_j$  คือปริมาตรของ supercell ที่ตำแหน่ง  $j$   $\hat{r}_{ij}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระยะห่างระหว่าง supercell ที่ตำแหน่ง  $i$  และตำแหน่ง  $j$  สำหรับสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเกิดขึ้น

เนื่องจากการเชื่อมติดกันของวัสดุทั้งสองซึ่งจะเกิดสนามแลกเปลี่ยนกระทำต่อเกรนแต่ละเกรนในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งค่าสนามดังกล่าวสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\vec{H}_{ex}^{FM} = H_{ex}^{int} \frac{A_i}{A_j} \hat{m}_{AF} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $H_{ex}^{int}$  คือความแรงของสนามแลกเปลี่ยน  $A_i$  คือพื้นที่ของเกรนที่ถูกอ้างอิง  $A_j$  คือค่าเฉลี่ยของพื้นที่ของเกรนทั้งหมดในระบบ  $\hat{m}_{AF}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนในชั้น AF นอกจากนี้การคำนวณค่าสนามเนื่องจากความร้อนสามารถแสดงได้ในรูปของสนามแบบสุ่ม (random field) ที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ดังสมการ

$$H_{th}^i(t) = \Gamma(t) \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $\Gamma(t)$  คือฟังก์ชันที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน  $\alpha$  คือค่าคงที่ความหน่วงซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเร็วในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของระบบ  $k_B$  คือค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (Boltzmann constant)  $T$  คืออุณหภูมิของระบบมีหน่วยเป็นเคลวิน และสำหรับสนามแม่เหล็กจากภายนอกเกิดขึ้นจากการป้อนสนามแก่วัสดุแม่เหล็กซึ่งจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบกับสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อแทนค่าสนามทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นในสมการ (3.8) ดังนั้น สนามแม่เหล็กประสิทธิผลสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

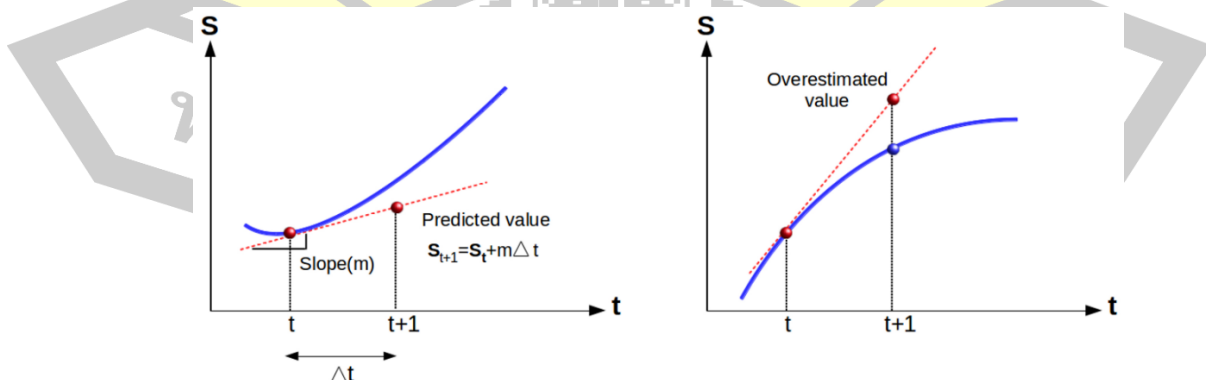
$$\begin{aligned} \vec{H}_{eff} = & \sum_{i \neq j} \frac{J_{ij} \mathbf{S}_j}{\mu_s} + \frac{2K_u}{\mu_s} (\hat{S}_i \cdot \hat{e}) \hat{e} + |\vec{\mu}_j| \sum_{i \neq j} \left[ \frac{3(\hat{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij}) \hat{r}_{ij} - \hat{\mu}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \\ & + H_{ex} \frac{A_i}{A_j} \hat{m}_{AF} + \Gamma(t) \sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}} + \vec{H}_{app} \end{aligned} \quad (3.14)$$

ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่เชื่อมติดกับชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลจากสมการ (3.8) ลงในสมการ (3.1) ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ไปใช้ในการอธิบายโครงสร้างของวัสดุสองชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

### 3.3 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาต่างๆ ที่ขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.7 จากสมการพบว่าแมกนีไทเซชันมีการเคลื่อนที่ แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อทำการประมาณค่าคำตอบ เนื่องจากการแก้สมการการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเพื่อหาผลเฉลยทั่วไปทำได้ยาก วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันมีหลายวิธี โดยในตอนเริ่มต้นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์ (Euler) ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าสมการการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน LLG โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่แต่ละช่วงเวลาสั้นๆ  $\Delta t$  และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเมื่อทำการคำนวณพบว่าค่าประมาณ (predicted point) ของทิศทางของแมกนีไทเซชันที่ได้จากวิธีออยเลอร์อาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงดังแสดงในภาพประกอบ 3.2 ดังนั้นช่วงเวลาที่ใช้ในการประมาณค่า  $\Delta t$  ต้องมีค่าน้อยลงเพื่อให้ค่าประมาณทิศทางของแมกนีไทเซชันมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าช่วงเวลาที่เลือกใช้จะมีค่าน้อยแต่ค่าความคลาดเคลื่อนจะสะสมเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบของการคำนวณ

จากภาพประกอบ 3.2 แสดงวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์ ซึ่งพบว่าวิธีนี้มีโอกาสที่จะประมาณค่าที่สูงหรือต่ำกว่าค่าจริง โดยค่าตำแหน่งใหม่ของสปิน ( $S_{t+1}$ ) จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งแมกนีไทเซชันที่เวลา  $t$  เนื่องจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์ จะกำหนดให้แมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งใหม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และกรณีที่กำหนดให้ช่วงเวลาในการคำนวณ ( $\Delta t$ ) มีค่ามากยิ่งขึ้นทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์เพื่อให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลงและสามารถพิจารณาที่ช่วงเวลาที่กว้างขึ้นได้เรียกวธีการนี้ว่า Heun scheme ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.2 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของออยเลอร์ (Euler's method) สามารถให้ค่าประมาณที่มีค่าสูง (ซ้าย) หรือต่ำกว่าค่าจริง (ขวา) [15]

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Heun scheme เป็นวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของแมกนีไทเซชันที่เวลาถัดไปโดยใช้ขั้นตอนการคำนวณด้วยอัลกอริทึมแบบคาดเดาและแก้ไขความถูกต้อง (predictor corrector algorithm) โดยเริ่มจากการประมาณค่าทิศทางใหม่ของแมกนีไทเซชันที่เวลา  $t + 1$  โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขออยเลอร์ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า predictor algorithm ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$M_{t+1,Euler} = M_t + \Delta t M'_t \quad (3.15)$$

โดยค่าอนุพันธ์ของแมกนีไทเซชันกรณีที่เกิดผลเฉพาะสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เวลาที่จุดเริ่มต้น  $t$  สามารถพิจารณาได้จากสมการ LLG ดังนี้

$$M'_t = \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{-\gamma}{1+\alpha^2} [M_t \times H_{eff} + \alpha M_t \times (M_t \times H_{eff})] \quad (3.16)$$

เมื่อได้แมกนีไทเซชันตำแหน่งใหม่ที่เวลา  $t+1$  ที่คำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขออยเลอร์ ( $M_{t+1,Euler}$ ) จากนั้นค่าอนุพันธ์หรือความชันของแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งใหม่นี้จะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการ LLG ดังนี้

$$M'_{t+1,Euler} = \frac{-\gamma}{(1+\alpha^2)} [M_{t+1,Euler} \times H_{eff}^{new} + \alpha M_{t+1,Euler} \times (M_{t+1,Euler} \times H_{eff}^{new})] \quad (3.17)$$

เมื่อ  $H_{eff}^{new} = \partial H / \partial M_{t+1,Euler}$  เป็นสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่ทำการคำนวณใหม่หลังจากขั้นตอน predictor algorithm เนื่องจากแมกนีไทเซชันมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางส่งผลให้ค่าของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลเปลี่ยนแปลงไป

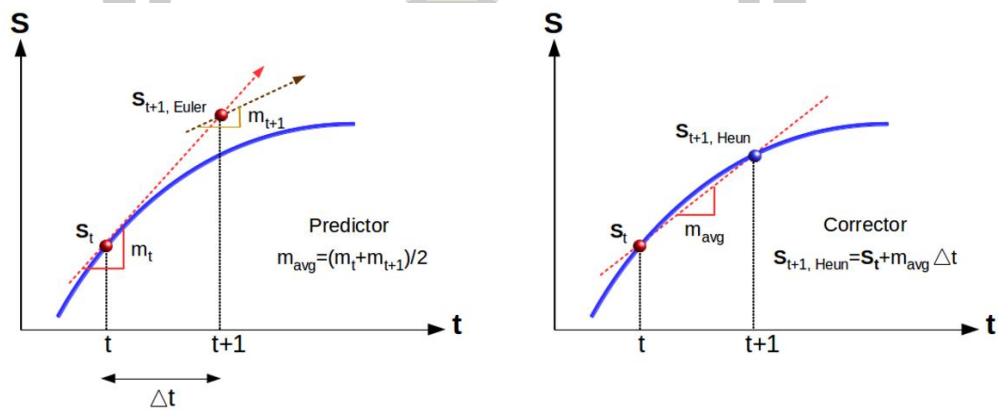
จากนั้นพิจารณาค่าอนุพันธ์เฉลี่ยที่ได้จากแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่ง  $M_t$  และ  $M_{t+1,Euler}$  เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขออยเลอร์จะได้ว่า

$$M'_{avg} = \frac{1}{2} [M'_t + M'_{t+1,Euler}] \quad (3.18)$$

ขั้นตอนสุดท้ายคือการหาค่าตำแหน่งของแมกนีไทเซชันที่เวลา  $t+1$  เรียกว่า corrector algorithm โดยการหาค่าอนุพันธ์หรือความชันเฉลี่ยในสมการที่ (3.18) จะได้ตำแหน่งสุดท้ายของแมกนีไทเซชันที่มีค่าความถูกต้องมากขึ้นดังนี้

$$M_{t+1,Heun} = M_t + \Delta t M'_{avg} \quad (3.19)$$

วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Heun scheme เป็นวิธีการที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาต่างๆ ในกรณีที่โครงสร้างวัสดุประกอบด้วยหลายแมกนีไทเซชัน จะต้องทำการพิจารณาทุกแมกนีไทเซชันในระบบจากนั้นจะทำให้เราสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันทั้งหมดในโครงสร้างวัสดุที่เวลาต่างๆ ได้โดยการพิจารณาขั้นตอน predictor-corrector algorithm หลายๆ รอบเท่าที่ต้องการ สิ่งที่ต้องระวังในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันด้วยวิธีเชิงตัวเลข Heun scheme คือต้องทำการ normalised แมกนีไทเซชันให้เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยทุกครั้งหลังขั้นตอน predictor และขั้นตอน corrector เนื่องจากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขนี้จะไม่รักษาสภาพความเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชัน ซึ่งเป็นการอนุรักษ์ขนาดของแมกนีไทเซชันในสมการ LLG

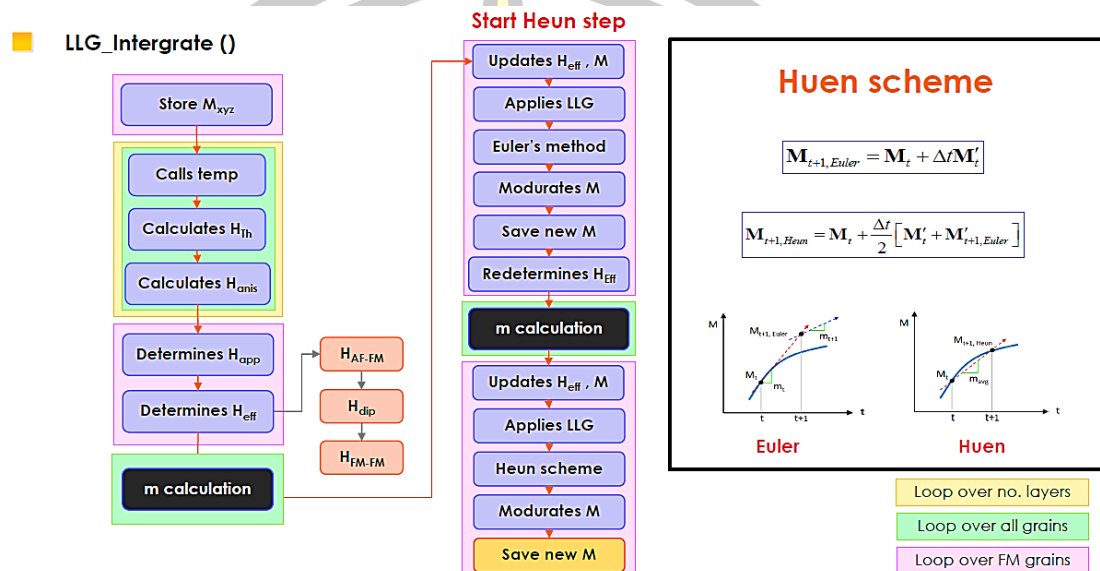


**ภาพประกอบ 3.3** วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Heun scheme จะทำการพิจารณาค่าประมาณของตำแหน่งถัดไปด้วยค่าอนุพันธ์ของจุดเริ่มต้นด้วยวิธีออยเลอร์ (ซ้าย) จากนั้นจะหาค่าอนุพันธ์เฉลี่ยของจุดเริ่มต้นและจุดถัดไปที่ประมาณค่าด้วยวิธีออยเลอร์เพื่อหาค่าตำแหน่งสุดท้ายที่มีความถูกต้องมากขึ้น (ขวา) [15]

### 3.4 ขั้นตอนการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยสมการ LLG

การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันสามารถพิจารณาได้จากสมการ LLG ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแต่พบว่าสมการการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันนี้มีความซับซ้อนในการหาค่าผลเฉลยแท้จริงเนื่องจากแสดงอยู่ในรูปของการคลอสรระหว่างแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กประสิทธิผลดังสมการ 3.7 ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันดังกล่าวความสัมพันธ์ในสมการข้างต้น เราสามารถใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบ Heun scheme ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อยกว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบออยเลอร์ในตอนนี้จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันอย่างง่ายเพื่อความสะดวกในการคำนวณ ในการแก้สมการ LLG ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อพิจารณาการ

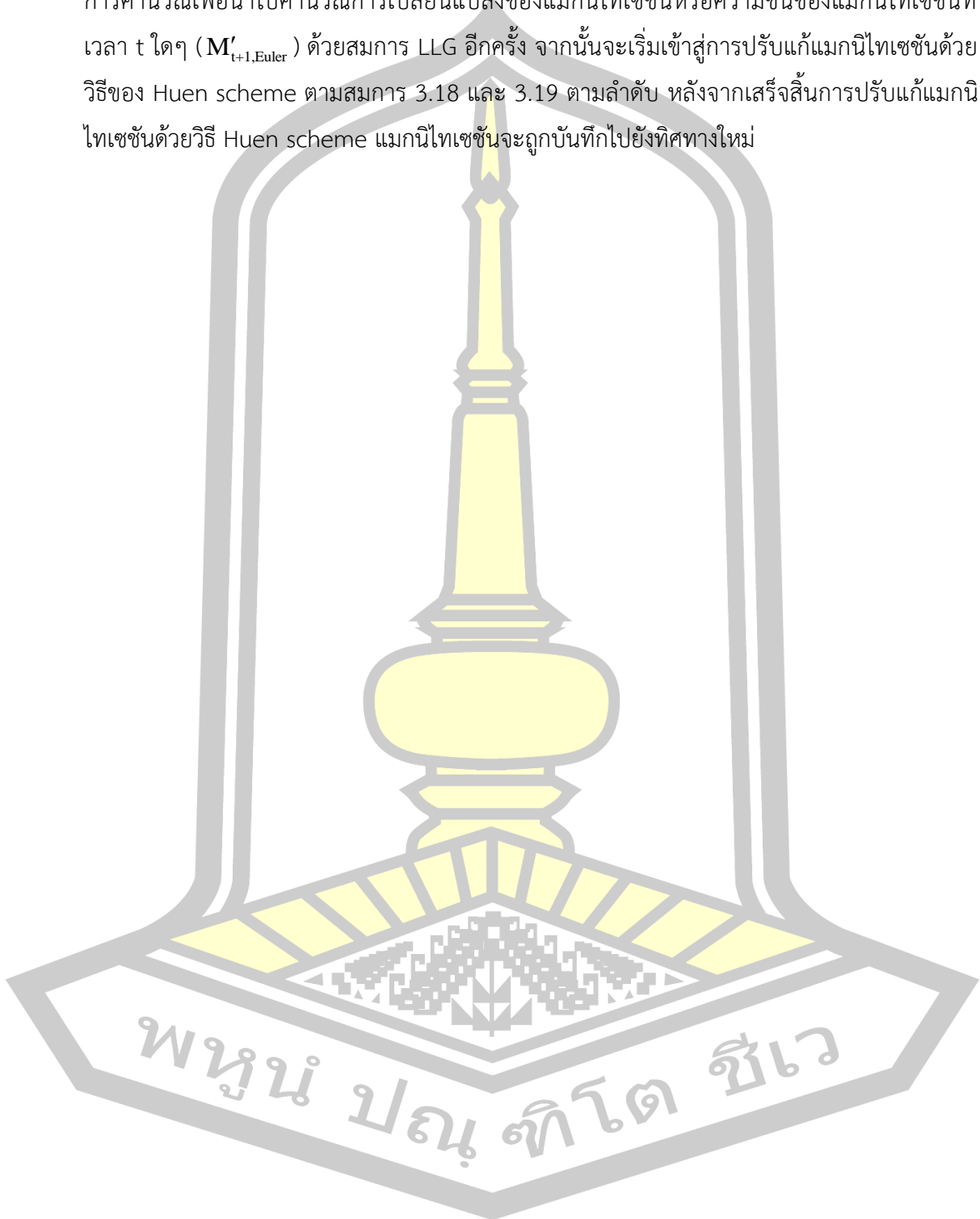
เคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาต่างๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำการเขียนโปรแกรมเข้ามาช่วยในการคำนวณเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในที่นี้จะใช้ภาษา C++ มาใช้ในการเขียนโค้ดสมการ LLG โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังแผนภาพในภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.4 แผนภาพแสดงการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยสมการ LLG ที่มีการประมาณค่าด้วยวิธีเชิงตัวเลข Huen scheme

ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันด้วยสมการ LLG ที่ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการประมาณค่า ในการคำนวณสมการ LLG ด้วยโปรแกรมภาษาซีเริ่มต้นด้วยการประกาศตัวแปรค่าคงที่และอาร์เรย์ที่ใช้ในการคำนวณ โดยทำการกำหนดทิศทางเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยและสนามแม่เหล็กประสิทธิผลในแนวพิกัดแกน (x,y,z) ซึ่งประกอบไปด้วย 6 สนามด้วยกันคือ สนามความร้อนเนื่องจากผลของอุณหภูมิ สนามแอนไอโซโทรปี สนามแม่เหล็กจากภายนอก สนามลบล้างความเป็นแม่เหล็กภายในวัสดุ สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก สนามแลกเปลี่ยนภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ในลำดับถัดไปจะเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณ โดยเริ่มจากการอัปเดตสนามแม่เหล็กประสิทธิผลและแมกนีไทเซชัน จากนั้นทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันหรือความชันของแมกนีไทเซชันที่เวลา t ใดๆ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mathbf{M}'_t$  โดยใช้สมการ LLG หลังจากนั้นทิศทางของแมกนีไทเซชันใหม่จะถูกพิจารณาด้วยวิธีออยเลอร์ตามสมการ 3.15 ซึ่งจะทำให้ได้แมกนีไทเซชันใหม่ที่มีการปรับแก้ด้วยวิธีของออยเลอร์ ( $\mathbf{M}_{t+1, Euler}$ ) หลังจากการประมาณค่าด้วยวิธีของออยเลอร์ทิศทางของแมกนีไทเซชันจะถูกบันทึกและเริ่มการพิจารณาสนามแม่เหล็ก

ประสิทธิภาพใหม่ โดยแมกนิไทเซชันและสนามประสิทธิผลดังกล่าวจะถูกอัปเดตใหม่ในแต่ละรอบของการคำนวณเพื่อนำไปคำนวณการเปลี่ยนแปลงของแมกนิไทเซชันหรือความชันของแมกนิไทเซชันที่เวลา  $t$  ใดๆ ( $\mathbf{M}'_{t+1, \text{Euler}}$ ) ด้วยสมการ LLG อีกครั้ง จากนั้นจะเริ่มเข้าสู่การปรับแก้แมกนิไทเซชันด้วยวิธีของ Huen scheme ตามสมการ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ หลังจากเสร็จสิ้นการปรับแก้แมกนิไทเซชันด้วยวิธี Huen scheme แมกนิไทเซชันจะถูกบันทึกไปยังทิศทางใหม่



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงผลของการจำลองโครงสร้างวัสดุสองชั้นคือวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกสำหรับศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในลำดับแรกจะแสดงผลการจำลองโครงสร้างโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอยเพื่อแสดงลักษณะทางกายภาพและเกรนภายในของโครงสร้างในเงื่อนไขการจำลองที่แตกต่างกัน ได้แก่ การกระจายตัวขนาดของเกรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน ขนาดของโครงสร้างและผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง จากนั้นจะได้อธิบายถึงผลการศึกษาเนื่องจากปัจจัยของการออกแบบโครงสร้างภายในหัวอ่านแม่เหล็ก ได้แก่ การกระจายตัวขนาดของเกรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและขนาดของโครงสร้างผ่านปริมาณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ตามลำดับ โดยในการศึกษาแต่ละปัจจัยจะได้ทำการเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่มีการพิจารณาและไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างในลำดับสุดท้าย

#### 4.1 การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงสำหรับศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแบบจำลองทางแม่เหล็กระดับจุลภาคซึ่งถูกพัฒนาให้มีความเสมือนจริงในการจำลองโครงสร้างของเกรนภายในโครงสร้าง นอกจากนั้นแบบจำลองดังกล่าวยังถูกพัฒนาให้สามารถจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น การจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหนึ่งชั้นสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล การจำลองโครงสร้างวัสดุสองชั้นสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โครงสร้างสำหรับปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมต่อกับชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกโดยชนิดของวัสดุแม่เหล็ก สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป็นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอน (Cobalt Iron, CoFe) และอิริเดียมแมงกานีส (Iridium Manganese, IrMn) ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนเป็นวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) 1300 เคลวิน ค่าคงที่แวนไอโซโทรปี  $1.8 \times 10^5$  เอิร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและปริมาณแมกนีไทเซชันอิมิตัว 1800 emu/cc สำหรับชั้น

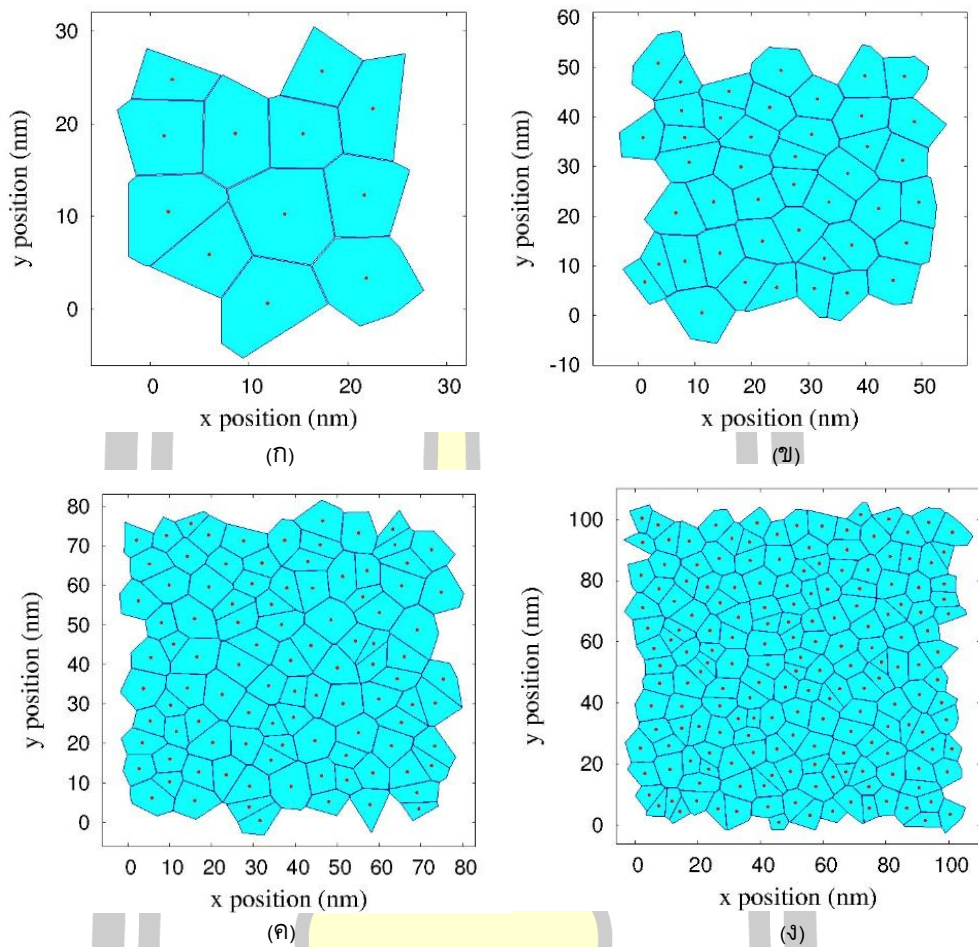


วัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสเป็นวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิของนีล (Neel temperature) 690 เคลวิน ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี  $5.5 \times 10^6$  เอิร์กต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณแมกนีไทเซชันอิมิตัวเท่ากับ 1800 emu/cc [27,28] จากชนิดของวัสดุแม่เหล็กและพารามิเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดคุณสมบัติภายในของชั้นวัสดุแม่เหล็กและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในงานวิจัยนี้โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นด้วยโปรแกรมไวโรนอยในการควบคุมลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ เช่น ขนาดของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก การกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กและผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง โดยผลการจำลองลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1.1 การจำลองโครงสร้างของเกรนในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน

ขนาดของโครงสร้างเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันมีความต้องการที่จะลดขนาดขององค์ประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงนำไปสู่ความซับซ้อนของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและปัญหาทางด้านเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างที่เกิดขึ้น จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองทางแม่เหล็กในระดับจุลภาคให้สามารถจำลองโครงสร้างของระบบตั้งแต่โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ไปจนถึงระบบโครงสร้างที่มีขนาดน้อยกว่า 50 นาโนเมตรที่มีความเสมือนจริงสำหรับโครงสร้างที่ทำการจำลองเป็นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสที่มีความหนา 4 และ 8 นาโนเมตร ตามลำดับ เกรนแต่ละเกรนถูกควบคุมให้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวของขนาดของเกรน 0.2 โดยขนาดของโครงสร้างที่ทำการจำลองมีขนาดตั้งแต่  $25 \times 25$ ,  $50 \times 50$ ,  $75 \times 75$  และ  $100 \times 100$  nm<sup>2</sup> ดังแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.1

พหุ ประถม โท ชีวะ



**ภาพประกอบ 4.1** ผลการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน (ก) โครงสร้างขนาด  $25 \times 25 \text{ nm}^2$  (ข) โครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  (ค) โครงสร้างขนาด  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  (ง) โครงสร้างขนาด  $100 \times 100 \text{ nm}^2$

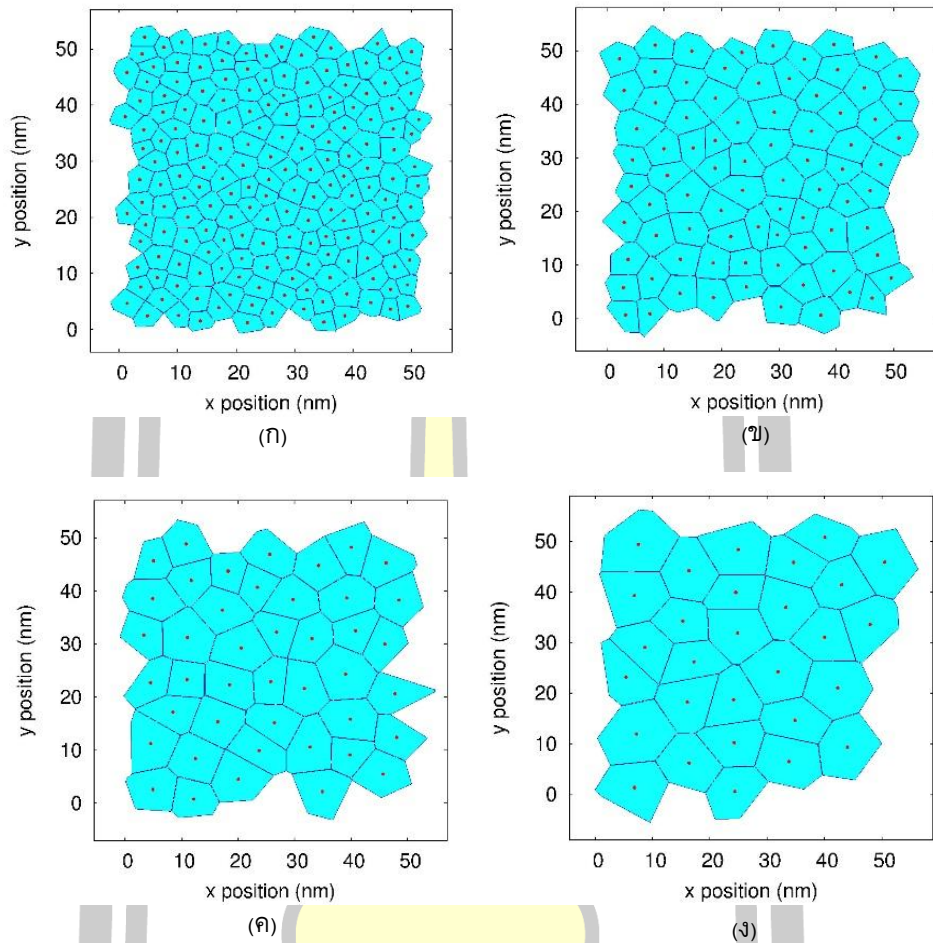
จากภาพประกอบ 4.1 แสดงโครงสร้างการจัดเรียงตัวของเกรนภายในระบบด้วยแบบจำลองเสมือนจริงระดับจุลภาคซึ่งแสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่มีการควบคุมขนาดของโครงสร้างของระบบที่มีความเสมือนจริงซึ่งจะพบว่าโครงสร้างเกรนแม่เหล็กที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรมไวโรนอยสามารถควบคุมขนาดของระบบให้มีขนาดที่ต่างกันได้ ตัวอย่างเช่น ภาพประกอบ 4.1 (ก) แสดงผลของการจำลองโครงสร้างของเกรนที่ขนาดโครงสร้าง  $25 \times 25 \text{ nm}^2$  ในภาพประกอบ 4.1 (ข) แสดงผลของการจำลองโครงสร้างของเกรนที่ขนาดโครงสร้าง  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และในภาพประกอบ 4.1 (ค) แสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่โครงสร้างขนาด  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  และในภาพประกอบ 4.1 (ง) แสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่โครงสร้างขนาด  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กยังคงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่จำนวนของ

เกรนภายในระบบจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้โดยสามารถควบคุมขนาดของระบบได้ตามความต้องการ

#### 4.1.2 การจำลองโครงสร้างในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน

นอกจากนี้แบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ยังถูกพัฒนาให้สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนแม่เหล็ก สำหรับการจำลองโครงสร้างของเกรนภายในระบบในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกันได้กำหนดให้โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่เชื่อมติดกันโดยกำหนดให้คุณสมบัติภายในวัสดุชั้นที่หนึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไฮดรอกไซด์และวัสดุแม่เหล็กชั้นที่สองเป็นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสโดยมีความหนาของชั้นแม่เหล็กทั้งสองเป็น 4 และ 8 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับขนาดของระบบที่ทำการจำลองโครงสร้างมีขนาดเท่ากับ  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  การกระจายตัวขนาดของเกรนในระบบกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 0.2 โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่ทำการจำลองโครงสร้างมีขนาดตั้งแต่ 4, 6, 8 และ 10 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองโครงสร้างได้ดังภาพประกอบ 4.2 แสดงผลการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กด้วยโปรแกรมโวลโรนอยในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนแตกต่างกันซึ่งจะเห็นได้ว่าการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนได้อย่างมีความเสมือนจริง โดยจากภาพประกอบ 4.2 (ก), (ข), (ค) และ (ง) แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กภายในระบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 6, 8 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ขนาดของเกรนจะมีค่ามากขึ้นตามการควบคุมของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน นอกจากนี้ในขณะที่เกรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กพบว่าความหนาแน่นของเกรนภายในระบบต่อพื้นที่มีค่าสูงมาก เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนต่อพื้นที่มีค่าลดลง

พหุ ประ โท ชี เว

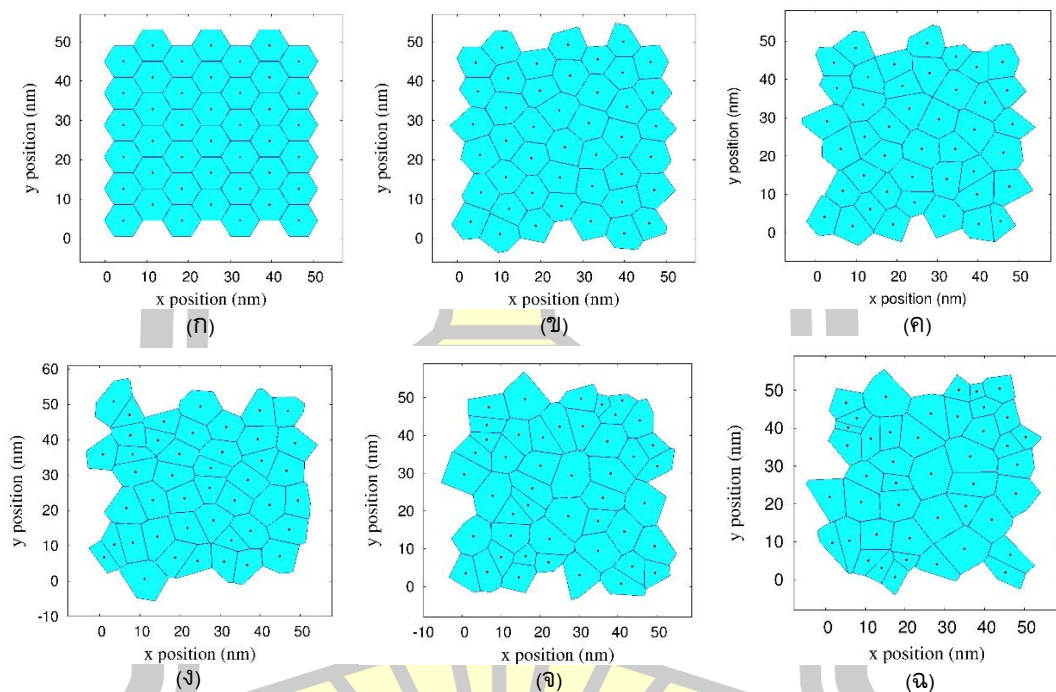


**ภาพประกอบ 4.2** ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นาโนเมตร (ข) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นาโนเมตร (ค) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นาโนเมตร (ง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร ในโครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$

#### 4.1.3 การจำลองโครงสร้างในกรณีที่มีการกระจายตัวของขนาดของเกรนแตกต่างกัน

การจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสำหรับศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้อาศัยโปรแกรมไวโรนอยในการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่มีความเหมือนจริงในลำดับแรกจะแสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่มีการควบคุมลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนเนื่องจากในกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยกระบวนการตกสะสมไม่สามารถควบคุมขนาดของเกรนแม่เหล็กให้มีขนาดที่เท่ากันได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กขึ้น ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองมีความเหมือนจริงในการจำลองโครงสร้างของเกรนภายในโครงสร้างแบบจำลองดังกล่าวจึงได้ถูกพัฒนาให้สามารถกำหนดลักษณะขนาดการ

กระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กให้เหมาะสมกับการกระจายตัวขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกฟิล์มแม่เหล็ก สำหรับโครงสร้างที่ทำการจำลองเป็นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีสที่มีขนาดโครงสร้าง  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมไวโรนอยโดยเกรนแม่เหล็กในโครงสร้างถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแท่งเกรน เกรนแต่ละเกรนถูกควบคุมให้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 นาโนเมตร โดยโครงสร้างที่ทำการศึกษามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวขนาดของเกรนตั้งแต่ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งสามารถแสดงลักษณะโครงสร้างที่ถูกจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยได้ดังต่อไปนี้



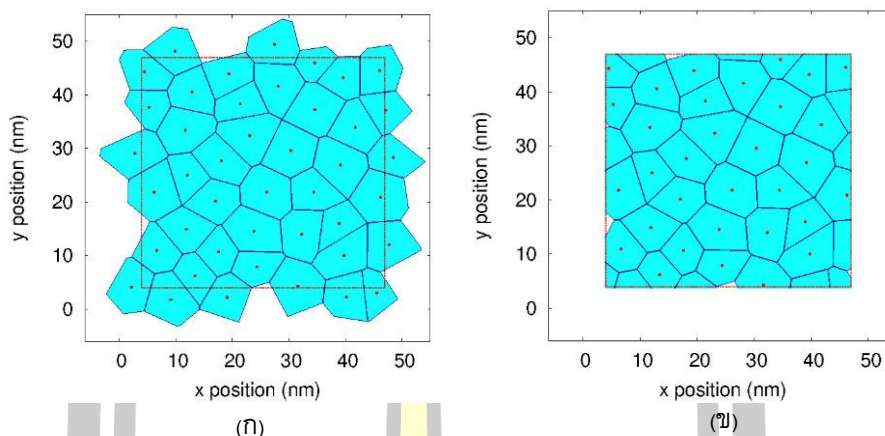
**ภาพประกอบ 4.3** ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีผลของการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0 (ข) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0.1 (ค) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0.2 (ง) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0.3 (จ) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0.4 (ฉ) การกระจายตัวขนาดของเกรน 0.5 โครงสร้างที่ทำการศึกษามีขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

จากภาพประกอบ 4.3 จะเห็นได้ว่าการจำลองโครงสร้างลักษณะของเกรนแม่เหล็กภายในระบบผ่านโปรแกรมไวโรนอยสามารถควบคุมการกระจายตัวขนาดของเกรนได้อย่างเสมือนจริง โดยในกรณีที่ไม่มีการกระจายตัวขนาดของเกรนกล่าวคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนเป็นศูนย์ เกรนภายในระบบมีลักษณะเหมือนกัน (uniform grains) เกรนส่วนใหญ่ภายในระบบจะมีขนาดเท่ากันและ

มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบส่งผลให้เกรนภายในระบบทุกๆ เกรนมีปริมาตรที่เท่ากันแสดงดังภาพประกอบ 4.3 (ก) ในกรณีที่เกรนมีการกระจายตัวเล็กน้อยซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวขนาดของเกรนเป็น 0.1 เกรนภายในระบบมีลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรนที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังแสดงในภาพประกอบ 4.3 (ข) แต่เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นเป็น 0.2 พบว่าลักษณะของการกระจายตัวของเกรนในกรณีนี้จะทำให้เกรนบางส่วนมีขนาดของเกรนและลักษณะของเกรนที่แตกต่างกันมากขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 4.3 (ค) ในกรณีที่เกรนภายในระบบมีการกระจายตัวปานกลางพบว่าเกรนภายในระบบมีรูปร่างและลักษณะของเกรนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดจนดังแสดงในรูปภาพประกอบ 4.3 (ง) และในกรณีที่โครงสร้างมีการกระจายตัวของเกรนเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 และ 0.5 แสดงดังภาพประกอบ 4.3 (จ) และภาพประกอบ 4.3 (ฉ) ตามลำดับ พบว่าลักษณะของเกรนในกรณีนี้จะส่งผลให้เกิดการผิดรูปของเกรนและความแตกต่างขนาดของเกรนภายในระบบที่สูงมากโดยเกรนบางส่วนมีขนาดที่ใหญ่กว่าปกติในขณะที่เกรนบางส่วนมีขนาดที่เล็กมาก (critical volume grains) ซึ่งนำไปสู่ปัญหาในด้านเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนภายในโครงสร้าง

#### 4.1.4 การจำลองโครงสร้างที่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

เพื่อให้แบบจำลองมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคให้สามารถพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างเนื่องจากการนำเอาโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องมีการตัดโครงสร้างด้วยลำอิเล็กตรอนให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับความต้องการซึ่งส่งผลให้เกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างโดนตัดด้วยลำอิเล็กตรอนส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีปริมาตรที่ลดลง สำหรับการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง โดยโครงสร้างที่ทำการจำลองประกอบไปด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสที่มีขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  โดยกำหนดให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 8 นาโนเมตรและมีค่าการกระจายตัวขนาดของเกรน 0.2 โดยผลการจำลองโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.4



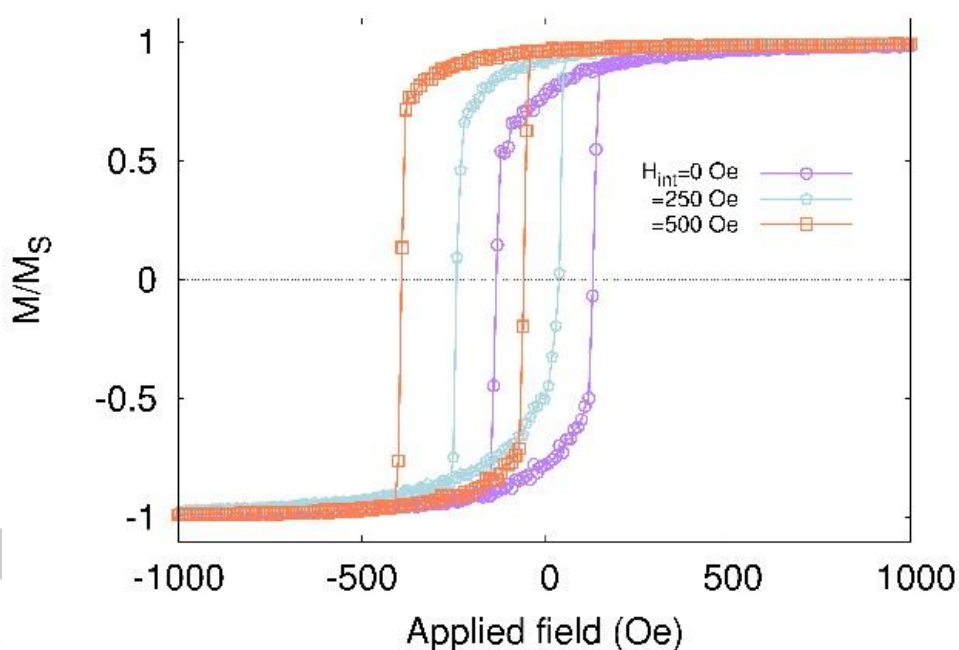
**ภาพประกอบ 4.4** ผลการจำลองโครงสร้างของเกรนวัสดุแม่เหล็ก (ก) กรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง (ข) กรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ในโครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$

จากภาพประกอบ 4.4 แสดงผลการจำลองลักษณะโครงสร้างของระบบที่มีการพิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง สำหรับกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างเกรนภายในระบบจะมีลักษณะที่สมบูรณ์ซึ่งเกรนแม่เหล็กจะไม่ได้ถูกตัดออกไปจากระบบ โดยตัวอย่างการจำลองลักษณะโครงสร้างสามารถแสดงได้ในภาพประกอบ 4.4 (ก) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 4.4 (ข) พบว่าเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างบางส่วนจะมีปริมาตรที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีขนาดเล็กปริมาตรของการตัดเกรนที่บริเวณขอบตลอดทั้งโครงสร้างอาจมีค่ามากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรรวมของเกรนภายในระบบ ซึ่งผลดังกล่าวอาจนำไปสู่ปัญหาด้านเสถียรภาพทางความร้อนและความคาดเคลื่อนในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก

#### 4.2 การศึกษาผลของสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กต่อสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคที่มีการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กด้วยโปรแกรมไวโรนอยในงานวิจัยนี้สามารถทำได้โดยการนำโครงสร้างที่ถูกจำลองดังแสดงในหัวข้อ 4.1 ไปใช้คำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากผลของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกโดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลการยึดทิศทางของแมกนิไทเซชันในชั้นพินสำหรับโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์

ไทรฟ์จึงมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ ความขรุขระที่ผิวรอยต่อ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน การศึกษาผลของความขรุขระที่บริเวณผิวของรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุด้วยแบบจำลองเสมือนจริงในงานวิจัยนี้สามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุซึ่งคือ  $H_{int}$  ซึ่งถูกอธิบายในบทที่ 3 โดยเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแรงของสนามแม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่กระทำต่อแมกนิโทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อทำให้เกิดการบังคับทิศทางหรือผันกลับทิศทาง สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุได้กำหนดให้โครงสร้างเป็นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนเชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กอิตริเดียมแมงกานีสซึ่งมีขนาดของโครงสร้างเท่ากับ  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ยภายในโครงสร้างเท่ากับ 8 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวขนาดของเกรน 0.2 โดยค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่ทำการศึกษามีค่าตั้งแต่ 0, 250, 500 และ 750 เออร์สเตต สำหรับผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.5



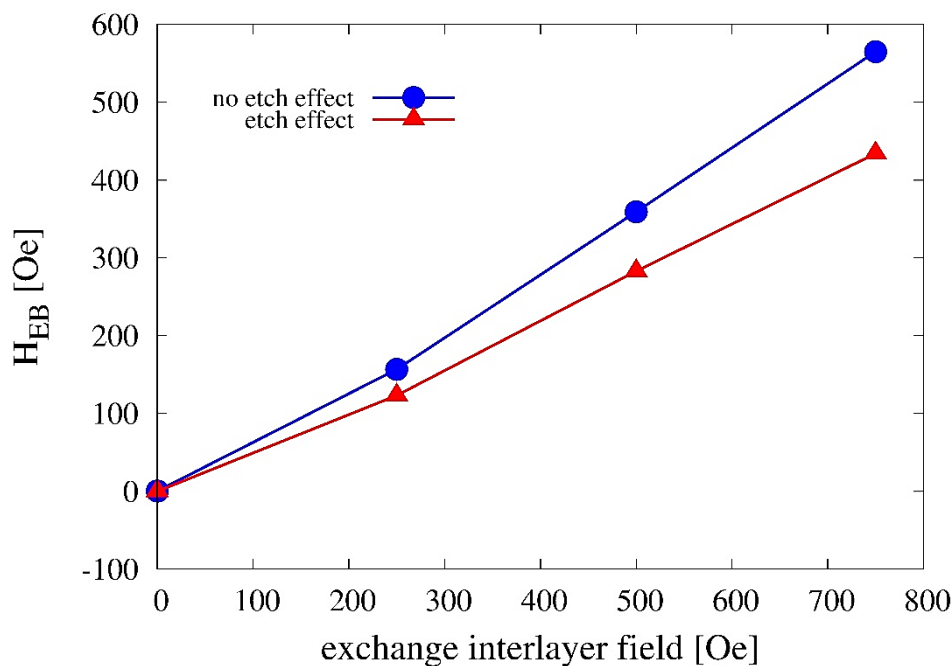
ภาพประกอบ 4.5 ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ

จากภาพประกอบ 4.5 แสดงตัวอย่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ ( $H_{int}$ ) มีค่า 0, 250 และ 500 เออร์สเตตเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของค่า  $H_{EB}$  จะเห็นได้ว่าในกรณีที่  $H_{int}$  มีค่าเป็นศูนย์ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่คำนวณได้จะมีลักษณะสมมาตรและไม่



มีการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสนามแม่เหล็กจากภายนอกเนื่องจากแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไม่เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกัน ในขณะที่ทำการเพิ่ม  $H_{int}$  ขึ้นเป็น 250 และ 500 เออร์สเตด พบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่คำนวณได้มีลักษณะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นตามค่าความแรงของค่า  $H_{int}$  จากการพิจารณาผลของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสสามารถคำนวณหาค่า  $H_{EB}$  ที่แต่ละค่า  $H_{int}$  โดยจากผลที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  และ  $H_{int}$  ดังภาพประกอบ 4.6 โดยแสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า  $H_{EB}$  ต่อการเพิ่มขึ้นของค่า  $H_{int}$  จากผลการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงให้ค่าที่สอดคล้องกับผลทางทฤษฎี [14] เนื่องจาก เมื่อทำการเพิ่มค่า  $H_{int}$  จะส่งผลต่ออันตรกิริยาแลกเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้น IrMn และ CoFe ที่สูงขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น CoFe จำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่สูงขึ้นตามซึ่งส่งผลให้ค่า  $H_{EB}$  มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ  $H_{int}$  นั่นเอง

นอกจากนี้ผลการตัดขอบของโครงสร้างของระบบต่อการพิจารณาค่า  $H_{int}$  ยังได้ถูกทำการศึกษา โดยระบบจะทำการคำนวณค่า  $H_{EB}$  สำหรับระบบที่ไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบของโครงสร้าง (no etch effect) และระบบที่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบของโครงสร้าง (etch effect) ที่ขนาดของระบบมีขนาดเท่ากัน  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  เพื่อเปรียบเทียบค่า  $H_{EB}$  ระหว่างทั้งสองโครงสร้าง จากการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาค พบว่าค่า  $H_{EB}$  ที่ค่าสนาม  $H_{int}$  ระหว่าง 0 ถึง 750 เออร์สเตดของระบบที่พิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบจะมีค่า  $H_{EB}$  ที่น้อยกว่าระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 4.6 สาเหตุเนื่องจากเมื่อระบบที่มีขนาดเล็กพบว่าการตัดขอบของเกรนที่บริเวณขอบจะส่งผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่สูงเนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบบางส่วนที่ถูกตัดออกไปมีปริมาณที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของระบบซึ่งจะส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีค่าพลังงานกีดกัน (energy barrier) ของระบบลดลงซึ่งมีค่าแปรผันตามปริมาตรของเกรนแม่เหล็กส่งผลให้ความสามารถในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น CoFe มีค่าลดลง ดังนั้นค่า  $H_{EB}$  ที่ได้มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างจึงมีค่าน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างซึ่งค่า  $H_{EB}$  ที่คำนวณได้มีค่าลดลงถึง 20 % ของระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของระบบ จากผลที่ได้ให้ค่าที่สอดคล้องตามทฤษฎีและยืนยันถึงความสำคัญของการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็ก สำหรับผลของการพิจารณาการตัดเกรนที่บริเวณขอบจะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 4.3



ภาพประกอบ 4.6 ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากวงปิดฮีส-เทอร์ซิสในกรณีที่ขนาดของสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีค่าแตกต่างกัน

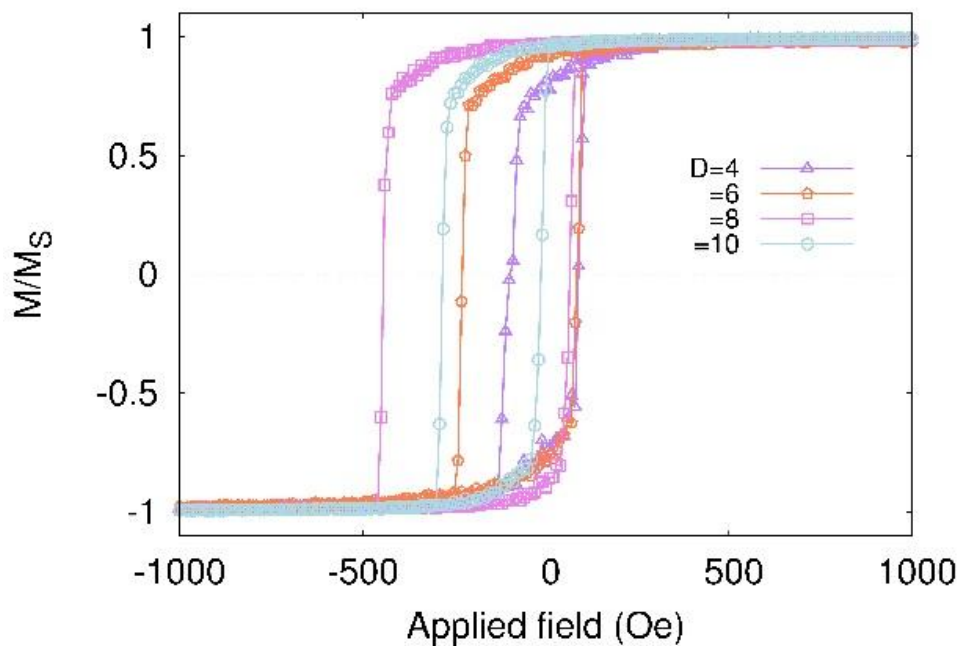
#### 4.3 การศึกษาผลของการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

การศึกษาผลกระทบของการออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสผ่านโปรแกรมไวโรนอยโดยโครงสร้างที่ถูกจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสและขนาดของโครงสร้าง โดยการออกแบบโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กในหัวข้อนี้ได้พิจารณาเฉพาะลักษณะโครงสร้างที่ไม่มีผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ซึ่งผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่มีต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเฉลี่ยเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเฉลี่ยจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก (energy barrier) ซึ่งเป็นพลังงานที่พยายามรักษาทิศทางของแมกนิไทเซชัน

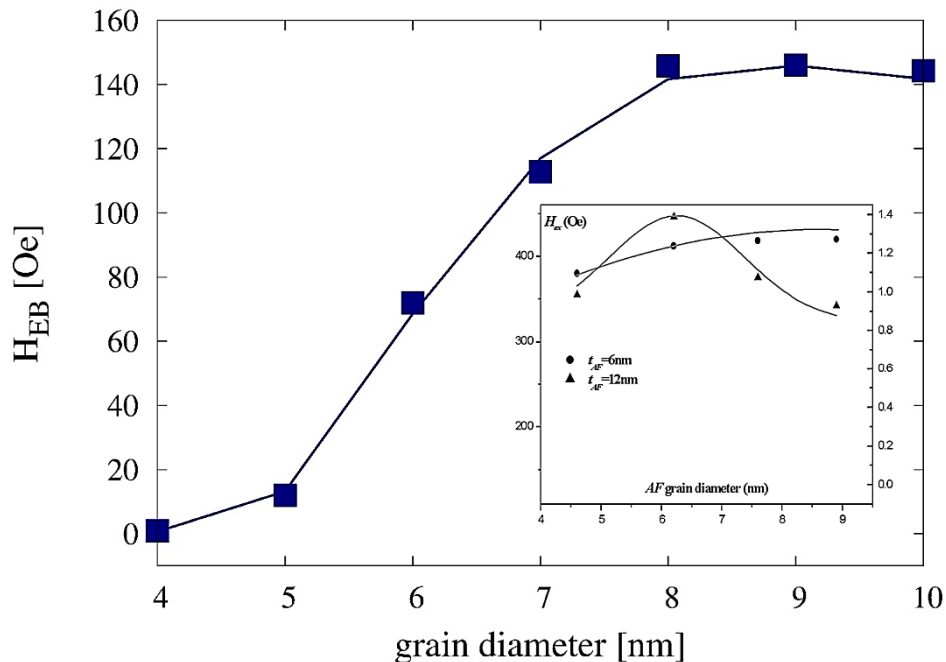
ชั้นไม่ให้ผันกลับทิศทาง ในการศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่มีต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนได้ทำการศึกษาในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นคือวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนและวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสที่เชื่อมติดกันโดยมีขนาดของโครงสร้าง  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และมีการกระจายตัวขนาดของเกรน 0.2 โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนที่ทำการศึกษา มีค่าตั้งแต่ 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร โดยลักษณะโครงสร้างของเกรนที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรมไวโรนอยสามารถแสดงได้ในภาพประกอบ 4.2 ในหัวข้อที่ผ่านมา



ภาพประกอบ 4.7 ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน ในกรณีที่ไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

ภาพประกอบ 4.7 แสดงลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกันโดยพบว่าที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 4 นาโนเมตร ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแทบจะไม่มี การเลื่อนออกจากแนวแกนสมมาตร แต่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเพิ่มขึ้นพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรไปในทิศทาง  $-x$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนยังส่งผลให้ความกว้างของวงปิดฮิสเทอรีซิสมีขนาดที่กว้างมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่ จากการพิจารณาลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสสามารถคำนวณค่า  $H_{EB}$  ที่แต่ละค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนดัง

สมการที่ 2.41 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนได้ดังภาพประกอบ 4.8



ภาพประกอบ 4.8 ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร [15]

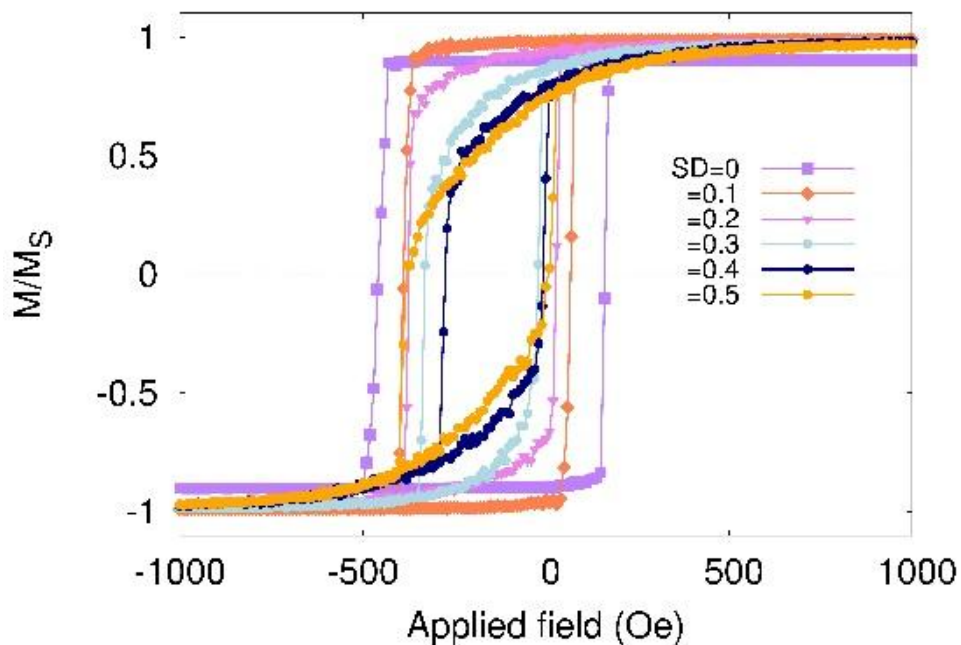
จากภาพประกอบ 4.8 แสดงผลการคำนวณค่า  $H_{EB}$  เนื่องจากผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนผ่านแบบจำลองทางแม่เหล็กเหมือนจริงระบบจุลภาคให้ผลที่สอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษานาโนเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน โดยในกรณีที่เกรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 4 นาโนเมตร พบว่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากปริมาตรของเกรนมีค่าน้อยซึ่งส่งผลให้ค่าพลังงานที่รักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละเกรนแม่เหล็กมีค่า ดังนั้นระบบที่มีเกรน 4 นาโนเมตรจึงไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้เนื่องจากเกรนขาดเสถียรภาพทางความร้อนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไว้ได้นั่นเอง เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 นาโนเมตร เนื่องจากเกรนมีปริมาตรที่สูงส่งผลให้เกรนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นดังนั้นในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กในชั้นวัสดุ CoFe ที่ถูกยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันด้วยการเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็ก IrMn จำเป็นต้องใช้ปริมาณของสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นซึ่งส่งผล  $H_{EB}$  มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่า  $H_{EB}$  มีแนวโน้มที่จะคงที่เนื่องจากเกรนมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่มีจำนวนที่มากขึ้นซึ่งเกรนแม่เหล็กเหล่านั้นจะมีค่าพลังงานกีดกันที่สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงมากจนไม่สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเกรนดังกล่าวจะไม่ถูกนำไปพิจารณาในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนนำไปสู่การคงที่และลดลงของค่า  $H_{EB}$  ดังนั้นค่า  $H_{EB}$  จึงมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีขนาดที่สูงเกินไป นอกจากนี้ผลที่ได้จากการคำนวณยังสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและการทดลองโดยสามารถแสดงได้ในรูปเปรียบเทียบผลในภาพประกอบ 4.8 จากผลการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคในงานวิจัยนี้ให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและการทดลองที่ถูกเสนอโดย O'grady และคณะ [15] จะเห็นได้ว่าลักษณะของค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตร

#### 4.3.2 การศึกษาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนที่มีผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า  $H_{EB}$  นอกจากผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน ปัจจัยทางด้านโครงสร้าง อาทิเช่น ลักษณะการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กยังส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนหรือค่า  $H_{EB}$  โดยหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของการกระจายตัวขนาดของเกรนโดยทำการกำหนดการกระจายตัวขนาดของเกรนผ่านค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริง สำหรับโครงสร้างที่ทำการศึกษาประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่มีความหนา 8 และ 4 นาโนเมตรตามลำดับ โครงสร้างที่ทำการศึกษามีขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเฉลี่ย 8 นาโนเมตร โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 สำหรับการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยสำหรับใช้ศึกษาค่าการกระจายตัวขนาดของเกรนสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.3

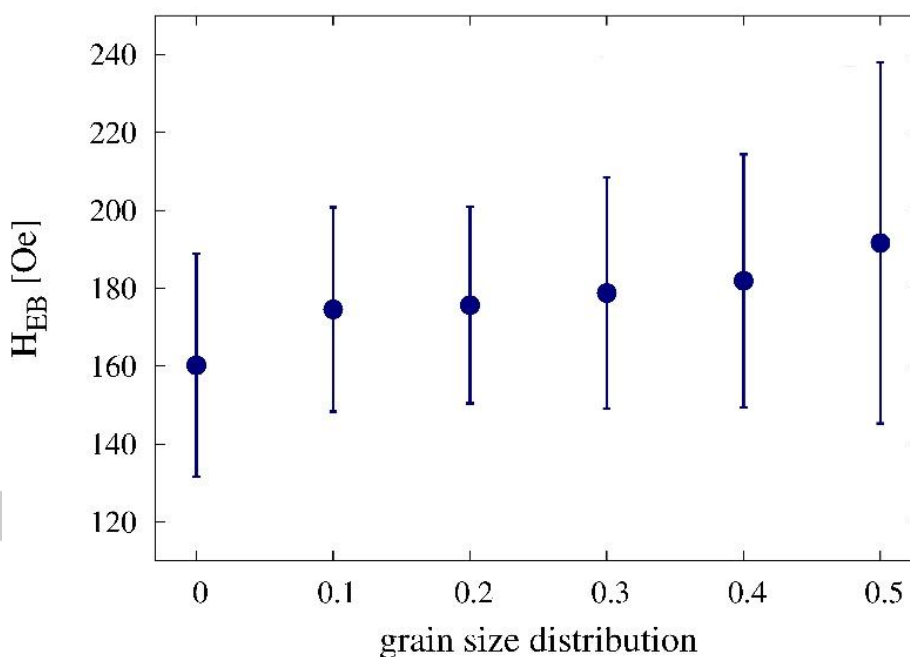
พูน ปรณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 4.9 ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวของเกรน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

จากการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่การกระจายตัวขนาดของเกรนแตกต่างกันในภาพประกอบ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวของเกรนตามลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการกำหนดทางโครงสร้างเกรนแม่เหล็ก ในลำดับถัดไปจะทำการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวัดค่าลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.9 จากภาพประกอบดังกล่าวแสดงลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสในกรณีที่มีการกระจายตัวของเกรน 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 โดยพบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสจะมีค่าที่สูงขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวขนาดของเกรน เนื่องจากในกรณีที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกรนเป็นศูนย์เกรนแต่ละเกรนภายในระบบมีขนาดและรูปร่างของเกรนที่สมบูรณ์แต่เกรนดังกล่าวมีปริมาณของเกรนที่ต่ำส่งผลให้เกรนขาดเสถียรภาพทางความร้อนนำไปสู่การเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น CoFe และชั้น IrMn ที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเกรนแต่ละเกรนภายในระบบมีความเหมือนส่งผลให้การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแต่ละเกรนมีความพร้อมเพียงกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณของแมกนีไทเซชันอิมิตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าสนามแม่เหล็กจากภายนอกเพียงค่าเดียว เมื่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของเกรนภายในโครงสร้างมากขึ้นกล่าวคือเกรนบางเกรนภายใน

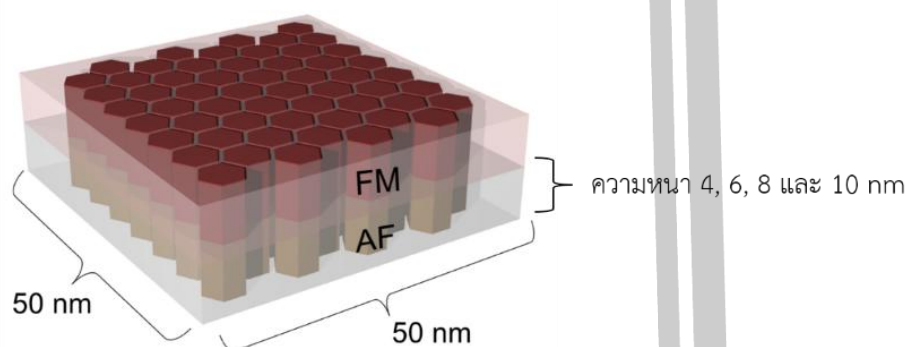
โครงสร้างมีขนาดที่ลดลงในขณะที่เกรนบางเกรนมีขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงนำไปสู่การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นโคบอลต์ไอรอนที่สูงซึ่งจำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่สูงขึ้นตามขนาดของการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮีสเทอร์ซิซิส จากผลการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอร์ซิซิสข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณค่า  $H_{EB}$  เนื่องจากผลของการกระจายตัวของเกรนเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  ที่แต่ละค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรน นอกจากนี้ยังได้มีการแสดงค่าความคาดเคลื่อนในการคำนวณของค่า  $H_{EB}$  ผ่านการคำนวณซ้ำจำนวน 50 ครั้งของโครงสร้างที่ถูกจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยที่มีการปรับเปลี่ยนตัวเลขสุ่มตำแหน่งของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ โดยผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวของขนาดของเกรน นอกจากนี้ยังพบว่า การกระจายตัวของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวของเกรนเนื่องจากความแตกต่างของขนาดของเกรนภายในระบบมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวของเกรนนั่นเอง



ภาพประกอบ 4.10 ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่การกระจายตัวของเกรนมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

#### 4.3.3 การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสต่อค่าสนามไบอัส แลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเกิดจากการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกด้วยการเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจึงมีความสำคัญอย่างมากในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความหนาของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งใช้เป็นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสโดยถูกเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอน ในโครงสร้างขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  กำหนดให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยภายในโครงสร้างมีขนาด 8 นาโนเมตรและเกรนภายในโครงสร้างมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวของเกรน 0.2 โดยความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสที่ทำการศึกษามีความหนาอยู่ในช่วง 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กใน 3 มิติ ดังภาพประกอบ 4.12

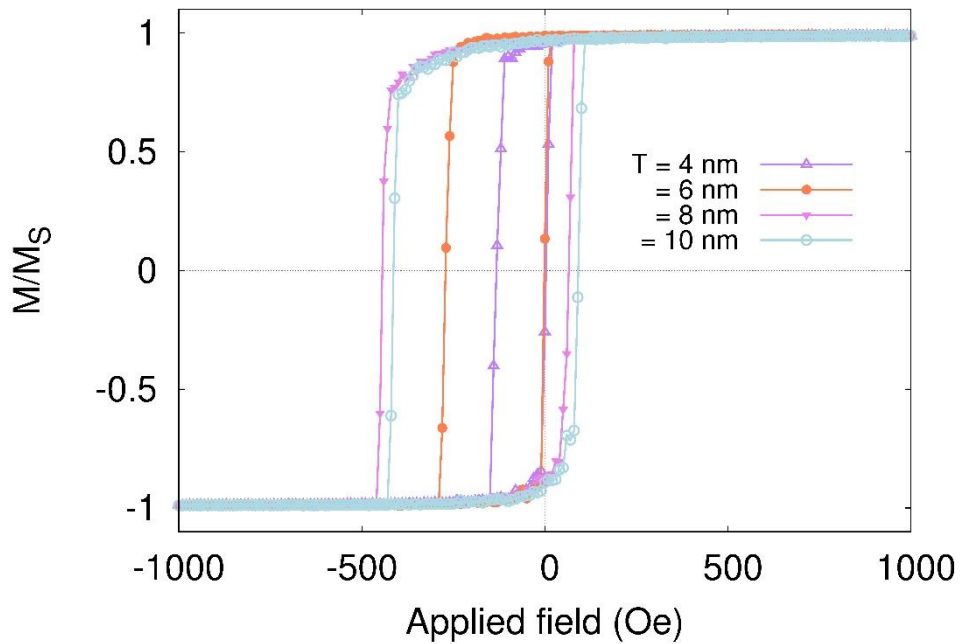


ภาพประกอบ 4. 11 การจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยใน 3 มิติ

จากตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่ความหนาของชั้น AF หรือชั้นแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีส 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตรผ่านโปรแกรมไวโรนอยจะถูกนำไปทำการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสผ่านแบบจำลองเสมือนจริงเพื่อศึกษาลักษณะการเลื่อนของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสดังแสดงในภาพประกอบ 4.12

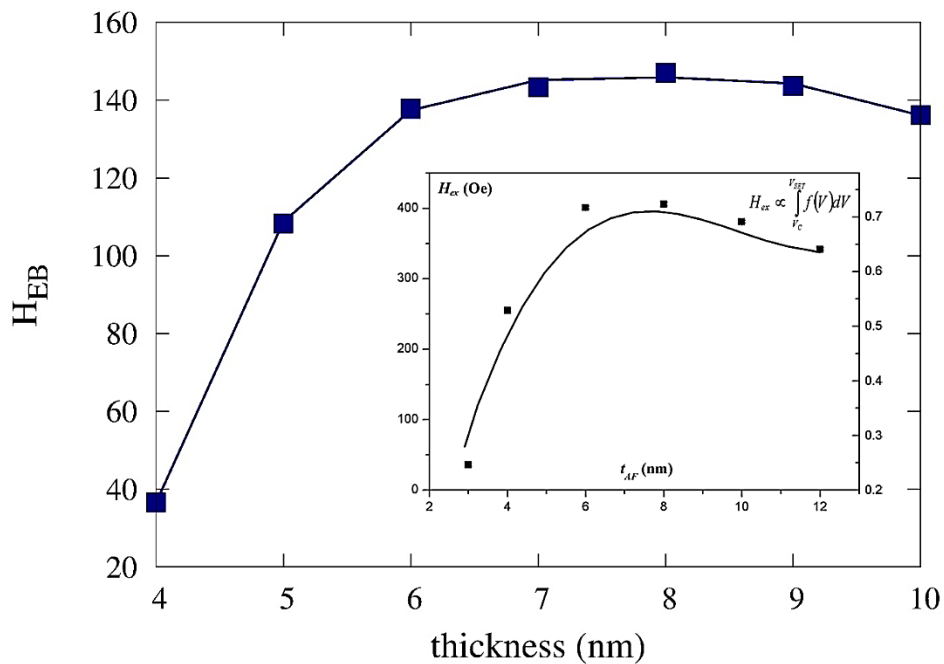
พูนุ ปณุกิตโต ชิว





ภาพประกอบ 4.12 ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

จากภาพประกอบ 4.12 แสดงลักษณะการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสออกจากแกนสมมาตรในกรณีที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีขนาดแตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้วงปิดฮิสเทอรีซิสมีการเลื่อนออกจากแกนสมมาตรไปทางด้านแกน  $-x$  มากขึ้น จนกระทั่งที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีความหนาเท่ากับ 8 นาโนเมตร เมื่อความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรพบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีค่าลดลง จากการคำนวณวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแตกต่างกันเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_{EB}$  และความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมกกาไนส ดังแสดงในภาพประกอบ 4.13



**ภาพประกอบ 4.13** ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสที่มีความหนาแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

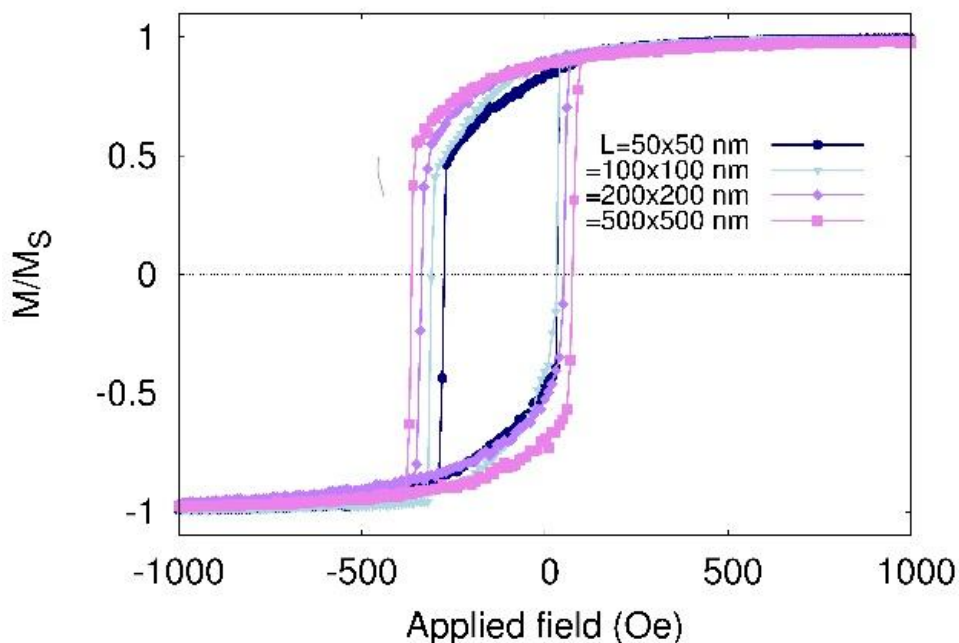
จากภาพประกอบ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแตกต่างกันโดยในแนวแกน x แสดงความหนาของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและแกน y แสดงค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับเส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีแดงแทนค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาและในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง จากผลการคำนวณค่า  $H_{EB}$  ผ่านแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคให้ผลที่สอดคล้องเป็นอย่างดีกับงานวิจัยของ O'grady [5] เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้นแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสพบว่าค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าต่ำ เนื่องจากที่ความหนาของชั้นอิริเดียมที่ต่ำจะทำให้ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กมีค่าน้อยซึ่งส่งผลให้ค่าพลังงานที่รักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละเกรนแม่เหล็กมีค่าต่ำไปด้วย ดังนั้นเกรนจึงขาดเสถียรภาพทางความร้อนจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไว้ได้นั่นเอง เมื่อความหนาของชั้นแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 นาโนเมตร เนื่องจากเกรนมีปริมาตรที่สูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้น IrMn ส่งผลให้เกรนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ตื้นดังนั้นในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กในชั้นวัสดุ CoFe ที่ถูกยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันด้วยการเชื่อมต่อดั้ววัสดุแม่เหล็ก IrMn

จำเป็นต้องใช้ปริมาณของสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นซึ่งส่งผล  $H_{EB}$  มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่า  $H_{EB}$  มีแนวโน้มที่จะลดลงตามความสัมพันธ์  $H_{EB} \propto 1/t_{AF}$  [25,26] เนื่องจากเกรนมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงมากจนไม่สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนที่มีปริมาตรที่สูงสำหรับการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ซึ่งเกรนดังกล่าวจะไม่ถูกนำไปพิจารณาในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ดังนั้นค่า  $H_{EB}$  จึงมีค่าลดลงเมื่อชั้นแม่เหล็ก IrMn มีความหนาที่สูงเกินไป

#### 4.3.4 การศึกษาผลของขนาดของโครงสร้างต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

ขนาดของโครงสร้างเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างส่งผลกระทบต่อจำนวนของเกรนภายในระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดของระบบมีขนาดที่เล็กลงปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนยังมีความซับซ้อนมากขึ้นดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาขนาดของโครงสร้างจึงจำเป็นต้องมีความเสมือนจริง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางแม่เหล็กที่มีความเสมือนจริงเข้ามาช่วยในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอน เชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีสที่มีความหนา 4 และ 8 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 8 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวขนาดของเกรน 0.2 กำหนดให้ความแรงของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีขนาดเท่ากับ 250 เออร์สเทต สำหรับโครงสร้างที่ทำการศึกษาที่มีขนาดตั้งแต่  $25 \times 25 \text{ nm}^2$  ไปจนถึงโครงสร้างขนาด  $750 \times 750 \text{ nm}^2$  โดยผลการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กสามารถได้ดังภาพประกอบ 4.1

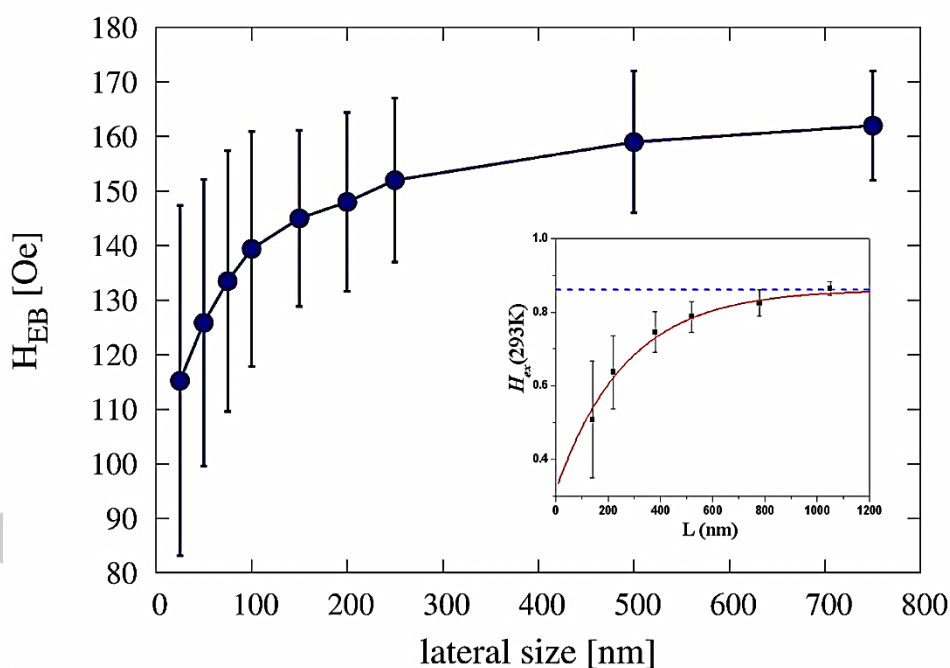




**ภาพประกอบ 4.14** ผลการศึกษาขนาดของโครงสร้างที่มีต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งแสดงลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง

จากการจำลองลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยที่ขนาดโครงสร้างแตกต่างกันดังภาพประกอบ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนของเกรนภายในระบบด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงสร้าง ในลำดับถัดไปโครงสร้างที่ถูกจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณผ่านแบบจำลองเสมือนจริงเพื่อแสดงลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่โครงสร้างขนาด 25x25 50x50 100x100 200x200 500x500 และ 750x750 nm<sup>2</sup> ดังภาพประกอบ 4.14 โดยแสดงลักษณะการเลื่อนของวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อโครงสร้างมีขนาดเล็กพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรได้น้อย แต่เมื่อโครงสร้างมีขนาดที่มากขึ้นเพิ่มขึ้นพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรในทิศแกน -x ตามการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงสร้าง แต่เมื่อขนาดของโครงสร้างมีขนาดใหญ่พบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเริ่มมีค่าคงที่ จากการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสข้างต้นจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากผลของขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  และขนาดของโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 4.15 ซึ่งแสดงผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ขนาดโครงสร้างของระบบแตกต่างกัน โดยแกน x แสดงขนาดของโครงสร้างและแกน y แสดงค่า  $H_{EB}$  จะเห็นได้ว่าค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงสร้างและค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าคงที่เมื่อขนาดของระบบมีขนาดใหญ่ เนื่องจากในกรณีที่

โครงสร้างมีขนาดเล็กจำนวนของเกรนภายในระบบมีจำนวนน้อยมากซึ่งส่งผลให้จำนวนของเกรนที่ถูกนำไปพิจารณาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนมีจำนวนที่น้อย แต่เมื่อขนาดของโครงสร้างมีค่ามากซึ่งจากการจำลองโครงสร้างจะพบว่าเกรนภายในระบบจะมีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่า  $H_{EB}$  มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การจำลองโครงสร้างของเกรนภายในระบบผ่านแบบจำลองเสมือนจริงยังได้ออกแบบให้เกรนมีการกระจายตัวภายในโครงสร้างซึ่งจะส่งผลให้ปริมาตรและรูปร่างของเกรนมีความแตกต่างกันส่งผลให้เกรนบางส่วนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ ในขณะที่บางเกรนมีขนาดที่ใหญ่จนไม่สามารถกลับทิศของแมกนีไทเซชันได้ จากผลของขนาดของโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของเกรนจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ โดยได้ทำการจำลองโครงสร้างของระบบที่ขนาดต่างๆ จำนวน 50 โครงสร้างโดยที่มีตำแหน่งของเกรนภายในระบบที่แตกต่างกันซึ่งถูกผ่านพารามิเตอร์ผ่านตัวเลขสุ่มเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของ  $H_{EB}$  และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $H_{EB}$  ดังแสดงในภาพประกอบ 4.15 จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า  $H_{EB}$  และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $H_{EB}$  ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของกอนซาโลและคณะเป็นอย่างดี [5]



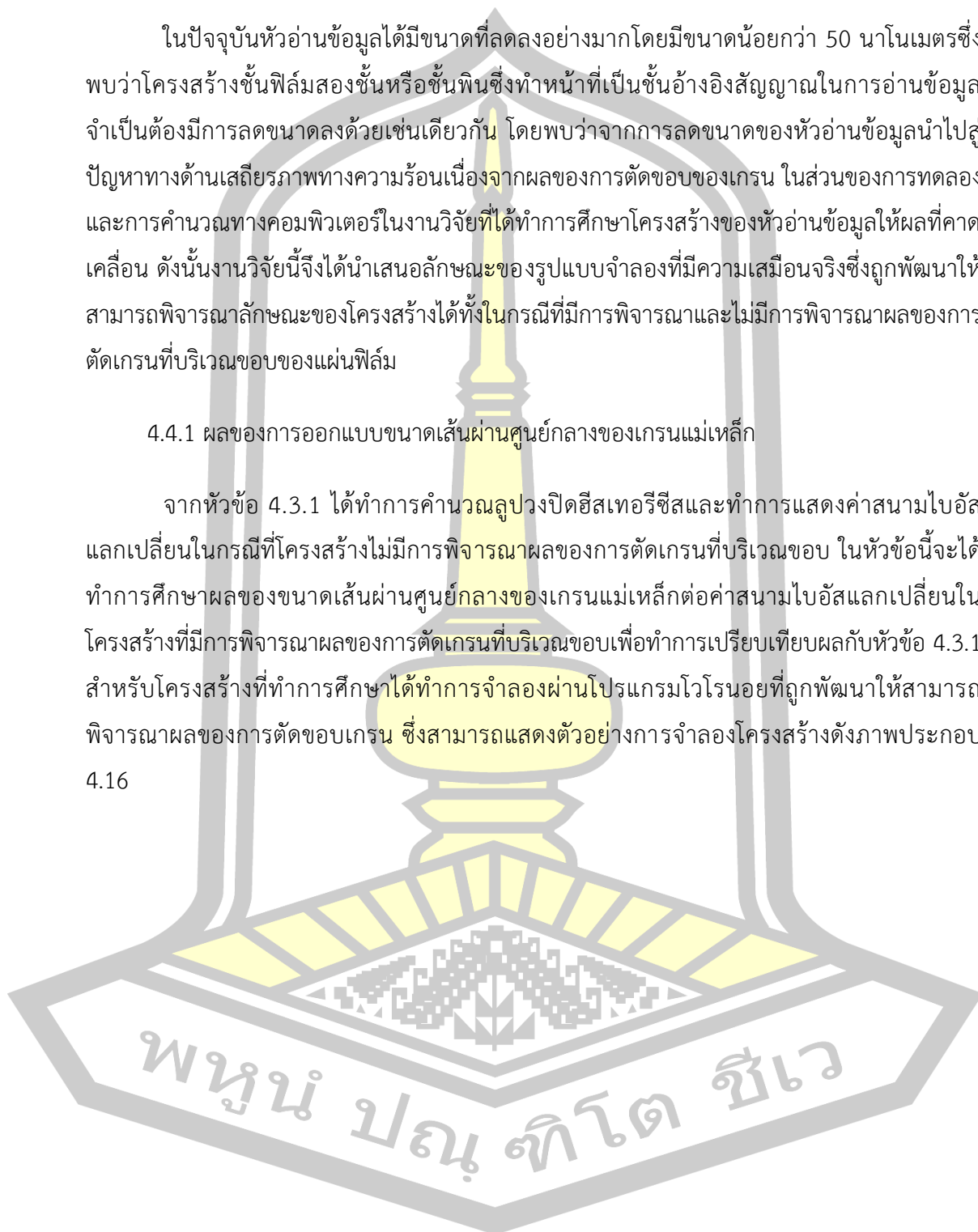
ภาพประกอบ 4.15 ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้าง  $25 \times 25$   $50 \times 50$   $100 \times 100$   $200 \times 200$   $500 \times 500$  และ  $750 \times 750$   $\text{nm}^2$  ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง [5]

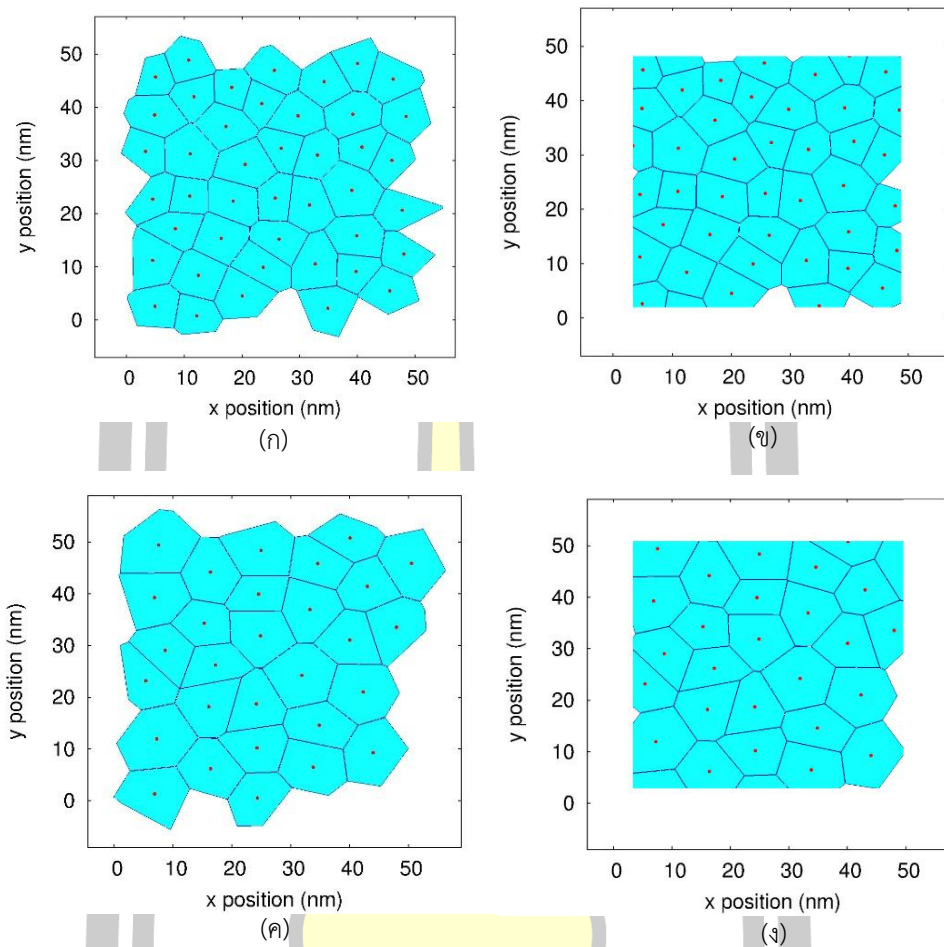
#### 4.4 การศึกษาผลกระทบของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของฟิล์มต่อการออกแบบโครงสร้าง

ในปัจจุบันหัวอ่านข้อมูลได้มีขนาดที่ลดลงอย่างมากโดยมีขนาดน้อยกว่า 50 นาโนเมตรซึ่งพบว่าโครงสร้างชั้นฟิล์มสองชั้นหรือชั้นพินซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นอ้างอิงสัญญาณในการอ่านข้อมูลจำเป็นต้องมีการลดขนาดลงด้วยเช่นเดียวกัน โดยพบว่าจากการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลนำไปสู่ปัญหาทางด้านเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากผลของการตัดขอบของเกรน ในส่วนของการทดลองและการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลให้ผลที่คาดเคลื่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอลักษณะของรูปแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงซึ่งถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาลักษณะของโครงสร้างได้ทั้งในกรณีที่มีการพิจารณาและไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของแผ่นฟิล์ม

##### 4.4.1 ผลของการออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก

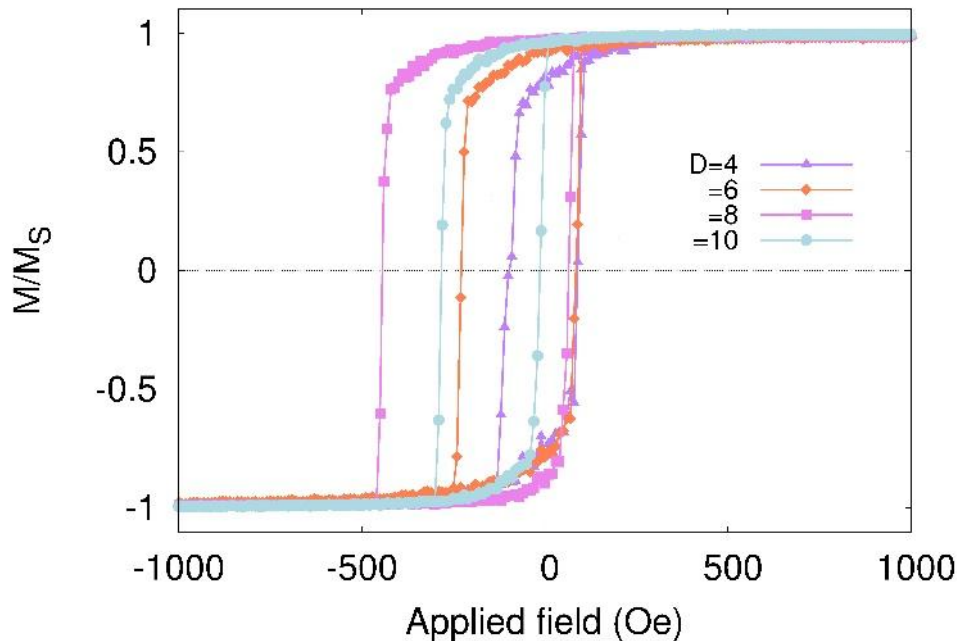
จากหัวข้อ 4.3.1 ได้ทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและทำการแสดงค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบ ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบเพื่อทำการเปรียบเทียบกับหัวข้อ 4.3.1 สำหรับโครงสร้างที่ทำการศึกษาได้ทำการจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยที่ถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาผลของการตัดขอบเกรน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างดังภาพประกอบ 4.16





**ภาพประกอบ 4.16** การจำลองโครงสร้างเกรนแม่เหล็กผ่านโพรแกรมไวโรนอย (ก) ขนาดของเกรน 8 นาโนเมตรและไม่มีผลของการตัดขอบเกรน (ข) ขนาดของเกรน 8 นาโนเมตรและมีผลของการตัดขอบเกรน (ค) ขนาดของเกรน 10 นาโนเมตรและไม่มีผลของการตัดขอบเกรน (ง) ขนาดของเกรน 10 นาโนเมตรและมีผลของการตัดขอบเกรน

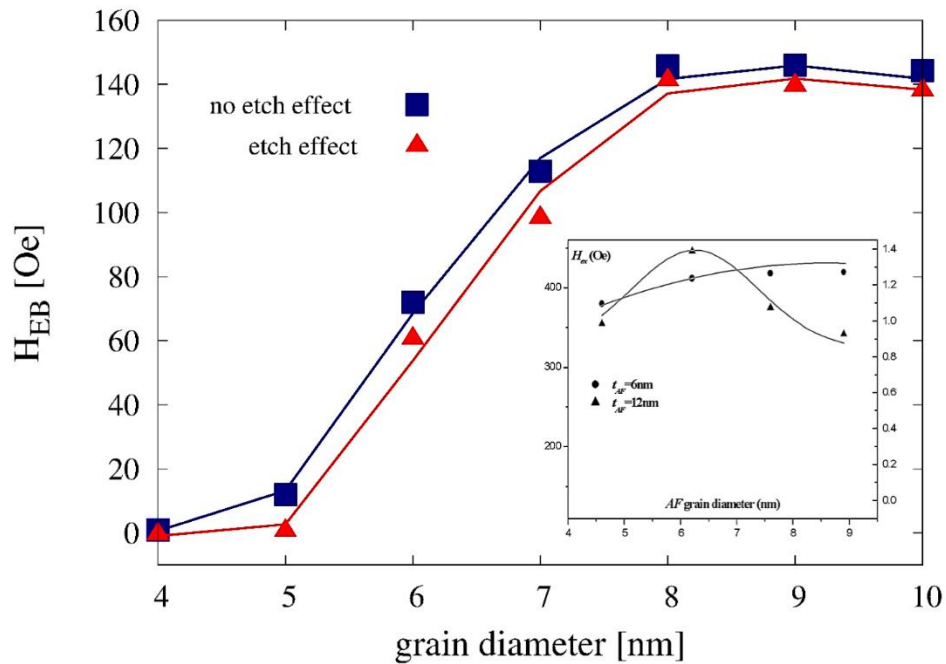
จากภาพประกอบ 4.16 แสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโพรแกรมไวโรนอย สำหรับลักษณะโครงสร้างของเกรนที่ไม่มี การตัดขอบเกรนพบว่าเกรนที่บริเวณขอบมีความสมบูรณ์ดัง ภาพประกอบ 4.16 (ก) และ (ค) ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 8 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ แต่ในความเป็นจริงแผ่นฟิล์มแม่เหล็กจะถูกตัดเพื่อนำไปใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล สำหรับโครงสร้างของเกรนที่มีการพิจารณาผลของการตัดขอบเกรนพบว่าปริมาตรของเกรนบางส่วน จะถูกตัดออกไปดังภาพประกอบ 4.16 (ข) และ (ง) ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 8 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ จากการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโพรแกรมไวโรนอยในกรณีที่ ไม่มีการพิจารณาการตัดขอบเกรนจะถูกนำไปคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสซึ่งสามารถแสดงดังภาพ 4.17



ภาพประกอบ 4.17 ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบ

จากภาพประกอบ 4.17 แสดงลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเนื่องจากผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่แตกต่างกันในกรณีที่โครงสร้างมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน โดยพบว่าที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน 4 นาโนเมตร ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสแทบจะไม่มี การเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตร แต่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเพิ่มขึ้นพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรไปในทิศทาง  $-x$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนยังส่งผลให้ความกว้างของวงปิดฮิสเทอรีซิสมีขนาดที่กว้างมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่าขนาดของการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่ จากผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณค่า  $H_{EB}$  เนื่องจากผลของการกระจายตัวของเกรนเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  ที่แต่ละค่าการกระจายตัวของเกรนในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนเพื่อเปรียบเทียบกับค่า  $H_{EB}$  ที่ได้จากโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบดังภาพประกอบ 4.18



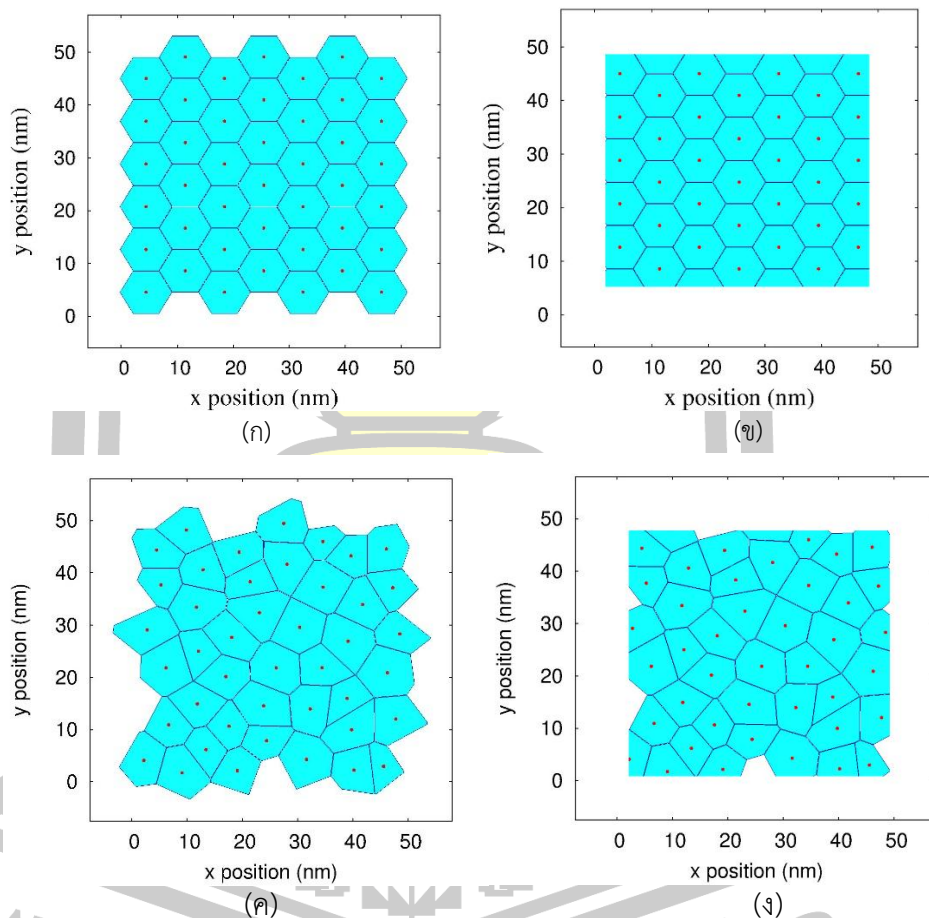


ภาพประกอบ 4.18 การเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่มีการพิจารณา และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบผ่านแบบจำลองเสมือนจริงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่ 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร พบว่าค่า  $H_{EB}$  ของโครงสร้างที่มีการตัดเกรนที่บริเวณขอบของระบบให้ผลที่สอดคล้องกับระบบที่ไม่พิจารณาผลของการเกรนที่บริเวณขอบโดยค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเริ่มคงที่และลดลงเมื่อเกรนมีขนาดเท่ากับ 8 นาโนเมตรและมากกว่าแต่ค่า  $H_{EB}$  มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการตัดเกรนที่บริเวณขอบเนื่องจากปริมาตรของเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างถูกตัดออกไปส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีค่าพลังงานกีดกันที่ลดลงซึ่งนำไปสู่การขาดเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนแม่เหล็กจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนิไทเซชันไว้ได้ ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณ  $H_{EB}$  จึงให้ค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของฟิล์มซึ่งผลการพิจารณาการตัดขอบของโครงสร้างของฟิล์มแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กพบว่าการพิจารณาการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีผลต่อการคำนวณค่าเสถียรภาพทางความร้อนอย่างสูงซึ่งไม่สามารถมองข้ามได้โดยให้ผลของค่า  $H_{EB}$  มีค่าลดต่ำลงนั่นเอง

#### 4.4.2 ผลของการออกแบบการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก

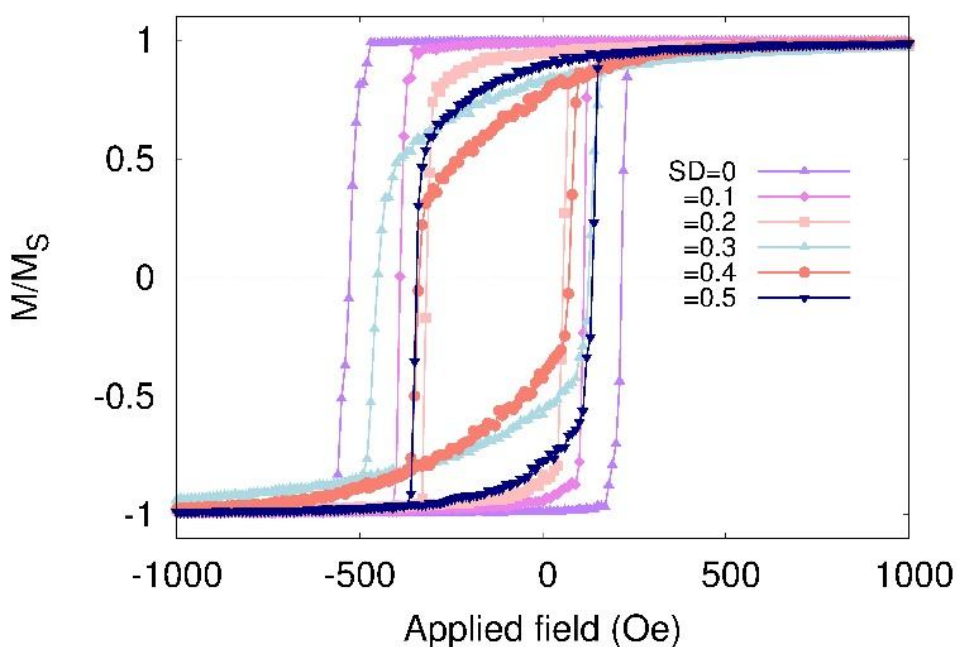
จากหัวข้อ 4.3.2 ได้ทำการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสและทำการแสดงค่าสนามไบอัส แลกเปลี่ยนในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบ ในหัวข้อนี้จะได้ ทำการศึกษาผลของการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับหัวข้อ 4.3.2 สำหรับ โครงสร้างที่ทำการศึกษาได้ทำการจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยที่ถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาผลของการตัดขอบเกรน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างดังภาพประกอบ 4.19



**ภาพประกอบ 4.19** แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอย (ก) การกระจายตัวของเกรนเป็นศูนย์และไม่มีการตัดขอบเกรน (ข) การกระจายตัวของเกรนเป็นศูนย์และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ค) การกระจายตัวของเกรน 0.2 และไม่มีการตัดขอบเกรน (ง) การกระจายตัวของเกรน 0.2 และพิจารณาผลของการตัดเกรน

จากภาพประกอบ 4.19 แสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยโดยได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะระหว่างโครงสร้างที่มีการตัดเกรนและโครงสร้างที่ไม่มีการ

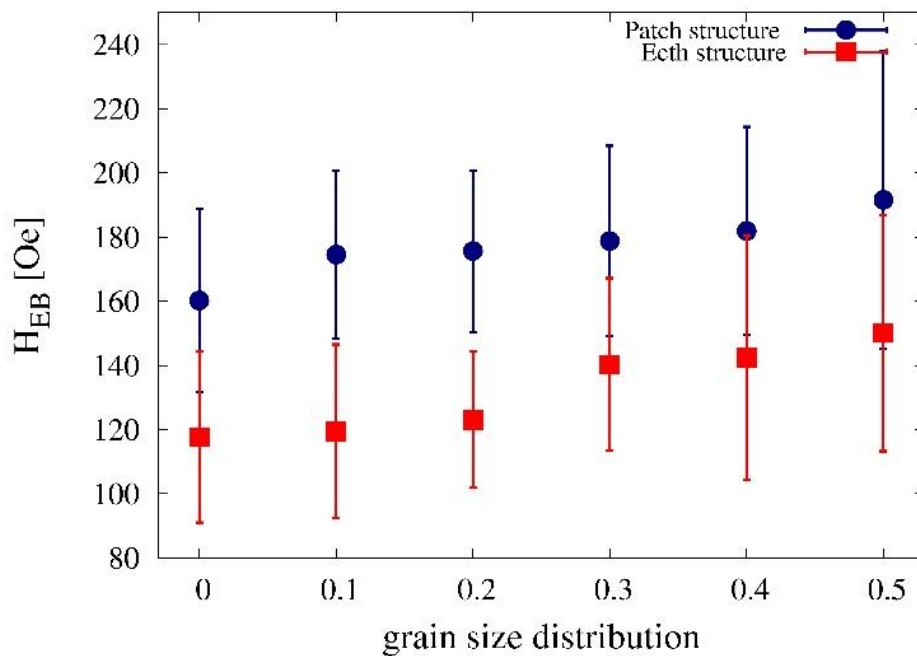
ตัดขอบเกรน สำหรับกรณีที่โครงสร้างไม่มีการกระจายตัวของเกรนพบว่าเกรนภายในระบบมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีขนาดเสมือน แต่เมื่อมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนพบว่าเกรนที่บริเวณขอบถูกตัดออกไปส่งผลเกิดการกระจายตัวของเกรนภายในระบบขึ้นจากผลของการตัดเกรนดังภาพประกอบ 4.19 (ก) และ (ข) สำหรับโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของเกรน 0.2 พบว่าการจัดเรียงตัวของเกรนไม่เป็นระเบียบและเกิดความแตกต่างขนาดของเกรนภายในโครงสร้างแต่เมื่อมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนพบว่าปริมาณของเกรนบางส่วนถูกตัดออกไปดังภาพประกอบ 4.19 (ค) และ (ง) ตามลำดับ จากการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กผ่านโปรแกรมไวโรนอยในกรณีที่ไม่มี การพิจารณาการตัดขอบเกรนจะถูกนำไปคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ค่าการกระจายตัวของเกรน 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ซึ่งสามารถแสดงดังภาพประกอบ 4.20



ภาพประกอบ 4.20 ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดการกระจายตัวของเกรนแตกต่างกันในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบ

จากภาพประกอบ 4.20 แสดงลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเนื่องจากผลของการกระจายตัวของเกรนที่มีการกระจายตัวของเกรน 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 ในกรณีที่โครงสร้างมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันกับกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน โดยพบว่าขนาดของการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีค่าที่สูงขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของการกระจายตัวของเกรน เนื่องจากในกรณีที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกรนเป็นศูนย์เกรนแต่ละเกรนภายในระบบมีขนาดและรูปร่างของเกรนที่สมบูรณ์แต่เกรนดังกล่าวมีปริมาณของเกรนที่ต่ำส่งผลให้เกรน

ขาดเสถียรภาพทางความร้อนนำไปสู่การเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น CoFe และชั้น IrMn ที่ต่ำเช่นเดียวกัน เมื่อการกระจายตัวของเกรนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของเกรนภายในโครงสร้างมากขึ้นกล่าวคือเกรนบางเกรนภายในโครงสร้างมีขนาดที่ลดลงนำไปสู่ลักษณะของรูปร่างปิดที่แคบลง แต่อย่างไรก็ตามเกรนบางเกรนมีขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงนำไปสู่การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นโคบอลต์ไอรอนที่ดีขึ้น ดังนั้นในการฝึกกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น CoFe จำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่สูงขึ้น จากผลการคำนวณรูปร่างปิดฮิสเทอรีซิสข้างต้นจะถูกลำนำไปคำนวณค่า  $H_{EB}$  เนื่องจากผลของการกระจายตัวของเกรนเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  ที่แต่ละค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรนดังแสดงในภาพประกอบ 4.21



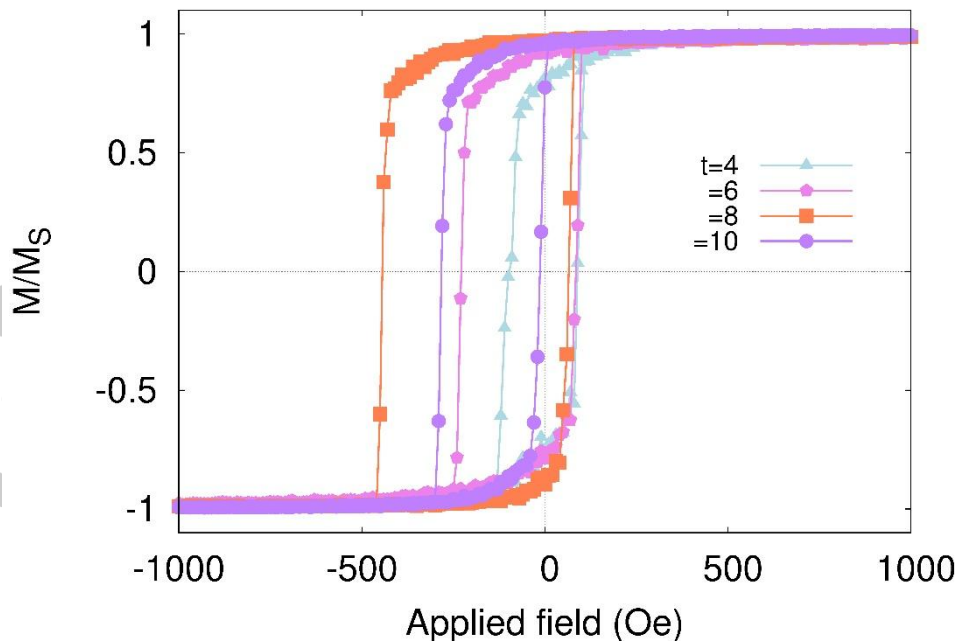
ภาพประกอบ 4.21 การเปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่มีการกระจายตัวของเกรนแตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 4.21 แสดงผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนแตกต่างกันและเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่พิจารณาและไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง แกน x แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและแกน y แทนค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีแดงแทนค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาและกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ตามลำดับ จากการคำนวณค่า  $H_{EB}$  ผ่านแบบจำลองเสมือนจริงในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนให้ผลที่สอดคล้องกับค่า  $H_{EB}$  ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการ

ตัดเกรน โดยค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรน เนื่องจากในกรณีที่ไม่มีกระจายตัวของขนาดของเกรนซึ่งรูปร่างและขนาดของเกรนภายในโครงสร้างเหมือนกันแต่เกรนภายในระบบยังคงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ แต่เมื่อการกระจายตัวของขนาดของเกรนภายในระบบมีค่าสูงขึ้นขนาดและรูปร่างของเกรนมีความแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้เกรนบางเกรนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลงในขณะที่บางเกรนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงส่งผลให้เกิดการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นแม่เหล็ก CoFe ที่สูง ดังนั้นจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น CoFe นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า  $H_{EB}$  นั่นเอง

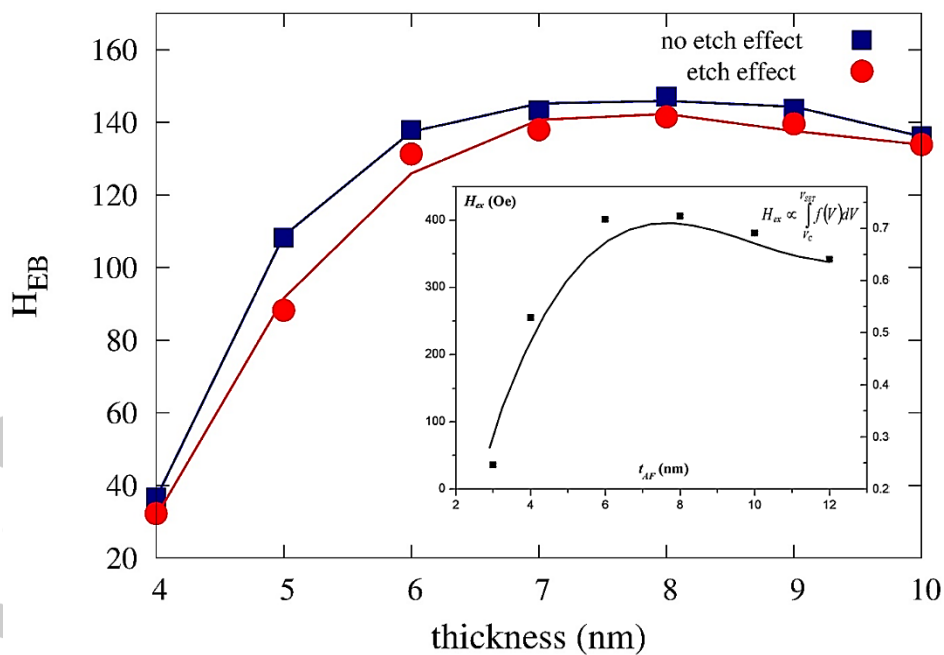
#### 4.4.3 ผลของการออกแบบความหนาของชั้นฟิล์มอริเดียมแมงกานีส

จากหัวข้อ 4.3.3 ได้ทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและค่าสนามไบแอสแลกเปลี่ยนในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบ แต่ในความเป็นจริงการนำเอาฟิล์มแม่เหล็กไปใช้ในหัวอ่านจำเป็นต้องมีการตัดขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษาผลความหนาของชั้นแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีสต่อค่าสนามไบแอสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับหัวข้อ 4.3.3 ผ่านรูปแบบจำลองเสมือนจริงระบบจุลภาคซึ่งสามารถแสดงลักษณะของลูปวงปิดที่ความหนาของชั้น IrMn ตั้งแต่ 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตร ได้ดังภาพประกอบ 4.22



ภาพประกอบ 4.22 ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ความหนาของชั้นอริเดียมแมงกานีสแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบ

จากภาพประกอบ 4.22 แสดงลักษณะการเลื่อนของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสต่อผลของความหนาของชั้น IrMn ที่ความหนาแตกต่างกันในกรณีที่โครงสร้างที่ถูกจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยได้พิจารณาผลของการตัดเกรนที่ชอบ จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสมีความสอดคล้องกับกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ชอบ โดยพบว่าเมื่อความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้วงปิดฮีสเทอรีซิสมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรไปทางด้านแกน  $-x$  มากขึ้น จนกระทั่งที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีความหนาเท่ากับ 8 นาโนเมตรจะให้ค่า  $H_{EB}$  สูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสมีค่าลดลง จากการคำนวณวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแตกต่างกัน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_{EB}$  และความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมกานีสเพื่อนำผลการคำนวณค่า  $H_{EB}$  ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า  $H_{EB}$  ของโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบในหัวข้อที่ 4.3.3 สำหรับผลการเปรียบเทียบค่า  $H_{EB}$  ที่ความหนาของชั้น IrMn แตกต่างกันของทั้งสองลักษณะโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.23



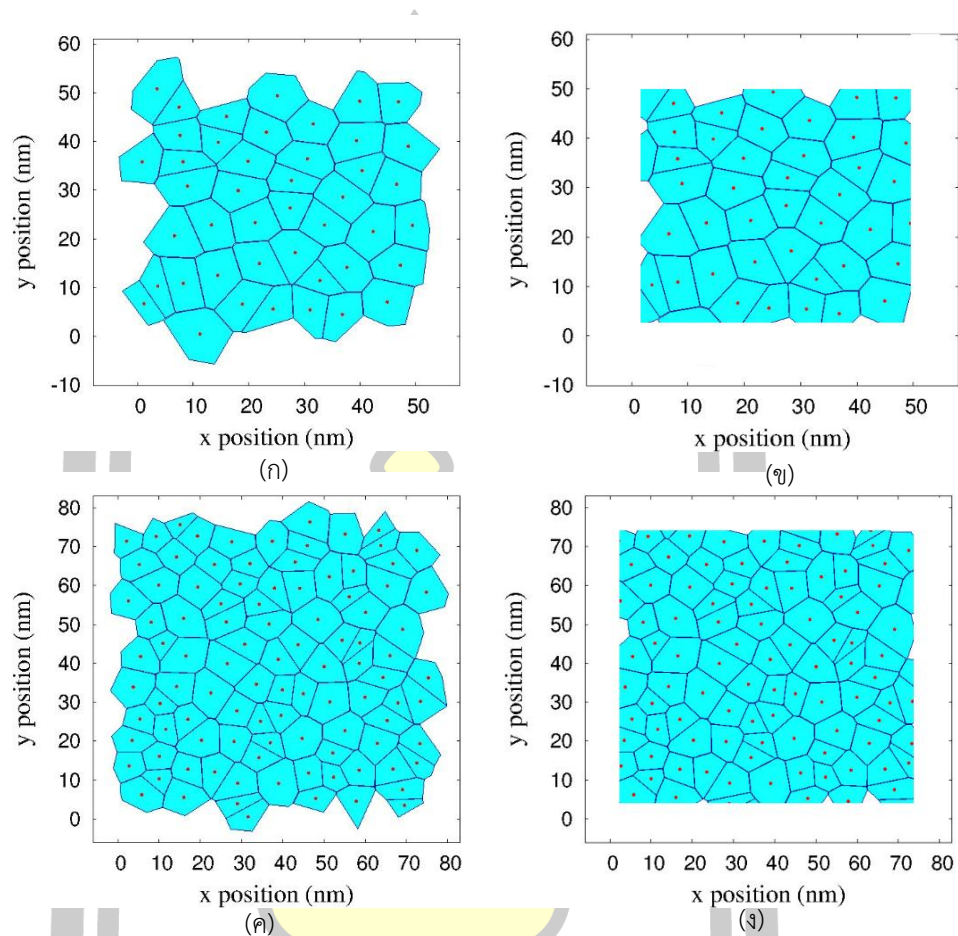
ภาพประกอบ 4.23 การเปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่ความหนาแตกต่างกัน [5]

จากภาพประกอบ 4.23 แสดงผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดของเกรนแตกต่างกันและเปรียบเทียบค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่มี

พิจารณาและไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง แกน  $x$  แสดงความหนาของชั้น IrMn และแกน  $y$  แทนค่า  $H_{EB}$  โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีแดงแทนค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาและกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ตามลำดับ จากผลการคำนวณค่า  $H_{EB}$  ของโครงสร้างที่มีการพิจารณาและไม่มีผลการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ O'grady และคณะ [5] โดยพบว่าค่า  $H_{EB}$  ของโครงสร้างที่มีการตัดเกรนที่บริเวณขอบของระบบให้ผลที่สอดคล้องกับระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการเกรนที่บริเวณขอบโดยค่า  $H_{EB}$  จะมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเท่ากับ 8 นาโนเมตรเนื่องจากเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้น IrMn แต่เมื่อความหนาของชั้น IrMn มีความหนามากกว่า 8 นาโนเมตร พบว่าค่า  $H_{EB}$  เริ่มมีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาเป็นการเพิ่มเพียงปริมาตรของเกรนแม่เหล็กแต่ไม่ได้เพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนส่งผลให้เกรนมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงแต่ไม่ได้ส่งผลให้อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุสูงขึ้น สำหรับค่า  $H_{EB}$  ที่ความหนาของชั้น IrMn ตั้งแต่ 4 5 6 7 8 9 และ 10 นาโนเมตรจะมีค่าต่ำกว่าในโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนเนื่องจากปริมาตรของเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างถูกตัดออกไปส่งผลให้เกรนดังกล่าวมีค่าพลังงานกีดกันที่ลดลงซึ่งนำไปสู่การขาดเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนแม่เหล็กจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไว้ได้ ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณ  $H_{EB}$  จึงให้ค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของฟิล์มซึ่งผลการพิจารณาการตัดขอบของโครงสร้างของฟิล์มแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กพบว่าผลของการพิจารณาการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีผลต่อการคำนวณค่าเสถียรภาพทางความร้อนอย่างสูงซึ่งไม่สามารถมองข้ามได้โดยให้ผลของค่า  $H_{EB}$  มีค่าลดต่ำลง

#### 4.4.4 ผลของการออกแบบขนาดของโครงสร้างของระบบ

จากหัวข้อ 4.3.4 ได้ทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสและค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในกรณีที่โครงสร้างไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบ ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาผลของขนาดของโครงสร้างต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับหัวข้อ 4.3.4 สำหรับโครงสร้างที่ทำการศึกษาได้ทำการจำลองผ่านโปรแกรมไวโรนอยที่ถูกพัฒนาให้สามารถพิจารณาผลของการตัดขอบเกรน ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการจำลองโครงสร้างดังภาพประกอบ 4.24

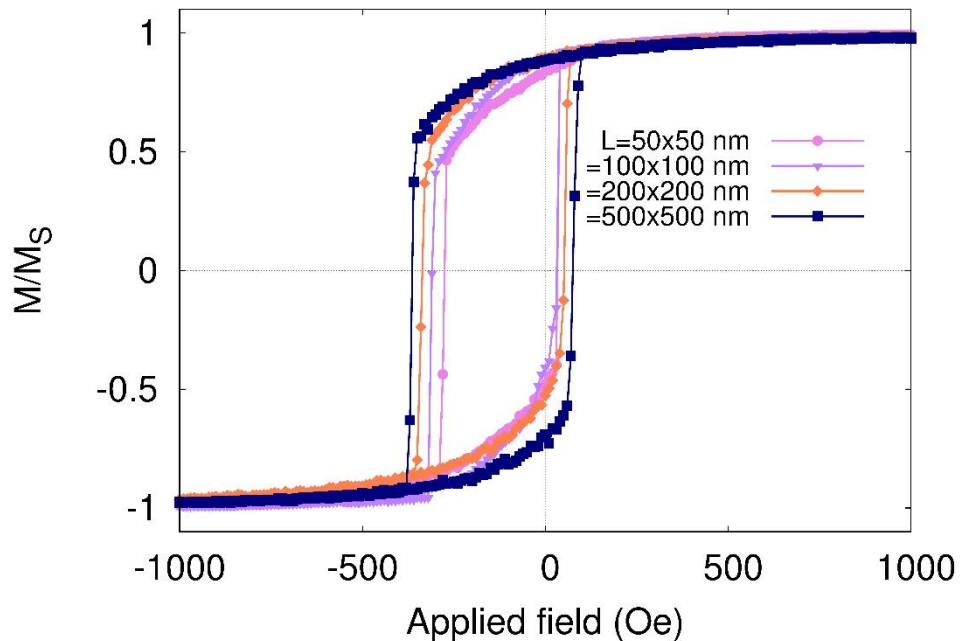


**ภาพประกอบ 4.24** ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรมไวโรนอย (ก) โครงสร้าง  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ข) โครงสร้าง  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ค) โครงสร้าง  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  และไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน (ง) โครงสร้าง  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  และมีการพิจารณาผลของการตัดเกรน

จากภาพประกอบ 4.24 แสดงลักษณะของโครงสร้างที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรมไวโรนอยเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันในกรณีที่พิจารณาและไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน จากการจำลองโครงสร้างที่ขนาด  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  ในกรณีที่ไม่มีการตัดเกรนพบว่าเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีรูปร่างที่สมบูรณ์แต่เมื่อมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนจะเห็นได้ว่าเกรนที่บริเวณขอบจะถูกตัดออกไปส่งผลให้ปริมาตรของเกรนลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 4.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับการจำลองโครงสร้างขนาด  $75 \times 75 \text{ nm}^2$  ในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาและกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.24 (ค) และ (ง) ตามลำดับ จากการจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรมไวโรนอยในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัด

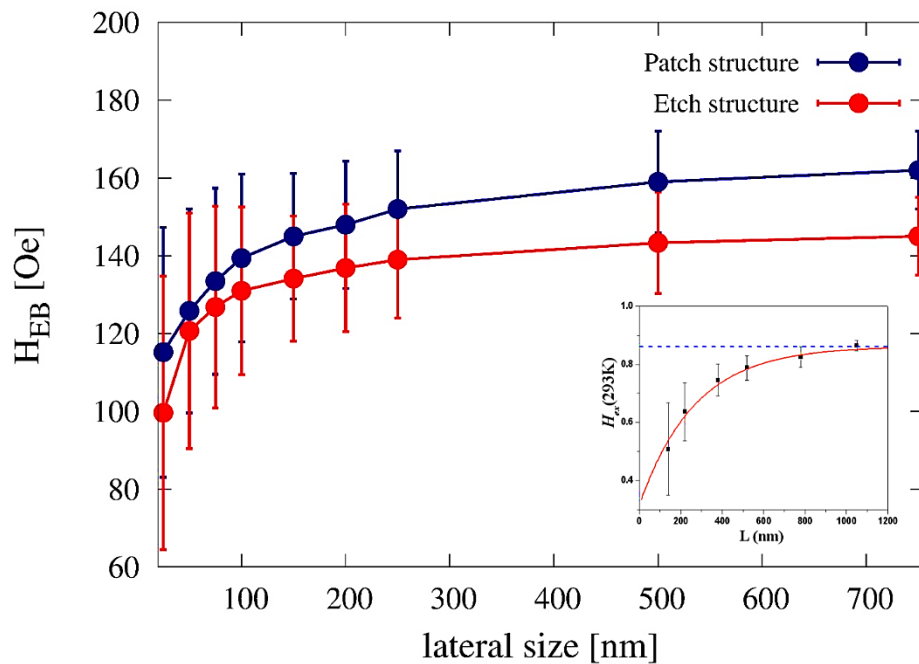


เกรนจะถูกนำไปคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสสำหรับโครงสร้างขนาดตั้งแต่ 25X25 50X50 100X100 200X200 500X500 และ 750X750 nm<sup>2</sup> ซึ่งผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.25



**ภาพประกอบ 4.25** ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่ขอบของโครงสร้าง

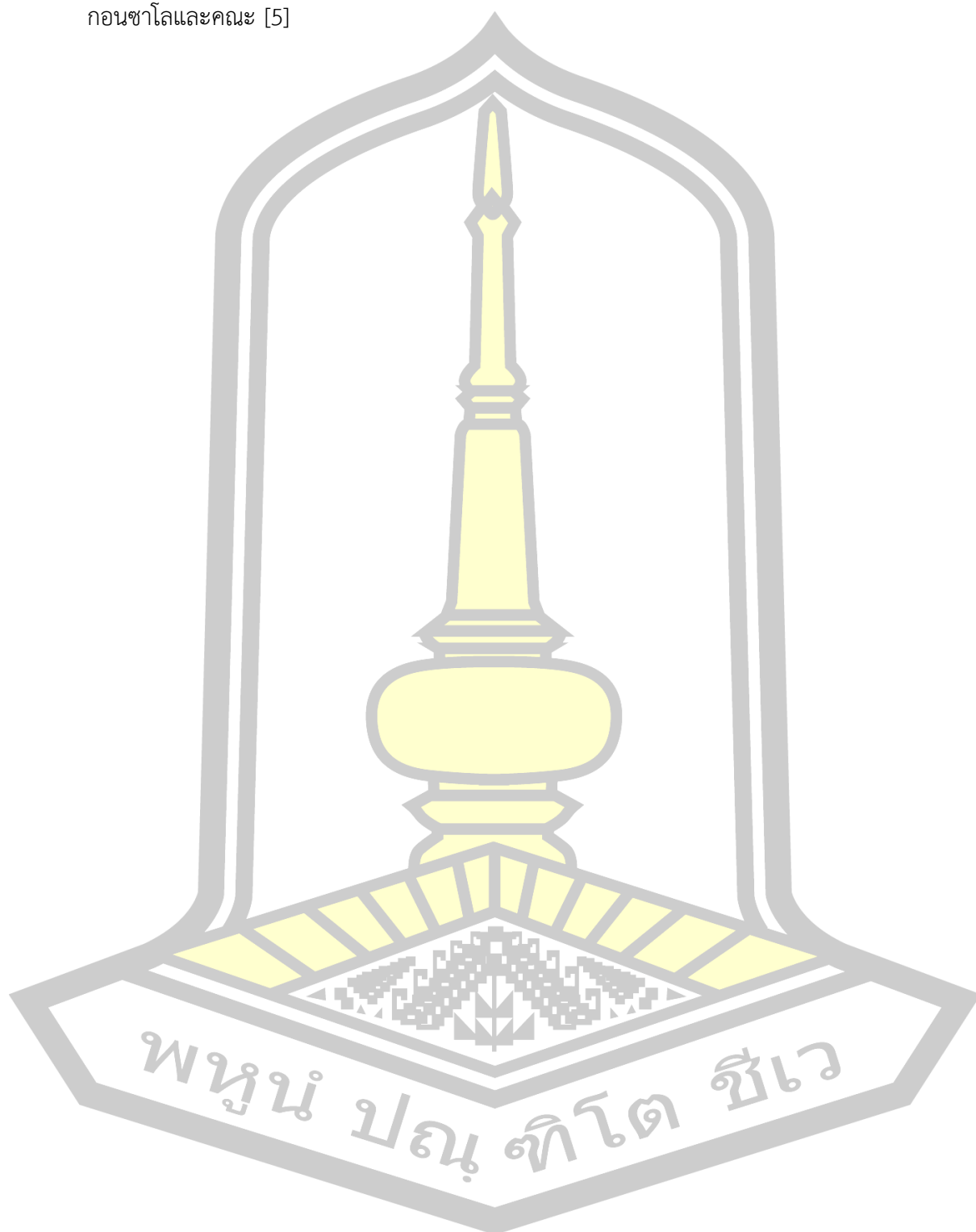
จากภาพประกอบ 4.25 แสดงลักษณะการเลื่อนของวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกันในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรน จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสมีความสอดคล้องกับกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแต่ขนาดของการเคลื่อนที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อโครงสร้างมีขนาดเล็กพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรได้น้อย แต่เมื่อโครงสร้างมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรในทิศแกน  $-x$  ตามการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของโครงสร้างมีขนาดที่ใหญ่พบว่าขนาดของการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสเริ่มมีค่าคงที่ จากการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสข้างต้นจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าสนามไบอัส แลกเปลี่ยนเนื่องจากผลของขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H_{EB}$  และขนาดของโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 4.26



ภาพประกอบ 4.26 การเปรียบเทียบขนาดของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างที่พิจารณาและไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนในกรณีที่ขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน [5]

จากภาพประกอบ 4.26 แสดงผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ขนาดโครงสร้างของระบบแตกต่างกัน โดยแกน x แสดงขนาดของโครงสร้างและแกน y แสดงค่า  $H_{EB}$  เส้นกราฟสีน้ำเงินและเส้นกราฟสีแดงแทนผลการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนกรณีที่ไม่มีการพิจารณาและกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ตามลำดับ จากการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองเสมือนจริงพบว่าค่า  $H_{EB}$  ในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนมีความสอดคล้องกับกรณีที่ไม่มีการตัดเกรนซึ่งจะเห็นได้ว่า  $H_{EB}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงสร้างเนื่องจากในกรณีที่โครงสร้างมีขนาดเล็กเกรนภายในโครงสร้างมีจำนวนน้อยส่งผลให้การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกทำได้ยาก แต่เมื่อขนาดของโครงสร้างมีขนาดใหญ่จำนวนของเกรนภายในโครงสร้างมากขึ้นส่งผลให้จำนวนของเกรนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $H_{EB}$  ของโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนเนื่องจากเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างถูกตัดส่งผลให้ปริมาตรของเกรนลดลงซึ่งนำไปสู่ปัญหาทางด้านเสถียรภาพความร้อนของเกรนจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไว้ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในโครงสร้างที่มีขนาดเล็กยังพบว่าค่า  $H_{EB}$  มีการกระจายตัวที่สูงและการกระจายตัวดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งผลการคำนวณค่า  $H_{EB}$

ผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคในงานวิจัยนี้ในผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ  
กอนซาโลและคณะ [5]



## บทที่ 5

### บทสรุป

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเซนเซอร์หัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากความต้องการในการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาดของหัวอ่านจำเป็นต้องมีขนาดที่ลดลงซึ่งส่งผลให้การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินด้วยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนไม่สามารถทำได้เนื่องจากการลดลงของขนาดของหัวอ่านส่งผลให้โครงสร้างภายในขาดเสถียรภาพทางความร้อนจึงนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยผลของการออกแบบโครงสร้างผ่านแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ สำหรับการศึกษาโครงสร้างที่มีขนาดน้อยกว่า 50 นาโนเมตรเป็นเรื่องที่ทำได้ยากในการทดลองและออกแบบโครงสร้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางแม่เหล็กที่มีความเสมือนจริงเพื่อใช้ในการทำนายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก แต่พบว่าในปัจจุบันแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลมีความไม่เสมือนจริงเนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบของโครงสร้างของหัวอ่าน ดังนั้นจึงนำไปสู่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งสามารถออกแบบลักษณะของโครงสร้างได้อย่างเสมือนจริงผ่านโปรแกรมไวโรนอย นอกจากนี้ผลที่ได้จากการออกแบบโครงสร้างยังได้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริง

#### 5.1 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคซึ่งได้ประยุกต์ขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เรียกว่า setting process ซึ่งช่วยให้สามารถตัดผลของความร้อนในกระบวนการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอรีซิส นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุสองชั้นประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก จากความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุทั้งสองประเภทวัสดุโดยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ง่ายในการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อนวิธีการที่เหมาะสมในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันคือสมการแลนดาว์น ลิฟต์ซิทซ์ กิลเบิร์ต (LLG) ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุที่ยากต่อการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันเนื่องจากมีค่าแอนไอโซโทรปีที่สูงโดยวิธีที่ใช้อธิบาย

พลวัตของแมกนีโทเซชันคือวิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kMC) จากรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้ นำเสนอจะถูกนำไปศึกษาผลของการออกแบบโครงสร้างด้วยการควบคุมพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ ขนาดของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน การกระจายตัวขนาดของเกรนและผลของการ ตัดเกรนที่บริเวณขอบของระบบ เป็นต้น

จากการศึกษาผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคในการออกแบบ โครงสร้างแม่เหล็ก AF/FM ที่มีขนาดลดลงจะส่งผลโดยตรงต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งมีผลต่อ การยึดทิศทางของชั้นพินในหัวอ่านข้อมูล โดยพบว่าเมื่อขนาดของโครงสร้างที่ลดลงจะส่งผลให้ค่า สนามไบอัสแลกเปลี่ยนมีค่าลดลงและเกิดการกระจายตัวของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่สูงขึ้น การศึกษาผลของการเลือกวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้ในการลือทิศทางของแมกนีโทเซชันในชั้นพินที่ สูงขึ้น นอกจากนี้ผลของการลดขนาดของโครงสร้างยังส่งผลกระทบต่อปัจจัยในการเตรียม ชั้นฟิล์มแม่เหล็กซึ่งผลเหล่านี้จะส่งผลในเรื่องของการตัดเกรนที่บริเวณขอบ โดยพบว่าการตัดเกรนที่ บริเวณขอบฟิล์มจะส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนลดลงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่ง รูปแบบทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการจำลอง โครงสร้างวัสดุ AF/FM ที่มีผลของการตัดเกรนที่บริเวณขอบฟิล์มได้อย่างเสมือนจริงโดยผลการ คำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกับทางทฤษฎีและการทดลองและสามารถนำไปประยุกต์ใช้และทำนาย ผลของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลได้จริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการคำนวณผ่านแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคที่ได้ถูกนำเสนอใน งานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือโดยให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการทดลองและทฤษฎี นอกจากนี้แล้ว ปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนหรือคุณสมบัติของหัวอ่านยังมีหลายปัจจัยที่จะต้อง ทำการศึกษาเพิ่มเติม อาทิเช่น ผลของค่าอุณหภูมิก็ดกัน ผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของ วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เพื่อให้การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในโครงสร้างสปินวาล์วสำหรับหัวอ่านข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาผลของค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็ก ขนาดใหญ่ในลำดับถัดไป

บรรณานุกรม



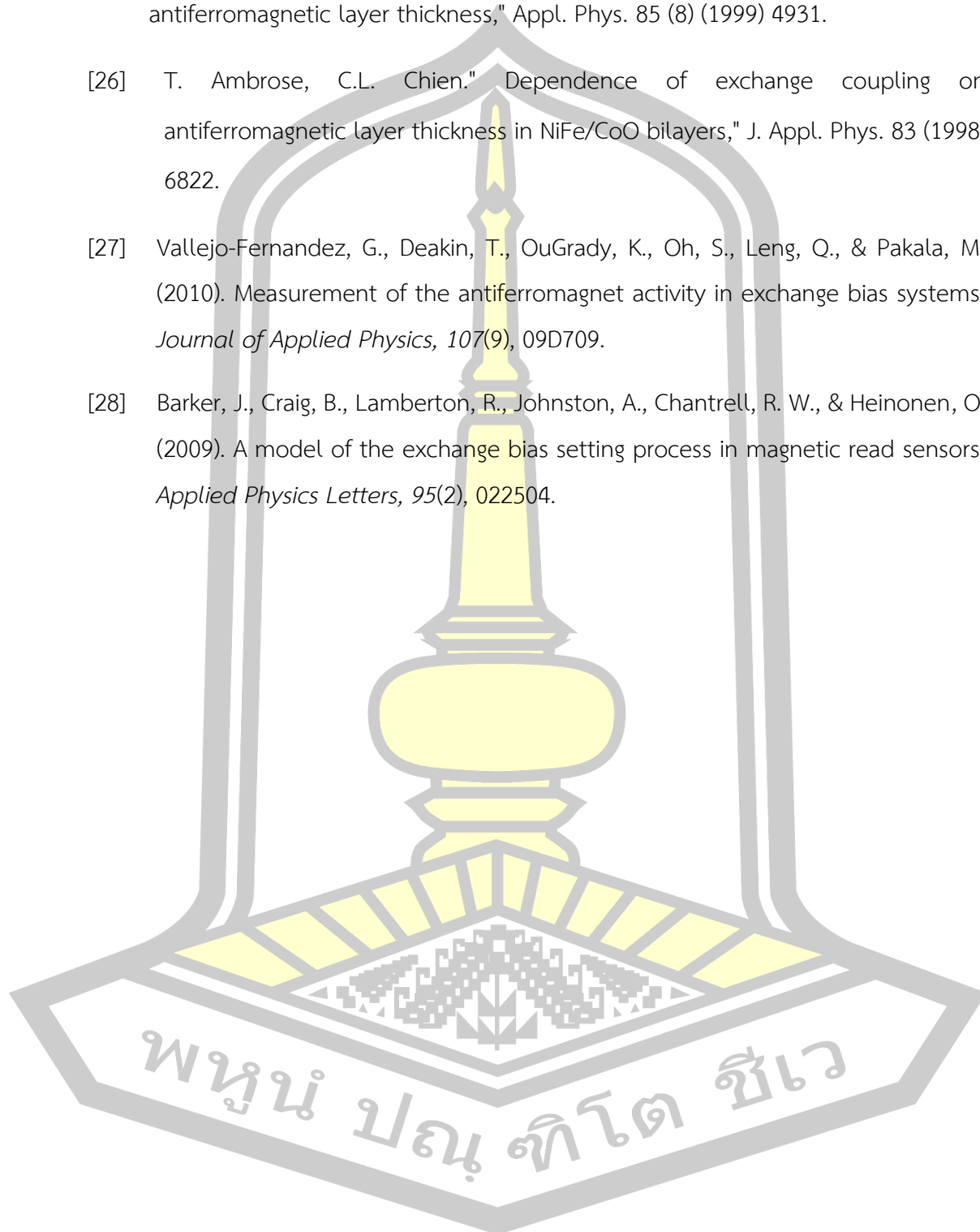
## บรรณานุกรม

- [1] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, "New magnetic anisotropy," *Phys. Rev.*, vol. 102, no. 3, pp. 1413–1414, 1956.
- [2] M. N. Baibich *et al.*, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 21, pp. 2472–2475, 1988.
- [3] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange," *Phys. Rev. B*, vol. 39, no. 7, pp. 4828–4830, 1989.
- [4] J. Nogués and I. K. Schuller, "Exchange bias," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 192, no. 2, pp. 203–232, 1999.
- [5] G. Vallejo-Fernandez and J. N. Chapman, "Size effects in submicron exchange bias square elements," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 26, 2009.
- [6] D. Fleisch, *A Student's Guide to Maxwell's Equations*, vol. XXXIII, no. 2. 2012.
- [7] W. Callister and D. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, vol. 94. 2007.
- [8] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials (2nd Edition)*, vol. 12, no. 3. 2009.
- [9] J. H. Van Vleck, "On the anisotropy of cubic ferromagnetic crystals," *Phys. Rev.*, vol. 52, no. 11, pp. 1178–1198, 1937.
- [10] E. D. Boerner, O. Chubykalo-Fesenko, O. N. Mryasov, R. W. Chantrell, and O. Heinonen, "Moving toward an atomistic reader model," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 936–940.
- [11] 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, no. 6, 2016.
- [12] L. Néel, "Theorie du trainage magnetique des ferromagnetiques en grains fins avec applications aux terres cuites," *Ann. Geophys.*, vol. 5, pp. 99–136, 1949.
- [13] A. Lyberatos, D. V. Berkov, and R. W. Chantrell, "A method for the numerical simulation of the thermal magnetization fluctuations in micromagnetics," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 5, no. 47, pp. 8911–8920, 1993.

- [14] J. L. García-Palacios and F. J. Lázaro, “Langevin-dynamics study of the dynamical properties of small magnetic particles,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 58, no. 22, pp. 14937–14958, 1998.
- [15] P. Chureemart, *atomistic modelling of magnetic material*. mahasarakham, 2017.
- [16] 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, no. 8, pp. 883–899, 2010.
- [17] R. W. Chantrell, N. Walmsley, J. Gore, and M. Maylin, “Calculations of the susceptibility of interacting superparamagnetic particles,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 63, no. 2, pp. 1–14, 2001.
- [18] C. Tannous and J. Gieraltowski, “The Stoner-Wohlfarth model of ferromagnetism,” *Eur. J. Phys.*, vol. 29, no. 3, pp. 475–487, 2008.
- [19] H. Pfeiffer, “Determination of anisotropy field distribution in particles assemblies taking into account thermal fluctuations,” *Phys. Status Solidi*, vol. 118, pp. 295–306, 1990.
- [20] M. El-Hilo, K. O’Grady, R. W. Chantrell, and D. P. E. Dickson, “Time dependent magnetisation in systems with distributed energy barriers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 123, pp. 30–34, 1993.
- [21] C. Kittel, “Theory of the structure of ferromagnetic domains in films and small particles,” *Phys. Rev.*, vol. 70, no. 11–12, pp. 965–971, 1946.
- [22] 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, no. 12, pp. 1–8, 2011.
- [23] 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, no. 7, 2008.
- [24] 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, no. 10, pp. 3869–3872, 2009.



- [25] H. Sang, Y.W. Du, C.L. Chien., J.", Exchange coupling in bilayer: Dependence on antiferromagnetic layer thickness," *Appl. Phys.* 85 (8) (1999) 4931.
- [26] T. Ambrose, C.L. Chien." Dependence of exchange coupling on antiferromagnetic layer thickness in NiFe/CoO bilayers," *J. Appl. Phys.* 83 (1998) 6822.
- [27] Vallejo-Fernandez, G., Deakin, T., OuGrady, K., Oh, S., Leng, Q., & Pakala, M. (2010). Measurement of the antiferromagnet activity in exchange bias systems. *Journal of Applied Physics*, 107(9), 09D709.
- [28] Barker, J., Craig, B., Lamberton, R., Johnston, A., Chantrell, R. W., & Heinonen, O. (2009). A model of the exchange bias setting process in magnetic read sensors. *Applied Physics Letters*, 95(2), 022504.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวิวัฒน์ สังฆะพิลา
วันเกิด	วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	90 หมู่ 9 ตำบลเหนือเมือง อำเภอเมืองร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด 45000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนชติยะวงษา จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2560 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย

พูนัน ปณุกิตโต ชีวะ