



การศึกษาไมโครแมกเนติกของหัวอ่านชนิดไอแอนท์แมกนีโตรีชีสทีฟ



โดย  
นางสาวดวงพร เล้าทวีทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาไมโครแมกเนติกของหัวอ่านชนิดใจแอนท์แมกนีโตรีชีสทีฟ



โดย  
นางสาวดวงพร เล้าทวีทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

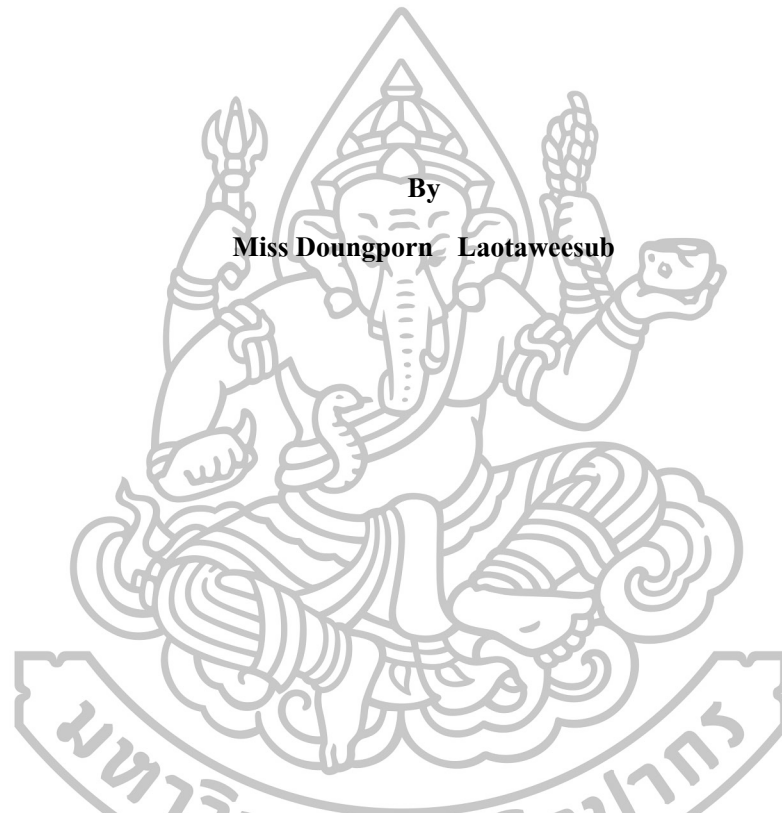
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MICROMAGNETIC STUDIES OF GIANT MAGNETORESISTIVE READ HEADS**



**By  
Miss Doungporn Laotaweesub**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree**

**Master of Science Program in Physics**

**Department of Physics**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาไมโครแมกเนติกของหัวอ่านชนิดใจแอนท์แมกนีโตรีซีส์ทีฟ” เสนอโดย นางสาวดวงพร เล้าทวีทรัพย์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.บดินทร์ ดำรงศักดิ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนก หวลคำเน็ด)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัสริยา ดำรงศักดิ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บดินทร์ ดำรงศักดิ์)

...../...../.....



55306203 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : ไมโครแมกเนติก/ ใจแอนท์แมกนีโตริซิสแตนท์

ดวงพร เล้าทวีทรัพย์ : การศึกษาไมโครแมกเนติกของหัวอ่านชนิดใจแอนท์แมกนีโตริซิสตีฟ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ. ดร. บดินทร์ คำรงค์ดี. 112 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านใจแอนท์แมกนีโตริซิสตีฟ (giant magnetoresistive, GMR) ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF) โดยการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ต่อความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกแสดงผลในรูปของ M-H loop และ R-H loop โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ free layer ต่อประสิทธิภาพการทำงานของ GMR ตัวแปรที่น่าสนใจในการศึกษานี้ได้แก่ ความหนาของ free layer ความเข้มของสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสและวัสดุแม่เหล็กต่างชนิดที่ใช้ในชั้น free layer โดยทดลองการทดลองใช้หัวอ่าน GMR ที่มีโครงสร้าง CoFe/Cu/CoFe เป็นตัวอย่างในการทดสอบยกเว้นการทดลองที่ชั้น free layer ทำจากวัสดุแม่เหล็กอ่อนต่างชนิดกันซึ่งเป็นโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กนิกเกิล-เหล็กโคบอลต์-ซิลิคอน-โบรอน และโคบอลต์-เหล็ก-ซิลิคอน-โบรอน จากผลการจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาและสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสที่ให้แก่ free layer ส่งผลต่อความกว้างฮิสเตอรีซิสลูปของ free layer โดยเมื่อความหนาของ free layer ลดลงจะส่งผลให้ความกว้างฮิสเตอรีซิสลูปของ free layer แคบลง และเมื่อเพิ่มสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสที่ให้แก่ free layer มากขึ้น ความกว้างฮิสเตอรีซิสลูปของ free layer จะมีค่าลดลง ทำให้การตอบสนองของหัวอ่าน GMR ที่ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นนอกจากนั้นพบว่าชั้น free layer ซึ่งสร้างจากโลหะผสมโคบอลต์-เหล็กสามารถถูกแทนที่ได้ด้วยวัสดุแม่เหล็กอ่อนชนิดอื่น จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีต่ำทำให้หัวอ่าน GMR มีการตอบสนองดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงการตอบสนองที่เป็นแบบเชิงเส้นและความไวในการตอบสนองโดยโลหะผสม นิกเกิล-เหล็กทำให้หัวอ่าน GMR มีความไวในการตอบสนองสูงกว่าวัสดุแม่เหล็กชนิดอื่น แต่ช่วงการตอบสนองแบบเชิงเส้นจะแคบลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโลหะผสมชนิดอื่น

ภาควิชาฟิสิกส์

ลายมือชื่อนักศึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

55306203 : MAJOR : (PHYSICS)

KEY WORD : MICROMAGNETIC/ GIANT MAGNETORESISTANCE

DOUNGORN LAOTAWEE SUB : MICROMAGNETIC STUDIES OF GIANT  
MAGNETORESISTIVE READ HEADS. THESIS ADVISOR : BADIN DAMRONGSAK, Ph.D..  
112 pp.

In this thesis, the performance of giant magnetoresistive (GMR) read heads was investigated using micromagnetic simulations in the Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF). The response of GMR heads as a function of the intensity of the external magnetic field was determined using M-H and R-H hysteresis loops. This work aims to study the influence of a free layer on GMR performance. Three parameters, including the thickness of a free layer, the intensity of exchange bias field and different materials used for a free layer, were of interest. Almost all experiments were conducted using GMR read heads with the CoFe/Cu/CoFe structure as a test sample, excepting the last experiment where the free layer was made of different soft magnetic alloys – cobalt-iron, nickel-iron, cobalt-silicon-boron and cobalt-iron-silicon-boron alloys. Simulation results revealed that both thickness variations in the free layer and bias field affect the width of free layer hysteresis. A decrease in the free layer thickness results in relatively narrow width of free layer hysteresis. In addition, the higher the exchange bias field was applied to the free layer, the narrower the width of free layer hysteresis was, making the response of the GMR read heads linearly dependent to the external magnetic field. Instead of cobalt-iron alloys as a free layer, other magnetic materials can be employed as a free layer in GMR read heads. Simulations revealed that the soft magnetic materials with lower coercivity improve the response of the GMR read heads, especially in the dynamic range and the sensitivity. Nickel-iron alloys provide relatively higher GMR sensitivity; however, its dynamic range is slightly narrower compared with those of other alloys.

---

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความกรุณาของอาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย และคอยให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จครบถ้วนสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนก หวลกำเนิด ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน สำหรับกำลังใจ แรงผลักดัน และความสนับสนุนในด้านต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ ให้คำปรึกษาด้าน โปรแกรม คำปรึกษาด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ และคอยให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ให้ความช่วยเหลือให้ผู้วิจัยได้รับความสำเร็จทางการศึกษานี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน.....	4
2.1.1 สนามแม่เหล็ก.....	4
2.1.2 แมกเนติกไดโพลโมเมนต์.....	6
2.1.3 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก.....	6
2.1.4 สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็ก .....	7
2.1.5 สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก .....	8
2.1.6 สภาวะแม่เหล็กของวัสดุ.....	8
2.1.6.1 ไดอามแมกเนติก .....	8
2.1.6.2 พาราแมกเนติก.....	9
2.1.6.2 เฟอร์โรแมกเนติก .....	10
2.1.6.2 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	11
2.1.6.2 เฟอร์รีแมกเนติก.....	12
2.1.7 ฮิสเตอร์ีซิสลูป .....	12
2.1.8 วัสดุแม่เหล็ก .....	12



บทที่	หน้า
2.2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ .....	14
2.2.1 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ .....	14
2.2.2 ส่วนประกอบหลักในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ .....	15
2.2.2.1 แผ่นดิสก์ .....	16
2.2.2.2 แขนหัวอ่าน/เขียน .....	16
2.2.2.3 มอเตอร์หมุนจานแม่เหล็ก .....	16
2.2.2.4 แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ .....	16
2.2.2.5 หัวอ่าน/เขียน .....	16
2.3 เทคโนโลยีหัวอ่าน .....	17
2.3.1 ไจแอนท์แมกนีโตริซิสแตนซ์ .....	17
2.3.2 ทัลเนลลิงแมกนีโตริซิสแตนซ์ .....	19
2.4 ไมโครแมกเนติก .....	22
2.4.1 การหมุนรอบแกนกลาง .....	23
2.4.2 สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ .....	24
2.4.3 สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต .....	25
2.4.4 สนามแม่เหล็กยังผล .....	26
2.4.4.1 สนามซีแมน .....	26
2.4.4.2 สนามแอนไอโซโทรปี .....	27
2.4.4.2.1 สนามแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดี่ยว .....	28
2.4.4.2.1 สนามแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ .....	29
2.4.4.3 สนามเอ็กซ์เชนจ์ .....	30
2.4.4.4 สนามดีแมกนีไทเซชัน .....	32
2.5 สนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส .....	34
3 การจำลองไมโครแมกเนติก .....	37
3.1 โครงสร้างของหัวอ่านGMR .....	37
3.2 การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF .....	38
3.3 การศึกษาทิศทางของแมกนีไทเซชันจากกราฟฮิสเตอร์ิซิสลูป .....	42
3.4 ความต้านทานที่เปลี่ยนไปของหัวอ่าน GMR .....	44

บทที่	หน้า
3.4.1	45
3.4.2	45
3.4.3	47
3.5	51
3.5.1	51
3.5.2	53
3.5.3	55
3.5.3	57
3.5.3	59
4	61
4.1	61
4.2	67
4.2.1	68
4.2.2	75
4.3	79
5	85
รายการอ้างอิง	90
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก	96
ภาคผนวก ข	107
ประวัติผู้วิจัย	112

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3d ของเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล.....	10
3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก.....	38
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR.....	62
4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม CoFe NiFe CoSiB และ CoFeSiB.....	80



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของหัวอ่าน GMR.....	1
2.1	สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบแท่งแม่เหล็ก.....	5
2.2	โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการโคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเอง.....	6
2.3	การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุไดอะแมกเนติก.....	9
2.4	การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุพาราแมกเนติก.....	9
2.5	การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก.....	11
2.6	การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	11
2.7	การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุเฟอร์ริแมกเนติก.....	12
2.8	ฮิสเตอร์ิซิสลูปของเฟอร์โรแมกเนติก.....	12
2.9	ฮิสเตอร์ิซิสลูปของวัสดุแม่เหล็กอ่อนและวัสดุแม่เหล็กแข็ง.....	14
2.10	เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	15
2.11	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	15
2.12	โครงสร้างพื้นฐานของ GMR.....	17
2.13	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสปินผ่านชั้นฟิล์มแม่เหล็ก.....	19
2.14	ความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down.....	20
2.15	การเคลื่อนที่ผ่านชั้นจนวนแม่เหล็กของอิเล็กตรอน.....	21
2.16	การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กยังผล.....	26
2.17	พลังงานที่ผิวกรณีแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว.....	29
2.18	พลังงานที่ผิวกรณีแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์.....	30
2.19	ทิศทางการเกิดสนามดีแมกนีไทเซชัน.....	34
2.20	ฮิสเตอร์ิซิสลูปของเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากผลของสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส.....	35
2.21	การเปลี่ยนแปลงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของชั้นเฟอร์โรแมกเนติก ที่บริเวณรอยต่อของ FM/AFM.....	36
3.1	แบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR.....	37
3.2	ฮิสเตอร์ิซิสลูปที่เกิดจากการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR.....	42
3.3	การเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของ GMR เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กในแนวแกน y ขนาด 400 mT -32 mT -40 mT -132 mT -136 mT -8 mT 80 mT และ 88 mT.....	43

ภาพที่	หน้า
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (R-H loop) ของหัวอ่าน GMR.....	50
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานเอ็กซ์เชนจ์เฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL กับ สนามแม่เหล็กภายนอก.....	52
3.6 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ที่สัมพันธ์กับ พลังงานเอ็กซ์เชนจ์เฉลี่ยกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้หัวอ่าน GMR .....	53
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแอนไอโซโทรปีเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL ต่อ สนามแม่เหล็กภายนอก.....	54
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานซีแมนเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL กับ สนามแม่เหล็กภายนอก.....	56
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดิแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL กับ สนามแม่เหล็กภายนอก.....	58
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมเฉลี่ยของหัวอ่าน GMR กับสนามแม่เหล็กภายนอก ...	60
4.1 โครงสร้างของ GMR ที่ใช้ในการจำลอง .....	62
4.2 M-H loop ของหัวอ่าน GMR เมื่อชั้น FL มีความหนา 3 nm.....	63
4.3 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น FL มีความหนา 3 nm.....	63
4.4 M-H loop ของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL มีความหนา 1 nm 2 nm 4 nm และ 5 nm.....	65
4.5 R-H loop ของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL มีความหนา 1 nm 2 nm 4 nm และ 5 nm .....	66
4.6 ความกว้างของฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนา .....	67
4.7 โครงสร้างของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลองสนามแม่เหล็กไบอัส.....	68
4.8 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสจาก ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก .....	69
4.9 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสจาก ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก .....	69
4.10 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสขนาด 50 mT.....	70
4.11 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสขนาด 50 mT.....	71

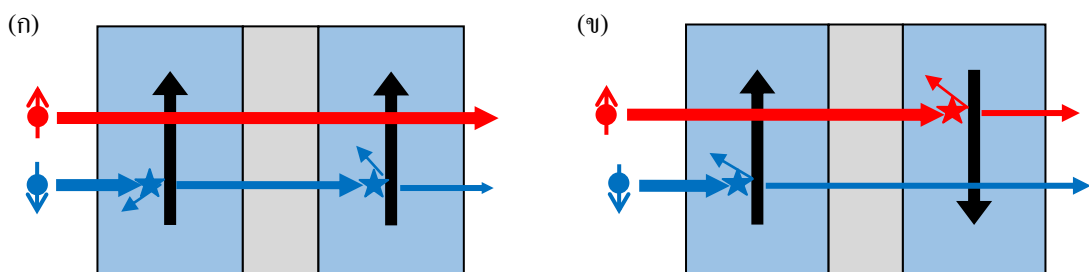
ภาพที่	หน้า
4.12 M–H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT.....	72
4.13 R–H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT.....	73
4.14 สนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่ส่งผลต่อค่าโคเออร์ซิวิตี และความกว้างของฮิสเทอรีซิสลูป 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT.....	74
4.15 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL ได้รับ สนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT.....	75
4.16 M–H loop ของ GMR ที่ชั้น FL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT.....	77
4.17 R–H loop ของ GMR ที่ชั้น FL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT.....	78
4.18 ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัส.....	79
4.19 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม CoFe.....	81
4.20 M–H loop ของ หัวอ่าน GMR เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม NiFe CoSiB และ CoFeSiB.....	82
4.21 R–H loop ของ หัวอ่าน GMR เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม NiFe CoSiB และ CoFeSiB.....	83
4.22 ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ในประเทศไทยมีการขยายตัวมากขึ้น โดยส่วนมากจะเป็นการประกอบ การวัด และการทดสอบ มีส่วนน้อยที่เป็นงานด้านวิจัย โดยประเทศไทยมีความเชี่ยวชาญทางงานควบคุม งานที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณ งานประกอบ แต่ยังคงขาดความรู้ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในเรื่องหัวบันทึกแม่เหล็ก (magnetic recording heads) โดยเราจะเน้นไปที่ส่วนของหัวอ่าน (read head) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (giant magnetoresistance, GMR) ถูกค้นพบในปี 1988 โดย Albert Fert [1] และ Peter Grunberg [2] โดยเทคโนโลยีแบบไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์จะสร้างขึ้นจากวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยชั้นของฟิล์มบางเฟอร์โรแมกเนติก 2 ชั้นถูกกั้นกลางด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนแม่เหล็ก ชั้นเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรก เรียกว่าชั้น pinned layer (PL) โดยที่แมกนีไทเซชัน  $M_1$  จะมีทิศทางที่ซึ่งใช้ในการอ้างอิงเพื่อวัดสนามแม่เหล็ก ชั้นเฟอร์โรแมกเนติกชั้นที่สอง เรียกว่าชั้น free layer (FL) ทิศทางแมกนีไทเซชัน  $M_2$  สามารถเปลี่ยนไปตามสนามแม่เหล็กจึงเป็นชั้นที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก เมื่อหัวอ่านชนิด GMR อยู่ในสนามแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันของวัสดุจะเปลี่ยนไป ถ้าแมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้นจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันตามสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากขึ้น วัสดุจึงมีความต้านทานลดลง แต่ถ้าแมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงข้ามกัน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อยลง วัสดุจึงมีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของหัวอ่าน GMR ที่ (ก) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางเดียวกัน (ข) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางตรงข้ามกัน

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในหัวอ่าน GMR จึงได้มีการนำโมเดลทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติกโดยอาศัยสมการแลนดา-ลิฟทิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau–Lifshitz– Gilbert equation, LLG) [3] เพื่อคำนวณการจัดเรียงแมกนีไทเซชันของหัวอ่าน GMR ที่สถานะสมดุลในแต่ละช่วงเวลา แบบจำลองไมโครแมกเนติกสามารถใช้เพื่อยืนยันผลการทดลอง รวมถึงใช้วิเคราะห์สาเหตุที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง นอกจากนี้แบบจำลองไมโครแมกเนติกยังสามารถใช้ทำนายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวอ่าน GMR ที่ออกแบบขึ้นก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์นั้นจริง แบบจำลองไมโครแมกเนติกจึงเป็นเครื่องมือสำคัญชิ้นหนึ่งที่นอกจากช่วยสร้างความเข้าใจพฤติกรรมทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกิดขึ้นแล้วยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติในการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งแสดงผลในรูปของฮิสเทอรีซิสลูป (M–H loop) [4] และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของ GMR ที่เปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กภายนอก (R–H loop) [5] ด้วยโปรแกรม Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF) [6] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย NIST เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR ที่เกิดจากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความหนาของชั้น free layer สนามแม่เหล็กไบอัสเพื่อตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น pinned layer และ free layer ตามลำดับ และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้าง GMR

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์แม่เหล็กของหัวอ่านไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กเอ็กซเทิร์นจ่อประสิทธิภาพของหัวอ่านไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์
3. เพื่อศึกษาผลของชั้น free layer ต่อประสิทธิภาพของหัวอ่านไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

หัวอ่านชนิดไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ GMR ประกอบด้วยชั้นเฟอร์โรแมกเนติก (ชั้น free layer และชั้น pinned layer) ชั้นฉนวนแม่เหล็ก และชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL จะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลง



ความต้านทานของหัวอ่าน GMR โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้น FL ซึ่งมีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลกระทบของชั้น FL ได้แก่ ความหนา วัสดุที่ใช้ และการไบอัสด้วยสนามเอ็กซ์เชนจ์ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพของหัวอ่านแบบ GMR โดยใช้โปรแกรม Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR จะพิจารณาจากกราฟ M-H loop และ R-H loop ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ พารามิเตอร์ที่สนใจในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความหนาของชั้น FL สนามแม่เหล็กไบอัสเพื่อตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL และวัสดุที่ใช้สร้างหัวอ่าน GMR

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF สามารถใช้ในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัวอ่าน GMR ได้
2. การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF สามารถใช้เพื่อการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากความหนาของชั้นเฟอร์โรแมกเนติก สนามแม่เหล็กไบอัส พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ และพลังงานแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเฟอร์โรแมกเนติกที่ใช้สร้างหัวอ่าน GMR

## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในยุคปัจจุบัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลในรูปแบบแม่เหล็กที่มีความสำคัญ ซึ่งมีจุดเด่นคือมีความจุข้อมูลสูง การเข้าถึงข้อมูลรวดเร็ว และราคาถูก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงมีการใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย เช่น กล้องดิจิทัล ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบพกพา ระบบฐานข้อมูลต่างๆ เป็นต้น การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่หรือการเพิ่มความจุของข้อมูลจึงเป็นปัญหาที่ภาคอุตสาหกรรม และนักวิจัยได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สอดคล้องกับความต้องการในปัจจุบัน

เทคโนโลยีสำคัญที่ทำให้มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความหนาแน่นในการจุข้อมูลมากขึ้นก็คือการค้นพบเทคโนโลยีหัวอ่านที่ใช้ผลของปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสทีฟ (magnetoresistive: MR) ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นเทคโนโลยีหัวอ่านที่เรียกว่า หัวอ่านแบบไจแอนท์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (giant magnetoresistance: GMR) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหัวอ่านที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากหัวอ่าน GMR เป็นเทคโนโลยีที่มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (Media) ทำให้หัวอ่านสามารถอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กได้ และมีอัตราของข้อมูลที่อ่านได้สูง

ในบทนี้เราจึงกล่าวถึงทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้องซึ่งจะแบ่งออกเป็นทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โครงสร้าง และส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เทคโนโลยีหัวอ่านซึ่งกล่าวถึงเทคโนโลยีหัวอ่านแบบไจแอนท์แมกนีโตรซิสแตนซ์ และทลเนลลิงแมกนีโตรซิสแตนซ์ และการจำลองไมโครแมกเนติก โดยอาศัยสมการแลนเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation, LLG) ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละช่วงเวลาเมื่อหัวอ่าน GMR ถูกกระตุ้นโดยสนามแม่เหล็กจากภายนอก

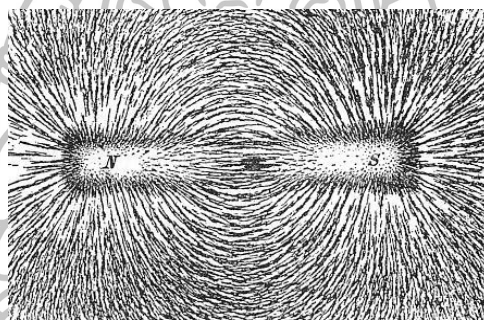
### 2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน

#### 2.1.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

สนามแม่เหล็กคือบริเวณที่แสดงอำนาจความเป็นแม่เหล็กซึ่งสนามแม่เหล็กใน

ธรรมชาติ เกิดจาก 3 สาเหตุคือ (1) วัตถุมีธาตุที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ โลหะจำพวกเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ซึ่งเป็นธาตุโลหะเพียง 3 ชนิดที่สามารถเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงรอบตัวโลหะเองได้ เมื่อถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง (2) มีองค์ประกอบของธาตุที่สามารถเหนี่ยวนำให้มีอำนาจแม่เหล็กได้ (3) มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น

โดยการเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งเหล็กที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากการนำผงแม่เหล็กมาโรยบนกระดาษที่มีแม่เหล็กอยู่ข้างล่าง ซึ่งจะสังเกตเห็นแนวเส้นของสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางออกจากขั้วเหนือ ไปยังขั้วใต้ โดยบริเวณใดที่มีเส้นแรงแม่เหล็กมาก บริเวณนั้นจะมีค่าของสนามแม่เหล็กมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบแท่งแม่เหล็ก

ที่มา: W.D. Callister, *Materials science and engineering : an introduction*, (New York: John Wiley & Sons, 2007), 50

ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $\vec{H}$ ) สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\vec{H}$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ในระบบหน่วย SI และมีหน่วยเป็นเออสเตด (Oersteds, Oe) ในระบบหน่วย cgs ความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองหน่วยคือ 1 แอมแปร์ต่อเมตร เท่ากับ  $4\pi \times 10^{-3}$  Oe  $\mu_0$  คือค่าสภาพซึมผ่านได้ (permeability) ของสุญญากาศ (free space) =  $4\pi \times 10^{-7}$  มีหน่วยเป็นเทสลาเมตรต่อแอมแปร์ ( $\text{T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ ) และ  $\vec{B}$  คือการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction)

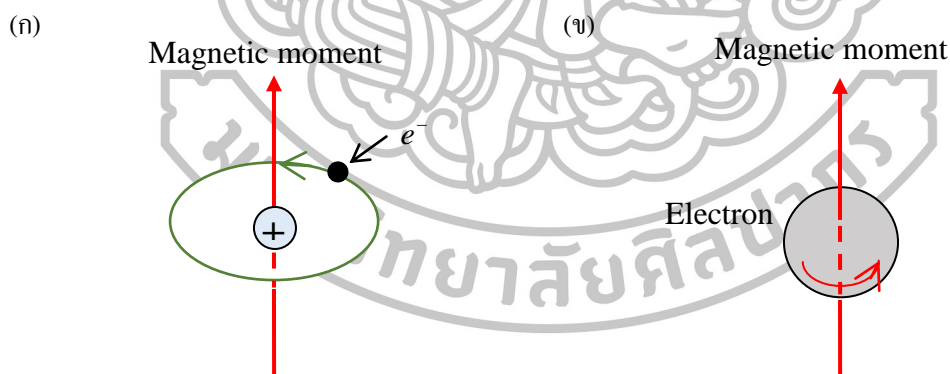
สำหรับสนามแม่เหล็กที่สร้างจากกระแสไฟฟ้า เราสามารถพิจารณาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในบริเวณรอบๆ ขดลวดยาวที่มีกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid) เมื่อมี

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มดังสมการที่ (2.2) เมื่อกำหนดให้  $I$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าไปในขดลวดโซลินอยด์ มีหน่วยแอมแปร์ (A)  $N$  คือจำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์ และ  $l$  คือความยาวของขดลวดโซลินอยด์ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (2.2)$$

### 2.1.2 แมกเนติกไดโพลโมเมนต์ (magnetic dipoles moment)

อิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งคือเกิดจากการเคลื่อนที่โคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนนั้น การโคจรของอิเล็กตรอนก็เทียบได้กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงเล็กๆทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กมากและมีสนามแม่เหล็กตลอดแนวการโคจรของอิเล็กตรอนดังแสดงในรูป 2.2(ก) และเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศทางตามแกนของการหมุนรอบตัวเองดังแสดงในรูป 2.2(ข) โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเองนี้จะมีทิศทางได้เพียง 2 ชนิดคือทิศขึ้น (up) และทิศลง (down) ซึ่งเป็นทิศที่ขนานกันแต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมจึงถูกมองได้ว่าเป็นแม่เหล็กชิ้นเล็กๆที่มีโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการโคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเอง



รูปที่ 2.2 โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน และ (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

### 2.1.3 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction)

ถ้านำเอาแท่งเหล็กธรรมดาใส่เข้าไปในขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายนอกของขดลวดโซลินอยด์จะมีความเข้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแท่งเหล็กนั้นถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวด ความเข้มของสนามแม่เหล็กใหม่ที่เกิดขึ้นจะ

เท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดโซเลนอยด์เอง และที่เกิดขึ้นเนื่องจากแท่งแม่เหล็กที่ถูกทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น เราอาจเรียกความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) หรือเรียกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction) และมีสัญลักษณ์แทนด้วย  $\vec{B}$  สามารถหาได้ดังสมการ

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\vec{B}$  คือการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (web/m<sup>2</sup>) หรือ เทสลา (tesla, T)  $\mu_0$  คือ ค่าสภาพซึมผ่านได้ของสุญญากาศ  $\vec{H}$  คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก และ  $\vec{M}$  คือความเป็นแม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ โมเมนต์แม่เหล็ก ( $\vec{m}$ ) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\vec{m}}{\Delta V} \quad (2.4)$$

สำหรับวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกนั้นค่า  $\mu_0\vec{M}$  มักจะมีค่ามากกว่า  $\mu_0\vec{H}$  และบางครั้งค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และแมกนีไทเซชันอาจใช้ในความหมายเดียวกันได้ ดังนั้นจึงทำให้สามารถประมาณสมการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\vec{B} = \mu_0\vec{M} \quad (2.5)$$

#### 2.1.4 สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็ก

เมื่อนำเอาวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกไปวางในสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กมีความเข้มเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นอาจบอกได้ด้วยค่าสภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic permeability,  $\mu$ ) ซึ่งนิยามได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก ดังนี้

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (2.6)$$

ถ้าเป็นค่าในสุญญากาศ  $\mu = \mu_0 = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$  และกำหนดให้  $\mu = \mu_0\mu_r$  จะได้

$$\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H} \quad (2.7)$$

โดยปกติเมื่อกล่าวถึงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กมักจะหมายถึงค่าสภาพซึมผ่านได้เริ่มต้น ( $\mu_i$ ) หรือค่าสภาพให้ซึมผ่านได้สูงสุด ( $\mu_{\max}$ ) สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่ายจะมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กสูง

### 2.1.5 สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก

สภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กของวัสดุเป็นค่าคงตัวของวัสดุที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $\vec{H}$ ) ต่อค่าความเป็นแม่เหล็ก (magnetization,  $\vec{M}$ ) ดังนั้นจึงอาจเขียนสมการได้ดังนี้

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.8)$$

โดย  $\chi_m$  คือค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย วัสดุที่มีการตอบสนองต่อการเพิ่มของความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยจะถูกแสดงผลในรูปของสภาพรับไว้ได้แม่เหล็ก

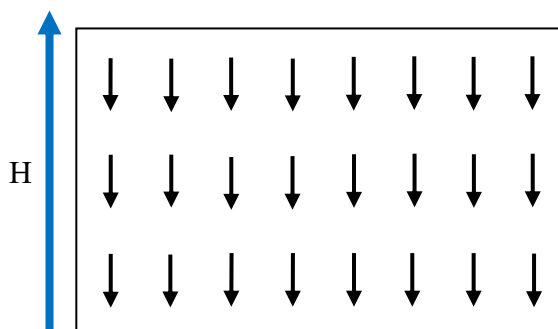
### 2.1.6 สภาวะแม่เหล็กของวัสดุ

สมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารนั้นเกิดจากอิเล็กตรอน โดยการเกิดสนามแม่เหล็กเป็นไปได้สองทาง คือเกิดจากอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสในอะตอม และการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า อิเล็กตรอนสปิน (electron spin) สารต่างๆ โดยทั่วไปไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา เพราะว่าเมื่อมีการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งโคจรรวมในทิศทางตรงข้าม สนามแม่เหล็กจึงหักล้างกันหมด ในทำนองเดียวกันเมื่ออิเล็กตรอนมีสปินในทิศหนึ่งก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวมีสปินในทิศตรงกันข้ามหักล้างกันไปอีก การหักล้างนี้ทำให้สารนั้นไม่เป็นแม่เหล็ก และในสารที่เป็นโลหะบางชนิดมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน ซึ่งมีสปินในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าในอีกทิศทางหนึ่งจึงทำให้สารนั้นแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งทำให้สามารถแยกสารต่างๆ ได้หลายประเภทตามการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่กระทำต่อสารนั้นได้ดังนี้

#### 2.1.6.1 ไดอแมกเนติก (diamagnetic)

ไดอแมกเนติกเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กเลยหากไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแต่เมื่อนำวัสดุไดอแมกเนติกวางไว้ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้น ซึ่งกระแสนี้มีทิศที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งมีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้เกิดผลของแม่เหล็กในทางลบดังแสดงในรูปที่ 2.3 ผลของสภาวะไดอแมกเนติกนี้

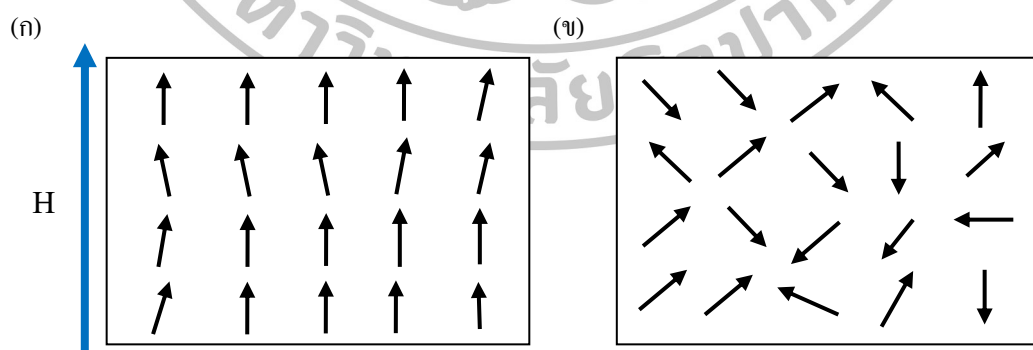
จะทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กหรืออัตราส่วนระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นลบเล็กน้อย ( $\chi_m \approx -10^{-6}$ )



รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุไดอะแมกเนติก เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอก

#### 2.1.6.2 พาราแมกเนติก (paramagnetic)

พาราแมกเนติกเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแต่เมื่อวางวัสดุพาราแมกเนติกไว้ในสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตามแนวสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) โดยวัสดุจะแสดงสภาพรับไว้ได้แม่เหล็กในเชิงบวกเล็กน้อยซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-6}$ – $10^{-2}$  แต่ทิศทางของการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้จะไม่เป็นระเบียบเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลทำให้สถานะแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติกลดลง และสถานะพาราแมกเนติกจะหายไปเมื่อวัสดุนั้นถูกนำออกจากสนามแม่เหล็กภายนอกดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข)



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุพาราแมกเนติก (ก) สนามแม่เหล็กภายนอกไม่เป็นศูนย์ (ข) ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

### 2.1.6.3 เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)

ไดอะแมกเนติก และพาราแมกเนติกจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกใส่เข้าไปและจะยังคงสถานะแม่เหล็กนั้นได้ทราบเท่าที่สนามแม่เหล็กภายนอกยังคงอยู่ แต่เฟอร์โรแมกเนติกเป็นสถานะแม่เหล็กที่สามารถทำให้คงอยู่ได้ แม้จะไม่อยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก หรือทำให้หมดไปได้ตามต้องการ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจึงมีความสำคัญมากต่องานด้านอุตสาหกรรม วัสดุที่สามารถแสดงสถานะเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล

สถานะเฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวซึ่งอยู่ที่ระดับพลังงานชั้นในเกิดการโคจรรอบตัวเองและมีการจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึก ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นในแต่อยู่เป็นคู่และมีการสปีนในทิศทางตรงข้ามกันทำให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนวงโคจรนอกสุด (valance electron) ของอะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็กรวมเป็นศูนย์เช่นกันเพราะอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเกิดพันธะทางเคมีกับอิเล็กตรอนของอะตอมอื่น ดังนั้นอิเล็กตรอนที่แสดงความเป็นแม่เหล็กจะต้องเป็นอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นในของอะตอมและไม่นับว่าเลนซ์อิเล็กตรอน เช่น เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ที่มีอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวในระดับพลังงาน 3d มีการจัดเรียงตัวดังตารางที่ 2.1

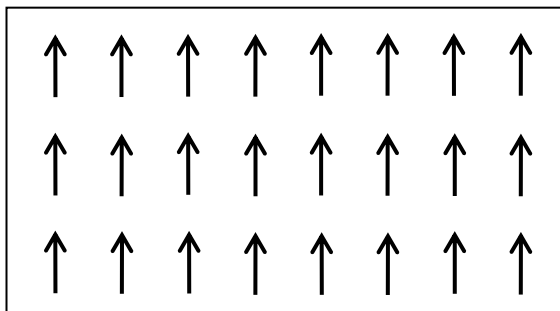
ตารางที่ 2.1 การจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3d ของเหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล

อะตอม	การจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3d	อิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3s
Fe <sub>26</sub>		2
Co <sub>27</sub>		2
Ni <sub>28</sub>		2

ที่มา: William F. Smith, "Principles of Materials Science and Engineering," 3 Edition (New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007).

เนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของสารนั้นๆ เกิดอันตรกิริยาเอ็กซ์เชนจ์ระหว่างเซลล์ และทำให้โมเมนต์แม่เหล็กเกาะกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่าโดเมน (domain) และโมเมนต์แม่เหล็กทุกตัวในโดเมนมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวอยู่ในทิศเดียวกันเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก และเมื่อไม่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอก การเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กยังคงมีความเป็นระเบียบเหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.5



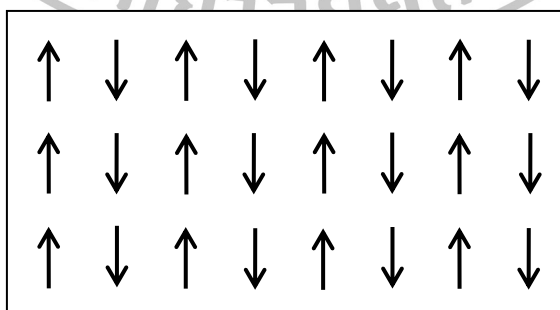


รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

เฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารแม่เหล็กที่มีสมบัติขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สารแม่เหล็กจะเปลี่ยนสถานะจากเฟอร์โรแมกเนติกกลายเป็นพาราแมกเนติก และเมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกถูกทำให้เย็นตัวลงจากอุณหภูมิคูรี โดเมนแม่เหล็กจะจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งตามสภาวะเฟอร์โรแมกเนติก

#### 2.1.6.4 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetism)

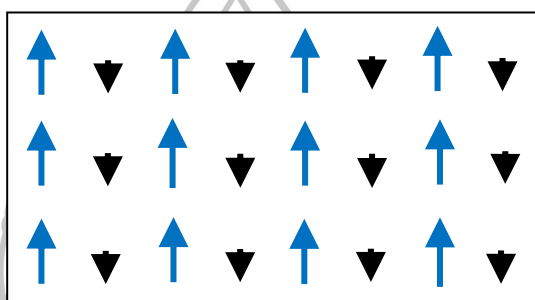
แอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากแรงระหว่างอะตอมข้างเคียงกัน ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมของวัสดุเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกันทำให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น ส่วนโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงทำให้ผลรวมแม่เหล็กสุทธิไม่เป็นศูนย์ วัสดุที่แสดงสมบัติสภาวะแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เช่น แมงกานีส นิกเกิลออกไซด์ และ โครเมียม



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

### 2.1.6.5 เฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic)

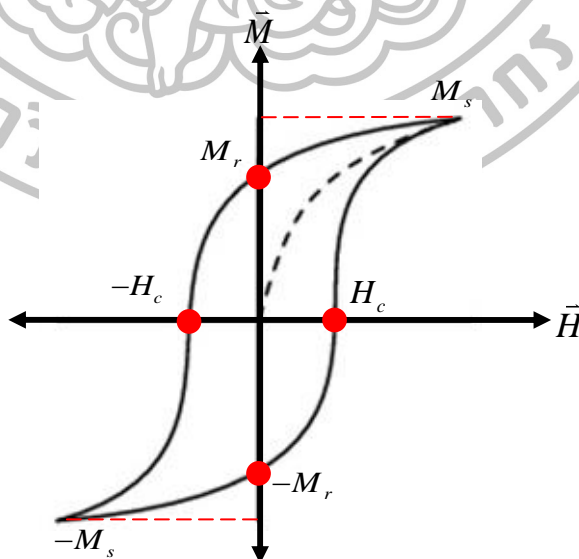
เฟอร์ริแมกเนติก เป็นสถานะแม่เหล็กที่มีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมข้างเคียงชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกัน แต่มีขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กไม่เท่ากัน ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมมีค่ามากกว่าศูนย์ โมเมนต์แม่เหล็กเหล่านี้ทำให้วัสดุสามารถแสดงสมบัติสถานะแม่เหล็กได้ คุณสมบัติเฟอร์ริแมกเนติก จะหายไปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี สารเฟอร์ริแมกเนติก มีการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ได้แก่ เฟอร์ไรต์ แมกนีไทต์ เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) และนิเกิลเฟอร์ไรต์ ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ )



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุเฟอร์ริแมกเนติกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

### 2.1.7 ฮิสเตอร์ิซิสลูป

การเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันในเฟอร์โรแมกเนติกกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีลักษณะเป็นฮิสเตอร์ิซิสลูป (Hysteresis loop) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฮิสเตอร์ิซิสลูปของเฟอร์โรแมกเนติก แกนนอนแทนสนามแม่เหล็กภายนอก และแกนตั้งแทนแมกนีไทเซชัน

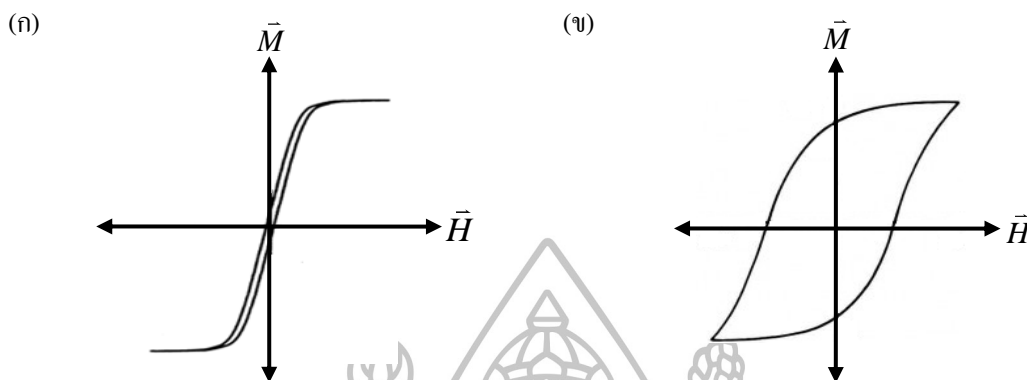
ฮิสเตอร์ิซิสลูปจะถูกสร้างขึ้นโดยการวัดจากสนามแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่มีความแรงของสนามที่ต่างกัน ในขณะที่ยังไม่มี การป้อนสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งจุดเริ่มต้น ( $M=0$ ) แล้วให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทาง  $+H$  เส้นทางของแมกนีไทเซชันในช่วงแรกของเส้นโค้งบริเวณเส้นประ โดยความชันเริ่มต้นเรียกว่าความไวต่อการตอบสนองเริ่มต้น  $\chi_i$  เมื่อให้สนามแม่เหล็กจนแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมด เรียกว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization,  $M_s$ ) ซึ่งเป็นค่าแมกนีไทเซชันสูงสุดที่สารมีได้ สารเฟอร์โรแมกเนติกจะไม่สามารถมีแมกนีไทเซชันมากกว่า  $M_s$  ไม่ว่าจะเพิ่มสนามแม่เหล็กมากขึ้นก็ตาม หลังจากนั้นเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกลดลงจนกระทั่งสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ แต่แมกนีไทเซชันภายในวัสดุยังคงเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กในทาง  $+H$  เรียกจุดนี้ว่า แมกนีไทเซชันคงค้าง (remanent magnetization,  $M_r$ ) แสดงว่าวัสดุยังคงมีสภาพแม่เหล็กเหลืออยู่ แม้จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก แมกนีไทเซชันคงค้างจะลดลงเป็นศูนย์หรือถูกทำให้หมดไปได้ เมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับทิศ สนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไทเซชันเป็นศูนย์เรียกว่า สนามโคเออร์ซิวิตี (coercive magnetic field:  $H_c$ ) จากนั้นให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดอิ่มตัวอีกครั้งหนึ่งในทิศทางลบ หรือ  $-M_s$  จากจุดนี้ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศตรงข้ามอีกครั้ง จะทำให้ย้อนกลับไปถึงสภาพอิ่มตัวในครั้งแรกอีกครั้ง เกิดเป็นฮิสเตอร์ิซิสลูปที่สมบูรณ์ขึ้น พื้นที่ภายในทั้งหมดของ loop จะแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียเพื่อใช้ในการทำให้โลหะแสดงสภาวะแม่เหล็กหรือทำให้สภาวะแม่เหล็กนั้นหมดไป

### 2.1.8 วัสดุแม่เหล็ก

เฟอร์โรแมกเนติกที่สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้หลังจากที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก ขาดต่อการลบอำนาจแม่เหล็ก (demagnetize) หลังจากถูกทำให้เป็นแม่เหล็กถาวรแล้ว วัสดุแบบนี้เรียกว่า แม่เหล็กแข็ง (hard magnet) และเฟอร์โรแมกเนติกที่ไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้หลังจากที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกและสามารถทำให้เป็นแม่เหล็ก และลบล้างแม่เหล็กได้ง่าย เช่นเหล็กธรรมดา เหล็กกล้าผสมซิลิกอน และเหล็กกล้าผสมนิกเกิล เป็นต้น วัสดุแบบนี้เรียกว่า แม่เหล็กอ่อน (soft magnet)

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อนและเฟอร์โรแมกเนติกแบบแข็งก็จะมีรูปร่างของฮิสเตอร์ิซิสลูปที่แตกต่างกันกล่าวคือ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อนมีความไวต่อการตอบสนองสูงมีค่า  $H_c$  ต่ำ และมีพื้นที่ภายในฮิสเตอร์ิซิสลูปน้อย ทำให้สูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ง่ายกว่าวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกแบบแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กแบบแข็งมี

ลักษณะของฮิสเทอรีซิสลูปกว้าง มีค่าแสดงสภาพการซึมผ่านเริ่มต้นต่ำ (หรือความไวต่อการตอบสนองน้อย) มีค่า  $M_s$ , ค่า  $M_r$ , และมีค่า  $H_c$  สูงดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข)



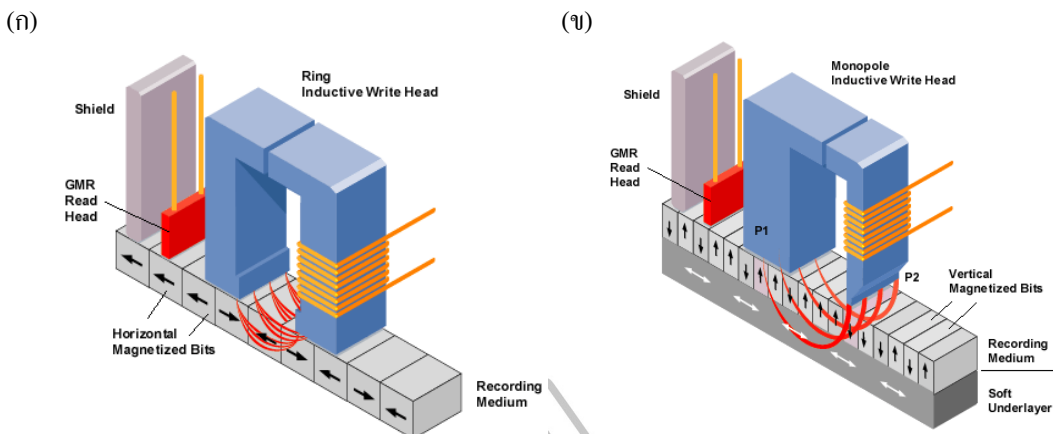
รูปที่ 2.9 ฮิสเทอรีซิสลูปของ (ก) วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (ข) วัสดุแม่เหล็กแบบแข็ง

## 2.2 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Hard Disk Drive) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึก และอ่านข้อมูลในระบบคอมพิวเตอร์และข้อมูลดิจิทัลชนิดอื่นๆ สามารถเก็บรักษาข้อมูลได้แม้ขณะที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าป้อนให้ก็ตาม โดยอาศัยการบันทึกข้อมูลโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.2.1 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทำการจัดเก็บข้อมูลบนพื้นที่เล็กๆของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางบวกและทิศทางลบบนรอยต่อของผิวแผ่นดิสก์ แต่ละพื้นที่เล็กๆเรียกว่าบิต (bit) ข้อมูลของบิตจะถูกเขียนในพื้นที่ที่มีระยะใกล้เคียงกัน ความจุทั้งหมดของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างพื้นที่ที่บรรจุให้มีขนาดเล็กที่จำเป็นต่อการแสดงในหนึ่งบิตของข้อมูล หากมีขนาดบิตเล็กจะบรรจุข้อมูลได้มาก การเก็บบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มี 2 แบบ คือการเก็บบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวยาว (longitudinal magnetic recording, LMR) เป็นการบันทึกข้อมูลโดยให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางตามแนวยาวกับแผ่นบันทึกข้อมูล (media) โดยให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กในแต่ละบิตมีทิศทางตามกันหรือทิศตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูป 2.10(ก) และการเก็บบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก (perpendicular recording) ซึ่งมีการพัฒนามาจากการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กตามแนวยาว โดยการบันทึกข้อมูลจะให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีทิศทางตามแนวตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) การบันทึกตามแนวตั้งฉากจะสามารถเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลได้มากกว่าการบันทึกตามแนวยาว

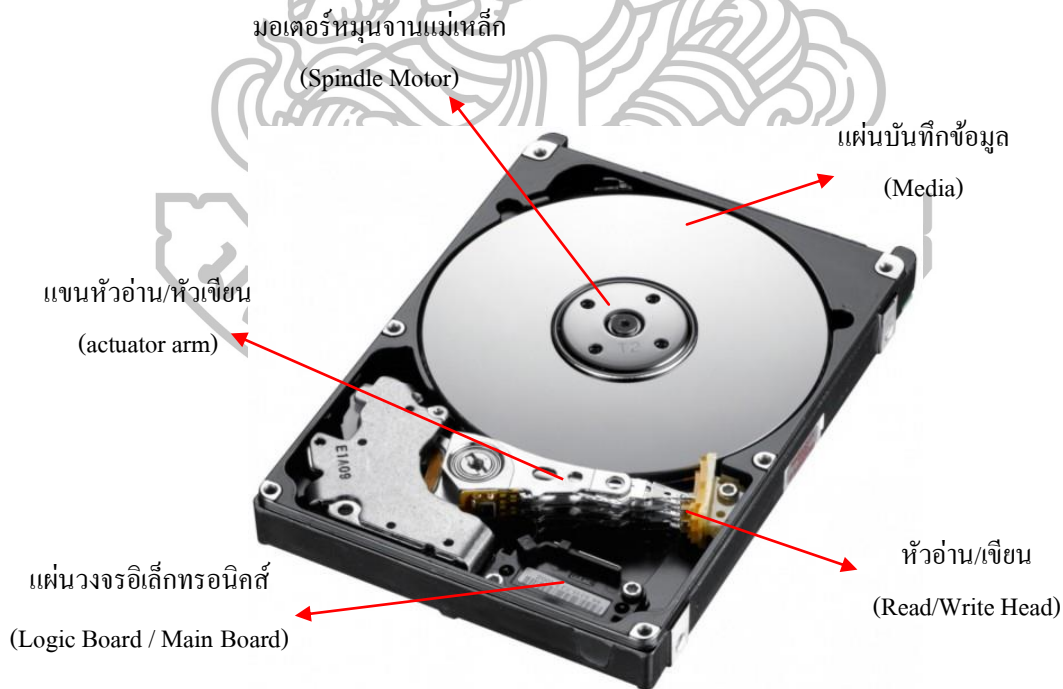


รูปที่ 2.10 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบ (ก) แนวยาว และ (ข) แนวตั้งฉาก

### 2.2.2 ส่วนประกอบหลักในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบบทั่วไปซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงใน

รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

### 2.2.2.1 แผ่นดิสก์ (platter)

แผ่นดิสก์ หรือที่เรียกว่า แผ่นมีเดีย เป็นแผ่นจานเหล็กเคลือบสารแม่เหล็กมีลักษณะเป็นรูปวงกลมซ้อนกันหลายชั้น เป็นพื้นที่ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่เก็บบนแผ่นดิสก์จะอยู่ในลักษณะ “0” และ “1” เหมือนกับข้อมูลดิจิทัลอื่นๆ ขนาดของแผ่นดิสก์โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 นิ้ว ในฮาร์ดดิสก์แต่ละตัวจะมีแผ่นดิสก์ประมาณ 1–4 แผ่น แต่ละแผ่นจะเก็บข้อมูลได้ทั้งสองด้าน และยังมีแผ่นดิสก์มากก็จะทำให้ฮาร์ดดิสก์ตัวนั้นมีความจุมากขึ้นไปด้วย

### 2.2.2.2 แขนหัวอ่าน/ เขียน (actuator arm)

แขนหัวอ่าน/ เขียนทำงานร่วมกับสเต็ปปีงมอเตอร์ (stepping motor) ในการเลื่อนแขนหัวอ่าน/เขียนไปที่ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการอ่าน/เขียนข้อมูล โดยมีคอนโทรลเลอร์ (Controller) ทำหน้าที่แปลคำสั่งที่มาจากคอมพิวเตอร์จากนั้นแขนหัวอ่าน/เขียนเลื่อนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ปัจจุบันสเต็ปปีงมอเตอร์ได้ถูกแทนด้วยแกนเสียง (voice coil) ที่สามารถทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่าสเต็ปปีงมอเตอร์

### 2.2.2.3 มอเตอร์หมุนจานแม่เหล็ก (spindle motor)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หมุนแผ่นดิสก์ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อให้แผ่นดิสก์ผ่านหัวอ่านที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลที่บันทึกอยู่บนแผ่นดิสก์ ความเร็วในการหมุนแผ่นดิสก์มีผลต่อความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time) และความเร็วในการอ่านข้อมูลด้วยซึ่งความเร็วจะวัดกันเป็นรอบต่อนาที (Revolutions per Minute หรือ RPM) ในปัจจุบันความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนจานแม่เหล็กมีความเร็วรอบอยู่ที่ 10,000 RPM

### 2.2.2.4 แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Logic Board/ Main Board)

แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด และทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อกับเมนบอร์ดของคอมพิวเตอร์

### 2.2.2.5 หัวอ่าน/ เขียน (Read/ Write Head)

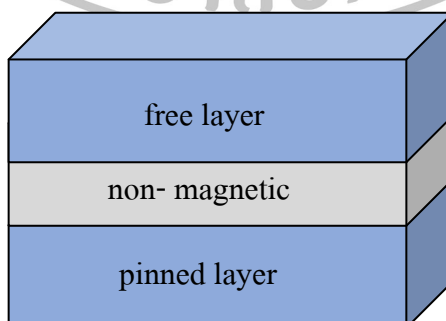
หัวอ่าน/ เขียน เป็นส่วนที่ใช้ในการอ่าน/เขียนข้อมูลจากแผ่นดิสก์ ภายในหัวอ่าน/เขียนมีลักษณะเป็นขดลวด โดยการอ่าน/เขียนข้อมูลเกิดขึ้นเมื่อคอนโทรลเลอร์ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ นำคำสั่งที่ได้มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนข้อมูลเข้าสู่ขดลวดภายในหัวอ่านทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไปเปลี่ยน โครงสร้างของสารแม่เหล็กที่เคลือบอยู่บนแผ่นดิสก์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลขึ้นจำนวนของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวหนึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นดิสก์โดยหนึ่งด้านของแผ่นดิสก์จะต้องมีหัวอ่าน/เขียนจำนวน 1 อันเสมอ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยส่วนใหญ่ที่มีแผ่นดิสก์ตั้งแต่ 1–4 แผ่นก็จะมีจำนวนหัวอ่าน/เขียนตั้งแต่ 2–8 หัว

### 2.3 เทคโนโลยีหัวอ่าน

ในฮาร์ดดิสก์รุ่นเก่าใช้หัวอ่านที่มีลักษณะเป็นเส้นทองแดงบางๆพันรอบแกนเพอร์ไรต์ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกส่งผ่านในทางใดทางหนึ่งทำให้เกิดแรงชักนำทางกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดกลุ่มแม่เหล็กบนส่วนที่เป็นแม่เหล็กของอนุภาคบนแผ่นดิสก์จะไปทางขั้วเหนือหรือขั้วใต้เมื่อมีการอ่าน-เขียนข้อมูลจากฮาร์ดดิสก์ หัวอ่านจะรู้ได้ว่าทิศทางของอนุภาคไปทิศทางใด และแปลค่าออกมาเป็นบิต 0 หรือบิต 1 ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีอ่าน/เขียนที่เรียกว่า โฟโตลิโทกราฟี (photolithographic) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาเป็นโครงสร้างพื้นฐานทำให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงในการอ่าน/เขียนข้อมูลมากกว่าหัวอ่านแบบเพอร์ไรต์ และได้มีการพัฒนาหัวอ่านให้มีโครงสร้างเป็นแผ่นฟิล์มโลหะบางโดยใช้ผลของแมกนีโตรีซิสทีฟ (magnetoresistive, MR) เช่นหัวอ่านแบบไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ และทอลล์แมกนีโตรีซิสแตนซ์

#### 2.3.1 ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์

ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (giant magnetoresistance, GMR) เป็นเทคโนโลยีที่มีความต้านทานของวัสดุแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กภายนอก GMR ประกอบด้วยชั้นเพอร์โรแมกเนติก (FM) 2 ชั้น คือชั้น pinned layer (PL) ซึ่งเป็นชั้นเพอร์โรแมกเนติกที่แมกนีไทเซชันภายในมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าปกติ หรือไม่มีการเคลื่อนที่จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นชั้นอ้างอิงในการวัดสนามแม่เหล็ก และชั้น free layer (FL) เป็นชั้นเพอร์โรแมกเนติกที่แมกนีไทเซชันมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางง่าย หรือมีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และชั้นเพอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้นถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นฟิล์มโลหะที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (non-magnetic) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างพื้นฐานของ GMR ที่ใช้เป็นหัวอ่านแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ความต้านทานของ GMR มีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ความต้านทานของ GMR จะมีค่าน้อยที่สุด เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL กับแมกนีไทเซชันของชั้น PL ทำมุม  $0^\circ$  และมีค่าความต้านทานมากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL ทำมุม  $180^\circ$  กับแมกนีไทเซชันของชั้น PL ความต้านทานของ GMR เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL ทำมุม  $\theta$  กับแมกนีไทเซชันของชั้น PL คำนวณได้จากสมการที่ (2.9) หรือสมการที่ (2.10) [7, 8] เมื่อกำหนดให้  $R_p$  คือความต้านทานของ GMR ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL ทำมุมกัน  $0^\circ$   $R_{AP}$  คือความต้านทานของ GMR เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL ทำมุมกัน  $180^\circ$   $\theta$  คือมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL และ  $\Delta R$  คือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL

$$R(\theta) = R_p + \Delta R \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$R(\theta) = R_p \left( 1 + MR_{ratio} \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \right) \quad (2.10)$$

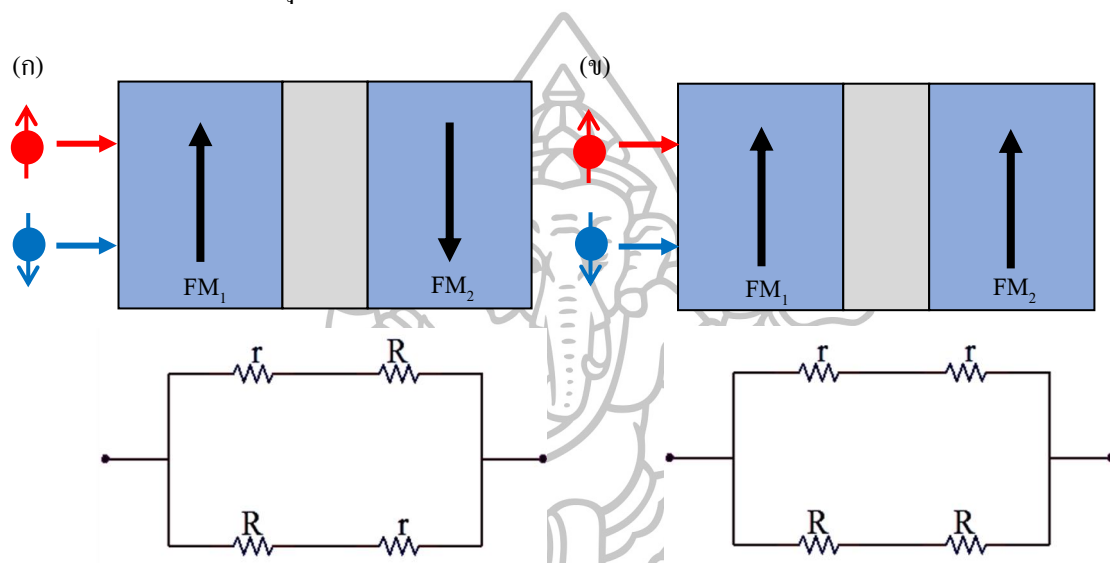
อัตราส่วน MR ในสมการที่ (2.10) เป็นตัวแปรที่บอกลักษณะประสิทธิภาพการทำงานของ GMR ว่ามีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไปมากหรือน้อยเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก (แสดงค่าเป็นร้อยละ) มีค่าตามสมการที่ (2.11) [9]

$$MR_{ratio} = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} = \frac{\Delta R}{R_p} \quad (2.11)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันของสปินอัพ (spin up) และสปินดาวน์ (spin down) หรือเรียกว่าการกระเจิงที่ขึ้นกับสปิน (spin dependent scattering) [10] ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้า [11] ดังรูปที่ 2.13 โดยการนำไฟฟ้าในฟิล์มแม่เหล็กเกิดจากทั้ง spin up และ spin down ที่สามารถนำไฟฟ้าได้อย่างอิสระต่อกันเปรียบเหมือนวงจรไฟฟ้าที่มีตัวต้านทานไฟฟ้าต่อวงจรแบบขนานกัน เมื่อลูกศรแทนทิศทางของแมกนีไทเซชันในวัสดุเหล็กเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองฝั่ง โดยเฟอร์โรแมกเนติกมีความต้านทานเป็น  $r$  เมื่อกระแสไฟฟ้าที่มีสปินทิศเดียวกับแมกนีไทเซชันในเฟอร์โรแมกเนติก และมีความต้านทานเป็น  $R$  เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีสปินทิศตรงข้ามกับแมกนีไทเซชันของชั้น FM จากรูปที่ 2.13(ก) เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ ทิศแมกนีไทเซชันของชั้น FM จะมีทิศตรงข้ามกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่มี spin up เกิดการกระเจิงมากในชั้น  $FM_1$  และอิเล็กตรอนที่มี spin down กระเจิงมากในชั้น  $FM_2$  แสดงว่าทั้งอิเล็กตรอนที่มี spin up และอิเล็กตรอนที่มี spin down มีการ



กระเจิงเท่ากัน ทำให้ความต้านทานรวมของ GMR เป็น  $R_{Ap} = \frac{r+R}{2}$  ซึ่งจะมีค่าความต้านทานรวมสูงสุด และกรณีเมื่อฟิล์มแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.13(ข) แมกนีไทเซชันของชั้น FM มีการจัดเรียงตัวขนานและมีทิศเดียวกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่มี spin up สามารถผ่านชั้น FM ทั้งสองชั้นได้ง่ายจึงเกิดการกระเจิงน้อย ในขณะที่อิเล็กตรอนที่มี spin down จะเกิดการกระเจิงมากเมื่อผ่านชั้น FM ทำให้ความต้านทานรวมของ GMR มีค่าเป็น  $R_p = \frac{2rR}{r+R}$  ซึ่งจะมีค่าความต้านทานต่ำสุด



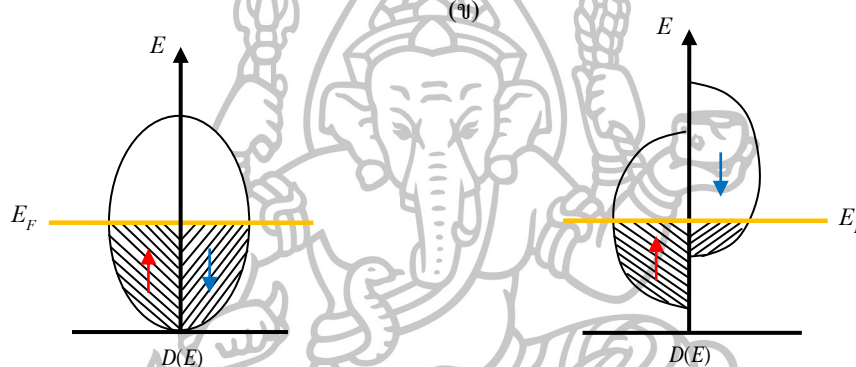
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสปินผ่านชั้นฟิล์มแม่เหล็กที่เปรียบเหมือนวงจรไฟฟ้าแสดงความต้านทานของ GMR เมื่อ (ก) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศตรงข้ามกัน และ (ข) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศขนานและมีทิศเดียวกัน

### 2.3.2 ทัลเนลลิงแมกนีโตรีซิสแตนซ์

ทัลเนลลิงแมกนีโตรีซิสแตนซ์ (tunneling magnetoresistance, TMR) [12, 13] เป็นเทคโนโลยีอีกชนิดหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก TMR พบในวัสดุที่มีโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของ GMR ประกอบด้วยชั้นเฟอร์โรแมกเนติก 2 ชั้น ที่เรียกว่าชั้น PL และชั้น FL ถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นฟิล์มโลหะที่เป็นฉนวนแม่เหล็กแต่สารที่ใช้เป็นสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นสารจำพวกออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ TMR เกิดจากอิเล็กตรอนสปินจากชั้นเฟอร์โรแมกเนติกชั้นหนึ่งข้ามผ่านชั้นฉนวนไปยังชั้นเฟอร์โรแมกเนติกอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้น

เราสามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน TMR ได้จากความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายถึงโอกาสที่จะสามารถพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy:  $E_F$ ) สำหรับในโลหะ หรือวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก เช่น Cu จะมีความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down เท่ากัน ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าสำหรับอิเล็กตรอนทุกตัวเท่ากัน ไม่เกิดการนำกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.14(ก) ในขณะที่วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะมีความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down ไม่สมดุลกัน ความต้านทานของเฟอร์โรแมกเนติกจึงมีค่าขึ้นอยู่กับสปินของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข)

(ก)



รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down สำหรับ (ก) วัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (ข) วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ TMR ที่อธิบายได้จากการนำไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down ในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่มีความหนาแน่นสถานะต่างกันที่ระดับพลังงานเฟอร์มี [14] แสดงดังรูปที่ 2.15 สำหรับกรณีที่มีชั้น FM ทั้งสองชั้นมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และมีทิศชี้ขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up มากกว่าความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin down เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อิเล็กตรอนที่มี spin up จากชั้น FM ชั้นแรกก็จะไหลผ่านเข้าไปในชั้น NM และสามารถข้ามผ่านไปยังชั้นเฟอร์โรแมกเนติกชั้นถัดไปได้มาก เป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มาก ความต้านทานที่วัดได้จึงมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) ในทางกลับกันถ้าชั้น FM ทั้งสองชั้นมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกัน ชั้น FM ชั้นแรกจะมีความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up มีมากกว่าความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin down เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อิเล็กตรอนที่มี spin up จากชั้น FM ชั้นแรกก็จะไหลผ่านเข้าไปในชั้น NM ในขณะที่ชั้น FM ชั้นที่สองมีความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin down มากกว่าความ

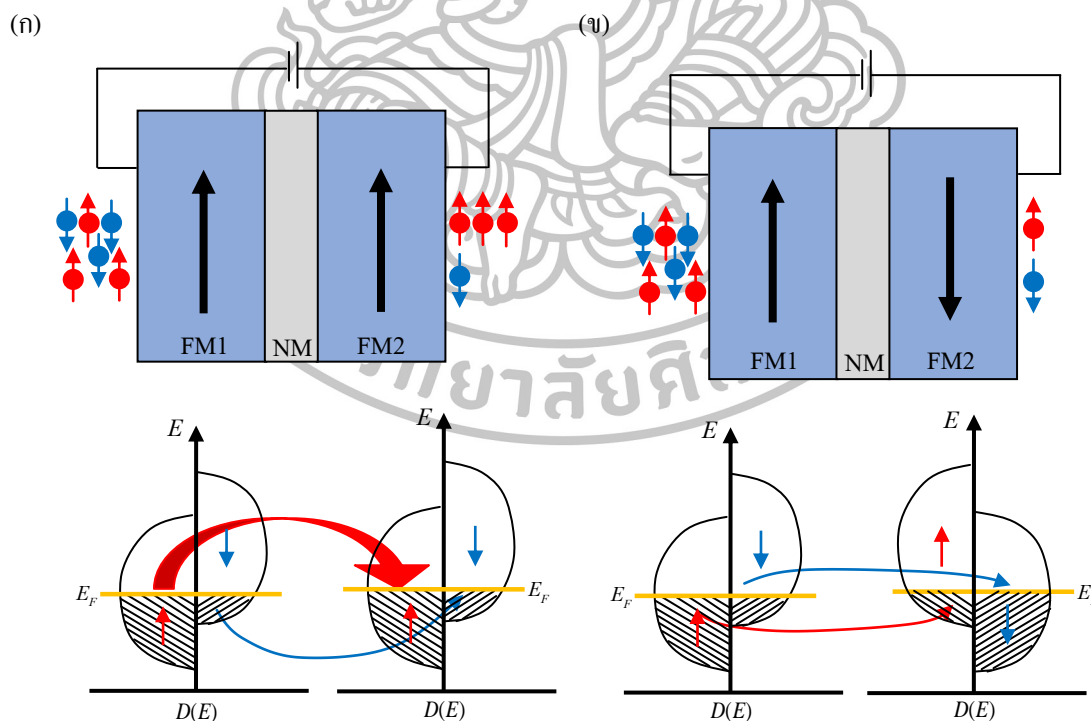
หนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน spin up ทำให้อิเล็กตรอน spin down จากชั้น FM ชั้นแรกไหลผ่านมายังชั้น FM ชั้นที่สองได้ยาก เป็นผลทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อย ความต้านทานที่วัดได้จึงมีค่ามากดังแสดงในรูปที่ 2.15(ข)

การคำนวณหาอัตราส่วน MR สำหรับการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนสปินที่ไหลผ่านชั้นเฟอร์โรแมกเนติกของหัวอ่านแบบ TMR สามารถคำนวณหาได้จาก [15]

$$TMR\% = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $P_1$  และ  $P_2$  คือสปินโพลาไรเซชัน (spin polarization) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้น ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของสปินโพลาไรเซชัน โดยพิจารณาจากความหนาแน่นสถานะ (Density of states of electron:  $D(E)$ ) ของอิเล็กตรอน spin up และอิเล็กตรอน spin down ดังสมการที่ (2.13)

$$P = \frac{D_{\uparrow}(E) - D_{\downarrow}(E)}{D_{\uparrow}(E) + D_{\downarrow}(E)} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนแม่เหล็กของอิเล็กตรอน เมื่อ (ก) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางขนานกัน และ (ข) แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางตรงข้ามกัน

## 2.4 ไมโครแมกเนติก

ไมโครแมกเนติก (micromagnetic) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของแม่เหล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดความยาวที่มีขนาดเล็กพอที่จะใช้ในการศึกษาโครงสร้างแม่เหล็กที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในงานอุตสาหกรรม เช่น เทคโนโลยีหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไมโครแมกเนติกจึงถูกใช้ในการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อความต้องการคอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพและหน่วยเก็บความจำที่มีความจุมากขึ้น การคำนวณไมโครแมกเนติกเพื่อใช้ศึกษาทิศทางแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ (1) การคำนวณด้วยวิธีแบบสแตติก (Static Method) และ (2) การคำนวณแบบไดนามิก (Dinamic Method)

การคำนวณด้วยวิธีแบบสแตติก หรือที่เรียกว่าการคำนวณด้วยสมการของบราวน์ (Brown's static equation) ดังสมการที่ (2.19) [16] วิธีนี้ถูกใช้คำนวณแมกนีไทเซชันของส่วนย่อยๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กยังผลในแต่ละตำแหน่งที่ภาวะสมดุล

สมการของบราวน์เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ minimization energy ของพลังงานแม่เหล็กดังสมการที่ (2.14)

$$\delta E_{tot} = -\int_V (E_{ex} + E_{ani} + E_{ms} + E_z) dV \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \delta E_{tot} = & \int_V \left( -2A\nabla^2 \vec{m}_i + \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}_i} - \mu_0 M_s \vec{H}_{ms} - \mu_0 M_s \vec{H}_z \right) \delta \vec{m}_i dV \\ & + 2A \int_{\partial V} \nabla \vec{m}_i \cdot \delta \vec{m}_i \cdot \vec{n} dS \\ = & 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดย  $E_{ex}$  คือพลังงานเอ็กซ์เชนจ์  $E_{ani}$  พลังงานแอนไอโซโทรปี  $E_{ms}$  คือพลังงานแมกนีโตสแตติก (magnetostatic energy) และ  $E_z$  คือพลังงานซีแมน

เมื่อทำการอินทิเกรตทั้งปริมาตรและพื้นผิว จะได้ว่า

$$-2A\nabla^2 \vec{m}_i + \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}_i} - \mu_0 M_s \vec{H}_{ms,i} - \mu_0 M_s \vec{H}_{z,i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (2.16)$$

$$\text{และ} \quad \vec{n} \cdot \nabla \vec{m}_i = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (2.17)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (2.16) จะได้ว่า

$$\vec{H}_{eff,i} M_s \vec{m}_j - \vec{H}_{eff,j} M_s \vec{m}_i = 0 \quad (2.18)$$

$$\text{เมื่อ } \vec{H}_{eff} = \frac{2A}{\mu_0 M_s} \nabla^2 \vec{m} - \frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}} + \vec{H}_{ms} + \vec{H}_z$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถสรุปได้ว่า

$$\vec{M} \times \vec{H}_{eff} = 0 \quad (2.19)$$

การคำนวณแบบสแตติกจะช่วยให้ทราบการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันในภาวะสมดุล แต่ไม่สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันต่อเวลาได้ และเทคนิคนี้ถูกใช้ครั้งแรกเพื่อศึกษาโดเมนวอลล์แบบบล็อก (Bloch wall) โดย LaBonte [17]

การคำนวณแบบไดนามิก (Dynamic Method) เป็นการคำนวณด้วยสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ที่บรรยายการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันตลอดช่วงเวลาจนเข้าสู่สมดุล ถูกคิดค้นโดย Landau และ Lifshitz [18] และได้รับการปรับปรุงโดย Gilbert [19] เป็นเทคนิคที่ได้ข้อมูลในการคำนวณครบถ้วน แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานเมื่อต้องการแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณให้ละเอียดมาก และในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้แบบจำลองที่ใช้การคำนวณด้วยสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในหนึ่งหน่วยเวลาที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กยังผล

#### 2.4.1 การหมุนรอบแกนกลาง (gyromagnetic precession)

อัตราส่วนไจโรแมกเนติก เป็นอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์แม่เหล็ก และโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum,  $L$ ) ของอิเล็กตรอน แสดงดังสมการ

$$\vec{m} = -\gamma \vec{L} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\gamma$  คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) ในกรณีของไมโครแมกเนติกใช้ค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติกของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น  $2.211 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมกับทอร์ก ที่กระทำกับอนุภาคโดยสนามแม่เหล็ก มีสมการดังนี้

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{m} \times \vec{H} \quad (2.21)$$

แทนสมการ (2.20) ในสมการ (2.21) จะได้

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma \vec{m} \times \vec{H} \quad (2.22)$$

สมการที่ (2.22) เป็นสมการที่ใช้อธิบายการหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กรอบสนามแม่เหล็ก

ความถี่ในการหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กมีชื่อว่าความถี่ลามอร์ (Lamor:  $f_L$ ) [20] ซึ่งคำนวณได้จาก

$$f_L = \frac{\gamma H}{2\pi} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) สามารถเขียนโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยในปริมาตรได้ดังนี้

$$\frac{1}{dV} \frac{d\sum \vec{m}}{dt} = -\gamma \frac{\sum \vec{m}}{dV} \times \vec{H} \quad (2.24)$$

จะได้แบบจำลองความต่อเนื่องของการหมุนรอบแกนกลาง (continuum gyromagnetic precession model) ดังสมการ

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} \quad (2.25)$$

#### 2.4.2 สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau–Lifshitz equation)

ในปีค.ศ. 1935 ลันเดา และ ลิฟชิตซ์ ได้เสนอแบบจำลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กยังผล (effective field,  $H_{eff}$ ) ซึ่งแบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจากสมการแบบจำลองความต่อเนื่องของการหมุนรอบแกนกลางจากสมการ (2.25) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก จะได้สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ ดังสมการ (2.26)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) บ่งบอกถึงการโคจรของแมกนีไทเซชันรอบสนามแม่เหล็กยังผล โดยไม่มีการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันให้มีทิศทางตามสนามแม่เหล็กยังผล ต่อมาได้มีการเพิ่มพจน์การหน่วงเข้าไปในสมการ (2.26) เพื่อให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กยังผล ซึ่งจะได้สมการลันเดา และลิฟชิตซ์ดังนี้

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{\lambda}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\lambda > 0$  เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุ (phenomenological constant characteristic of material) และ  $M_s$  คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว

### 2.4.3 สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation: LLG)

ในปี ค.ศ. 1955 กิลเบิร์ตได้เสนอหลักการที่แตกต่างจากสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ เขาพบว่าสมการ (2.27) สามารถพิสูจน์ได้จากสมการ Lagrangian ซึ่งใช้องค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแกนต่างๆ และกิลเบิร์ตได้เสนอให้เพิ่มพจน์การหน่วงดังสมการที่ (2.28)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma_0 \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (2.28)$$

เมื่อกำหนดให้  $\vec{M}$  คือแมกนีไทเซชัน  $\vec{H}_{eff}$  คือสนามแม่เหล็กยังผล  $dt$  คือช่วงเวลาที่ใช้ในการพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน  $M_s$  คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว  $\gamma_0$  คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก และ  $\alpha$  คือค่าคงที่การหน่วงของกิลเบิร์ต (Gilbert's damping constant) มีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ในโลหะ Co Ni และ Fe หรือในโลหะผสม  $\alpha$  จะมีค่าน้อยกว่า 0.1 บางครั้งมีค่าต่ำกว่า 0.01

สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ตประกอบด้วยพจน์สองพจน์ด้วยกัน คือ พจน์การหมุน (precession term)  $T_1 = -\gamma_0 \vec{M} \times \vec{H}_{eff}$  เนื่องจากอัตราไจโรแมกเนติกที่ติดลบในสมการที่ (2.28) ทำให้พจน์การหมุนมีหน้าที่ทำให้แมกนีไทเซชันหมุนวนเข็มนาฬิกาในระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ก) โดยความถี่ในการหมุนของแมกนีไทเซชันคำนวณได้จากสมการ (2.28) และพจน์ที่สองคือ พจน์การหน่วง (damping term)  $T_2 = \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$  มีหน้าที่ลดพลังงานของแมกนีไทเซชัน เนื่องจากความเร็วของแมกนีไทเซชันมีค่าขึ้นอยู่กับพลังงาน เมื่อพลังงานลดลงความเร็วของแมกนีไทเซชันจะลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามแมกนีไทเซชันต้องหมุนด้วยความถี่เชิงมุมคงที่ตามนิยามของพจน์การหมุน แมกนีไทเซชันจึงจำเป็นต้องปรับระนาบการหมุนเพื่อให้มีความเร็วลดลงแต่ความถี่เชิงมุมคงที่ แมกนีไทเซชันจึงมีลักษณะเคลื่อนที่เข้าสู่สนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ข) [21]

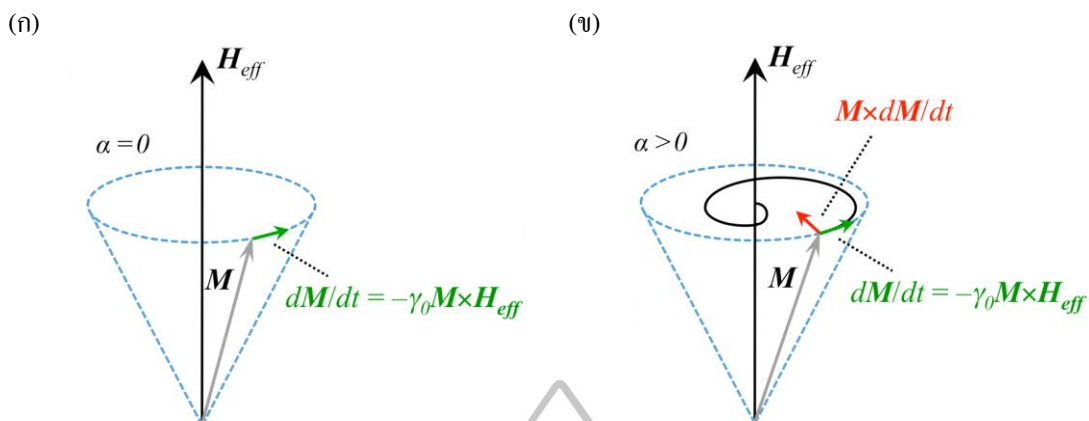
เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ตจึงได้รับการแปรรูปด้วยเอกลักษณ์ทางเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ (2.29) และ (2.30) เมื่อกำหนดให้

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{(1 + \alpha^2)}$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\frac{\gamma_0}{(1 + \alpha^2)} (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{\alpha\gamma_0}{(1 + \alpha^2)M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.29)$$

และ

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{\gamma\alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กยังผล (ก) การหมุนแบบไม่มีการหมุน และ (ข) การหมุนแบบมีการหมุน

#### 2.4.4 สนามแม่เหล็กยังผล

สนามแม่เหล็กยังผลคือผลรวมของสนามทั้งหมดทั้งภายนอกและภายในของวัสดุแม่เหล็กสนามแม่เหล็กยังผลที่ถูกใช้คำนวณในสมการแลนเด-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต สามารถคำนวณได้จากเกรเดียนของพลังงานต่อแมกนีไทเซชันดังแสดงในสมการที่ (2.31)

$$\vec{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{dE}{d\vec{M}} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $E$  เป็นความหนาแน่นของพลังงานแสดงดังสมการ (2.32)

$$E_{tot} = E_{ex} + E_{ani} + E_{demag} + E_z \quad (2.32)$$

โดยความหนาแน่นของพลังงานประกอบด้วยพลังงานซีแมน ( $E_z$ ) ซึ่งเป็นพลังงานที่มาจากสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานแอนไอโซโทรปี ( $E_{ani}$ ) ซึ่งมีที่มาจากโครงสร้างผลึกในสารแม่เหล็ก พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ ( $E_{ex}$ ) ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้กัน และพลังงานดีแมกนีไทเซชัน ( $E_{demag}$ ) ซึ่งเป็นพลังงานแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยแมกนีไทเซชันในตัวสารแม่เหล็กเองซึ่งพลังงานทั้งหมดที่กล่าวถึงจะถูกคำนวณให้อยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กยังผลดังสมการที่ (2.31)

##### 2.4.4.1 สนามซีแมน (Zeeman field)

สนามซีแมน คือสนามแม่เหล็กที่ระบบได้รับจากภายนอก สนามซีแมนก่อให้เกิดพลังงานซีแมนระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้กันดังสมการที่ (2.33) ในการจำลองสนามนี้สามารถ



นำไปสร้างฮิสเตอรีซิสลูปหรือเพื่อศึกษากระบวนการการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้เข้าไป

$$E_{ext} = -\mu_0 \int_V \vec{M} \cdot \vec{H}_z dV \quad (2.33)$$

เมื่อกำหนดให้  $E_{ext}$  คือพลังงานซีแมน  $\vec{H}_z$  คือสนามแม่เหล็กซีแมนหรือสนามแม่เหล็กจากภายนอก  $dV$  คือปริมาตรย่อยๆ ซึ่งในการจำลองปริมาตรนี้ก็คือเซลล์ที่ทำการแบ่ง พลังงานซีแมนมีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแมกนีไทเซชันตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอก และพลังงานมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก

เมื่อนำสมการพลังงานซีแมนในสมการที่ (2.33) แทนค่าลงในสมการที่ (2.31) จะได้สมการสนามซีแมนเป็น

$$\vec{H}_z = \vec{H}_{applied} \quad (2.34)$$

#### 2.4.4.2 สนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field)

สนามแอนไอโซโทรปีเป็นสนามที่ขึ้นอยู่กับการโคจรของสปินของแมกนีไทเซชันที่ขึ้นอยู่กับแกนของผลึก เนื่องจากวงโคจรอะตอมมักจะไม่เป็นทรงกลมแต่เป็นวงรีมากกว่า ทำให้แมกนีไทเซชันไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระ แมกนีไทเซชันจึงมีการจัดเรียงตัวตามทิศของผลึก ทิศทางสำหรับแมกนีไทเซชันนี้เรียกว่า easy axis ซึ่งเป็นแกนที่ง่ายต่อการเรียงตัวของแมกนีไทเซชันมากกว่าแกนอื่น และมีสารบางชนิดที่มีแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวเช่นกันแต่แกนดังกล่าวไม่ใช่แกนที่แมกนีไทเซชันชอบเรียงตัว แกนนั้นเรียกว่า hard axis โดยแมกนีไทเซชันจะชอบเรียงตัวในทางใดก็ได้ในระนาบที่ตั้งฉากกับแกน hard axis

นอกจากนี้สารแต่ละชนิดมีทิศทางของ easy axis แตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างของผลึก ผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) จะมี easy axis เพียงแกนเดียว ตั้งฉากกับโครงสร้างผลึก แอนไอโซโทรปีแบบนี้ถูกเรียกว่า uniaxial anisotropy สำหรับสารที่มีโครงสร้างผลึกแบบ face centered cubic (FCC) และแบบ body centered cubic (BCC) จะมี easy axis ถึงสามแกนตั้งฉากซึ่งกันและกัน เพียงแต่แกน easy axis ของ FCC อยู่ในแนวเดียวกับด้านของ FCC แต่ easy axis ของ BCC อยู่ในแนวทะแยงมุม แอนไอโซโทรปีแบบนี้ถูกเรียกว่า cubic anisotropy

### 2.4.4.2.1 แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว (uniaxial anisotropy)

พลังงานของแอนไอโซโทรปี แบบแกนเดียวมีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแกนนี้ไทเซชันกับ easy axis ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.35)

$$\begin{aligned} E_{a,uni} &= \sum K_i \sin^2 \theta \\ &\cong K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \end{aligned} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $E_{a,uni}$  คือพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว  $K_i$  คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสำหรับอนุกรมลำดับที่  $i$  และ  $\theta$  คือมุมระหว่างแกนนี้ไทเซชันกับ easy axis

จากนิยามการคูณเวกเตอร์แบบสเกลาร์  $\vec{m} \cdot \vec{a} = |m||a|\cos\theta$  และเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ  $\sin^2 \theta = 1 - \cos^2 \theta$  ทำให้กระจาย 2 พจน์ในสมการที่ (2.35) ได้เป็น

$$E_{a,uni} = K_0 + K_1 [1 - (\vec{m} \cdot \vec{a})^2] \quad (2.36)$$

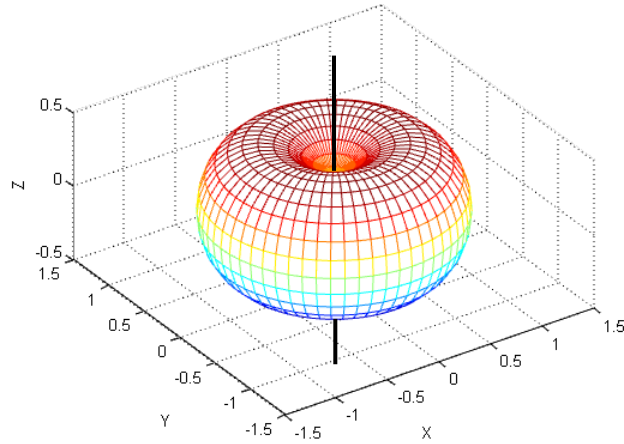
เมื่อ  $\theta$  คือมุมที่ขึ้นระหว่างแกนนี้ไทเซชันกับ easy axis โดยพลังงานของระบบจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแกนนี้ไทเซชันวางตัวขนานกับ easy axis ทั้งทางบวกและทางลบ และพลังงานมีค่ามากที่สุดเมื่อแกนนี้ไทเซชันตั้งฉากกับ easy axis ในทางปฏิบัติค่าคงที่แอนไอโซโทรปี  $K_0$  สามารถกำหนดเป็นค่าอะไรก็ได้ ในแบบจำลองจึงกำหนดให้  $K_0 = 0$  สำหรับค่าคงที่  $K_2$  จะมีขนาดเล็กกว่า  $K_1$  จึงสามารถตัดพจน์ของ  $K_2$  ได้ ทำให้ได้สมการสำหรับคำนวณพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวดังสมการที่ (2.37) เมื่อกำหนดให้  $K_u$  คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว (uniaxial anisotropy constant)

$$E_{a,uni} = \int_v K_u [1 - (\vec{m} \cdot \vec{a})^2] dv \quad (2.37)$$

กราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 เส้นทึบสีดำแสดง easy axis หรือแกนที่แกนนี้ไทเซชันชี้แล้วมีพลังงานน้อยที่สุด

สนามแอนไอโซโทรปีสามารถคำนวณได้โดยใช้พลังงานแอนไอโซโทรปีในสมการที่ (2.37) แทนลงในสมการที่ (2.31) ได้ผลดังสมการที่ (2.38) เมื่อกำหนดให้  $\vec{H}_{an}$  คือสนามแอนไอโซโทรปี  $\vec{a}$  คือเวกเตอร์แสดงทิศทางของ easy axis และ  $\vec{m}$  คือเวกเตอร์ทิศทางของแกนนี้ไทเซชันสนามแม่เหล็กแอนไอโซโทรปีมีขนาดมากที่สุดเมื่อแกนนี้ไทเซชันขนานกับ easy axis และมีขนาดน้อยที่สุดเมื่อตั้งฉากกับ easy axis

$$\vec{H}_{an} = \frac{2K_u}{\mu_0} (\vec{m} \cdot \vec{a}) \vec{a} \quad (2.38)$$



รูปที่ 2.17 พลังงานที่ผิวกรณิแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดี่ยว เส้นตรงสีดำแสดง easy axis ที่อยู่ในแนวแกน z  
ที่มา: Ozan Aktas, “Multi-frequency fluxgate magnetic force microscopy” (M. S. thesis, department of physics, the institute of engineering and science, university of bilkent, September 2008), 13

#### 2.4.4.2.2 แอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ (cubic anisotropy)

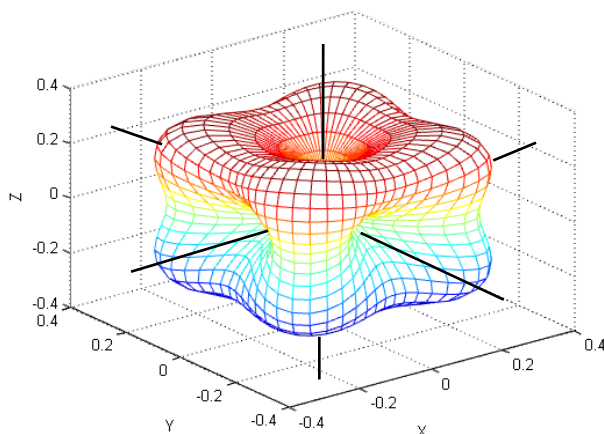
พลังงานแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในทิศของ easy axis ดังแสดงในสมการที่ (2.39) กำหนดให้เวกเตอร์  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  และ  $\vec{a}_3$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ easy axis ทั้งสามแกน โดยเวกเตอร์ทั้งสามตั้งฉากซึ่งกันและกัน

$$E_{ani} = K_1 \left[ (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2 + (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2 + (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 \right] + K_2 \left[ (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2 \right] \quad (2.39)$$

พลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่าน้อยสุดบริเวณ easy axis และพลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่ามากที่สุดบริเวณแนวทแยงมุมของลูกบาศก์ บริเวณนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า hard axis เป็นทิศที่แมกนีไทเซชันไม่ชอบจัดเรียงตัวไปในแกนนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.18

สนามแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์สามารถคำนวณได้โดยใช้พลังงานแอนไอโซโทรปีในสมการที่ (2.39) แทนลงในสมการที่ (2.31) ได้ผลดังสมการที่ (2.40)

$$E_{ani} = 2K_1 \{ [\vec{a}_1 (\vec{m} \cdot \vec{a}_1) (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2 + \vec{a}_1 (\vec{m} \cdot \vec{a}_1) (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2] + [\vec{a}_2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2) (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 + \vec{a}_2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2) (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2] + [\vec{a}_3 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3) (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 + \vec{a}_3 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3) (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2] \} + 2K_2 \{ \vec{a}_1 (\vec{m} \cdot \vec{a}_1) (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2 + [\vec{a}_2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2) (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3)^2] + [\vec{a}_3 (\vec{m} \cdot \vec{a}_3) (\vec{m} \cdot \vec{a}_1)^2 (\vec{m} \cdot \vec{a}_2)^2] \} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.18 พลังงานที่ผิวกรณีแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ เส้นทึบสีดำแสดง easy axis ในทิศ x, y และ z

ที่มา: Ozan Aktas, “Multi-frequency fluxgate magnetic force microscopy” (M. S. thesis, department of physics, the institute of engineering and science, university of bilkent, September 2008), 13

#### 2.4.4.3 สนามเอ็กซ์เชนจ์ (Exchange field)

สนามเอ็กซ์เชนจ์เป็นอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนพลังงานของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีผลในระยะสั้น สนามเอ็กซ์เชนจ์ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้กันพยายามเรียงตัวขนานกัน

สนามเอ็กซ์เชนจ์สามารถคำนวณได้จากพลังงานของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg Hamiltonian) ดังสมการที่ (2.41)

$$E_{ex} = -2J \sum_{i,j} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2.41)$$

เมื่อ  $\vec{S}_i, \vec{S}_j$  คือโมเมนต์เชิงมุมของสปิน และ  $J$  คืออินทิกรัลเอ็กซ์เชนจ์ของสปินที่ใกล้ที่สุด

ถ้ากำหนดให้  $\vec{m}_i$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันที่มีทิศเดียวกับ  $-\vec{S}_i$  จะได้ว่า  $\vec{S}_i = -S\vec{m}_i$  และ  $\theta_{i,j}$  คือมุมขนาดเล็กระหว่าง  $\vec{m}_i$  และ  $\vec{m}_j$  ทำให้เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$E_{ex} = -2JS^2 \sum_{i,j} \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j = -2JS^2 \sum_{i,j} \cos \theta_{i,j} \quad (2.42)$$

$$E_{ex} \approx -2JS^2 \sum_{i,j} \left(1 - \frac{1}{2} \theta_{i,j}^2\right) \quad (2.43)$$

อันตรกิริยาเอ็กซ์เชนจ์ส่งผลให้สปินที่อยู่ข้างกันมีทิศทางแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้น  $\theta_{i,j} = |\vec{m}_j - \vec{m}_i|$

$$E_{ex} \approx \text{constant} + JS^2 \sum_{i,j} (\theta_{i,j}^2) \quad (2.44)$$

$$\approx \text{constant} + JS^2 \sum_{i,j} |\vec{m}_j - \vec{m}_i|^2$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์  $\vec{m}_j - \vec{m}_i$  สามารถเขียนในเทอมฟังก์ชันต่อเนื่องของ  $\vec{m}$  ได้ดังสมการ

$$\vec{m}_j - \vec{m}_i = \Delta \vec{r}_j \cdot \nabla \vec{m} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $\Delta \vec{r}_j = \vec{r}_j - \vec{r}_i$  คือเวกเตอร์ตำแหน่งของสปิน  $j$  กับ  $i$  และ  $\vec{m} = m_x \vec{i}_x + m_y \vec{i}_y + m_z \vec{i}_z$  ทำให้สมการที่ (2.44) กลายเป็น

$$E_{ex} = \text{constant} + JS^2 \sum_j |\Delta \vec{r}_j \cdot \nabla \vec{m}|^2 \quad (2.46)$$

$$E_{ex} \approx \text{constant} + JS^2 \sum_j |(\Delta \vec{r}_j \cdot \nabla m_x)^2 + (\Delta \vec{r}_j \cdot \nabla m_y)^2 + (\Delta \vec{r}_j \cdot \nabla m_z)^2| \quad (2.47)$$

คูณสมการที่ (2.47) ด้วยจำนวนสปิน  $c$  ในหนึ่งหน่วยปริมาตร จะให้ความหนาแน่นพลังงานต่อปริมาตร  $\varepsilon_{ex}$  ดังสมการ (2.48)

$$\varepsilon_{ex} \approx \text{constant} + \frac{1}{6} c JS^2 \sum_j (\Delta \vec{r}_j)^2 \sum_j |(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2| \quad (2.48)$$

เมื่อกำหนดให้  $\sum_j (\Delta \vec{r}_j)^2 = 6a^2$  ความหนาแน่นของจำนวนสปินเท่ากับ  $\frac{c}{a^3}$  และตัดค่าคงที่พจน์หน้าออก จะได้

$$\varepsilon_{ex} \approx A \cdot [(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2] \quad (2.49)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์  $A = \frac{JS^2 c}{a}$  ได้สมการคำนวณหาพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ดังสมการที่ (2.50)

$$E_{ex} = \int A [(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2] d^3 r = A \int (\nabla \vec{m})^2 d^3 r \quad (2.50)$$

พลังงานเอ็กซ์เชนจ์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้กันทำมุมกัน  $180^\circ$  และมีค่าน้อยสุดเมื่อโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้กันขนานกัน (ทำมุม  $0^\circ$ )

เมื่อนำสมการพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ในสมการที่ (2.50) แทนค่าลงในสมการที่ (2.31) จะได้สมการในการคำนวณสนามเอ็กซ์เชนจ์

$$\vec{H}_{ex} = -\frac{2A}{\mu_0} \frac{(\vec{m}_i - \vec{m}_j)}{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2} \quad (2.51)$$

เมื่อกำหนดให้  $\vec{H}_{ex}$  คือสนามเอ็กซ์เชนจ์  $\vec{r}_i$  และ  $\vec{r}_j$  คือตำแหน่งของเซลล์ตัวที่  $i$  และเซลล์ตัวที่  $j$  ที่อยู่ติดกัน

สนามเอ็กซ์เชนจ์ เป็นอันตรกิริยาระหว่างสปินที่ต้องคำนึงถึงการกำหนดขนาดเซลล์ในการคำนวณ หากเซลล์ใหญ่เกินกว่าระยะของอันตรกิริยาเอ็กซ์เชนจ์ แมกนีไทเซชันในเซลล์ที่อยู่ใกล้กันจะไม่สามารถส่งอันตรกิริยาเอ็กซ์เชนจ์ต่อกันได้ทำให้แมกนีไทเซชันของเซลล์ที่อยู่ใกล้กันไม่ขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเซลล์ที่เหมาะสมต้องมีขนาดอยู่ในช่วงของอันตรกิริยาคอนตัม ระยะดังกล่าวถูกเรียกว่า ความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (exchange length,  $l_{ex}$ ) [22] และคำนวณได้จากสมการที่ (2.52)

$$l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} \quad (2.52)$$

#### 2.4.4.4 สนามดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization field)

สนามดีแมกนีไทเซชันเป็นสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากแมกนีไทเซชันภายในสารแม่เหล็กเองซึ่งสนามดีแมกนีไทเซชันจะมีทิศทางข้ามกับแมกนีไทเซชันภายในสารแม่เหล็ก ในสารแม่เหล็กมีแมกนีไทเซชันที่มีพฤติกรรมเหมือนแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง แมกนีไทเซชันแต่ละตัวจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีผลกระทบต่อแมกนีไทเซชันตัวอื่นๆทำให้แมกนีไทเซชันในสารแม่เหล็กพยายามเรียงตัวแบบหัวต่อหางซึ่งเป็นการจัดเรียงที่มีแมกนีไทเซชันรวมน้อยที่สุด

เราสามารถเขียนสมการสนามดีแมกนีไทเซชันที่สอดคล้องกับสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์และสมการความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างแมกนีไทเซชัน ความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $\vec{H}$ ) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) ดังสมการที่ (2.53)

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.53)$$

ใส่โอเปอเรเตอร์ไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ให้กับสมการที่ (2.53) ทั้งสองข้างของสมการ และแทนค่า  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  ทำให้เหลือผลลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.54)

$$\nabla \cdot \vec{H}_d = -\nabla \cdot \vec{M} \quad (2.54)$$

เราสามารถกำหนดค่าสนามแม่เหล็กในรูปของศักย์สเกลาร์ (scalar potential,  $\phi_m$ )  $\vec{H}_d = -\nabla \phi_m$  ลงในสมการ (2.54) ทำให้เราได้สมการที่อยู่ในรูปสมการปัวซอง (Poisson's equation) และกำหนดให้  $\rho_m(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \cdot \vec{M}(\vec{r})$  คือความหนาแน่นประจุแม่เหล็ก

$$\nabla^2 \phi_M = -\frac{\rho_m}{\mu_0} \quad (2.55)$$

สมการที่ (2.55) มีคำตอบของสมการเป็น

$$\begin{aligned} \phi_M &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r \\ \phi_M &= -\frac{1}{4\pi} \int \frac{\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r \end{aligned} \quad (2.56)$$

หลังจากนั้นเราจะทำการคำนวณศักย์แม่เหล็กในสมการที่ (2.56) โดยใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ จะได้

$$\phi_M = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\vec{n}(r') \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' \quad (2.57)$$

โดย ศักย์แม่เหล็ก  $\phi_M$  ที่ได้ประกอบด้วย 2 พจน์ เทอมแรกคืออินทิเกรตเชิงปริมาตรของไดเวอร์เจนของแมกนีไทเซชัน  $\rho_m(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \cdot \vec{M}$  และเทอมที่สองคืออินทิเกรตเชิงพื้นผิวที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากวัสดุแม่เหล็กซึ่งระบุเป็นประจุบนพื้นผิว  $\sigma = \vec{M} \cdot \vec{n}$  จากสมการที่ (2.57) จะได้สนามดีแมกนีไทเซชัน  $\vec{H}_d = -\nabla \phi_M$  ดังสมการที่ (2.58)

$$\vec{H}_d = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' - \frac{1}{4\pi} \int \frac{\vec{n}(r') \cdot \vec{M}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.58)$$

ในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีค่าคงที่ พจน์แรกของสมการจะมีค่าเป็นศูนย์ จะได้สมการสนามดีแมกนีไทเซชัน ดังสมการที่ (2.59)

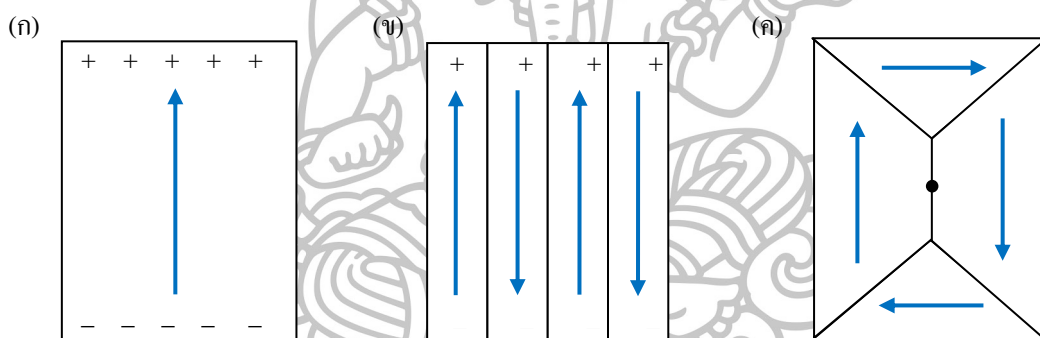
$$\vec{H}_d = -\frac{1}{4\pi} \int \frac{\vec{n}(r') \cdot \vec{M}(\vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.59)$$

เมื่อ  $\vec{H}_d$  คือสนามดีแมกนีไทเซชัน S คือบริเวณผิวของวัสดุแม่เหล็ก และ  $\vec{n}$  คือเวกเตอร์ที่บริเวณพื้นผิว  $\vec{r}$  คือเวกเตอร์ตำแหน่งของโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้รับสนามแม่เหล็กเนื่องจากประจุไฟฟ้าในแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง  $\vec{r}'$

พลังงานดีแมกนีไทเซชันเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันที่มีการจัดเรียงตัวตรงข้ามกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.60)

$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \int \vec{M} \cdot \vec{H}_d d^3r \quad (2.60)$$

เมื่อ  $E_d$  คือพลังงานดีแมกนีไทเซชัน ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการลดจำนวนของประจุแม่เหล็กที่สร้างขึ้นที่บริเวณขอบและพื้นผิวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จากรูปในกรณีที่วัสดุมีโครงสร้างของโดเมนเพียง 1 โดเมน ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก) ส่งผลให้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์จะมีค่าลดลงเนื่องจากสปินที่อยู่ใกล้กันมีการจัดเรียงตัวขนานกัน แต่ที่บริเวณพื้นผิวจะมีจำนวนประจุอยู่เป็นจำนวนมาก และสร้างพลังงานดีแมกนีไทเซชัน ซึ่งในกรณีนี้จะมีพลังงานดีแมกนีไทเซชันสูงที่สุด หลังจากนั้นทำการเพิ่มจำนวนโดเมนแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ข) ในกรณีนี้จำนวนประจุที่บริเวณพื้นผิวจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการแบ่งจำนวนโดเมนให้มากขึ้น พลังงานดีแมกนีไทเซชันจะลดลง และในกรณีที่โดเมนเป็นโดเมนแบบโดเมนปิด (flux closure domain) ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ค) แมกนีไทเซชันจะขนานกับพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นจึงไม่มีประจุที่บริเวณพื้นผิว ไม่มีสนามดีแมกนีไทเซชันและไม่มีพลังงานดีแมกนีไทเซชัน



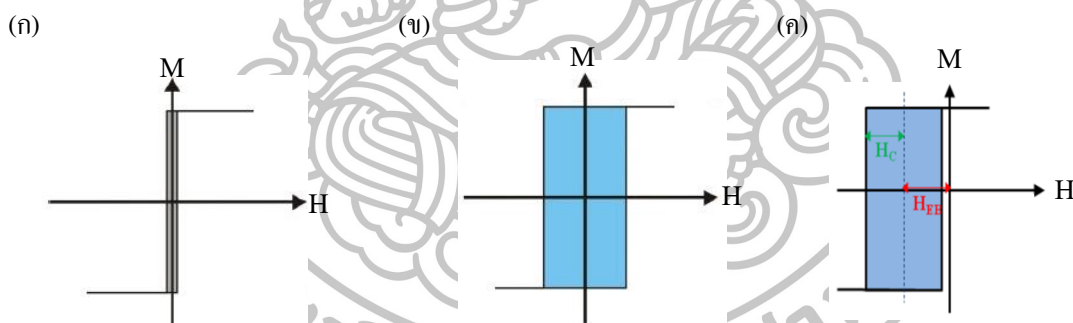
รูปที่ 2.19 การลดลงของสนามดีแมกนีไทเซชัน เมื่อขนาดของโดเมนเพิ่มขึ้นเป็น (ก) 1 โดเมน (ข) 4 โดเมน และ (ค) โดเมนปิด

## 2.5 สนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส (exchange bias field)

ในปี 1956 Meiklejohn and Bean [23, 24] ได้ค้นพบสนามเอ็กซ์เชนจ์แอนไอโซโทรปี (exchange anisotropy field) หรือที่เรียกว่าเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส ซึ่งเป็นการทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นเฟอร์โรแมกเนติกถูกตรึงทิศทางให้เรียงตัวเพียงทิศทางเดียว โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเฟอร์โรแมกเนติก และชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่อยู่ติดกัน โดยทั่วไปชั้นเฟอร์โรแมกเนติกจะมีแกน easy axis ที่ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กพยายามจัดเรียงตัวไปตามแกนนี้ซึ่งมีทิศทางการจัดเรียงตัวได้ 2 ทิศทาง (หมุน  $180^\circ$ ) ตามแนวแกน และเมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวกับ easy axis จะสังเกตว่าฮิสเทอรีซิสลูปของสารเฟอร์โรแมกเนติกสมมาตรรอบแกน 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ก) เมื่อทำการปลูกฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติกบนชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ส่งผล



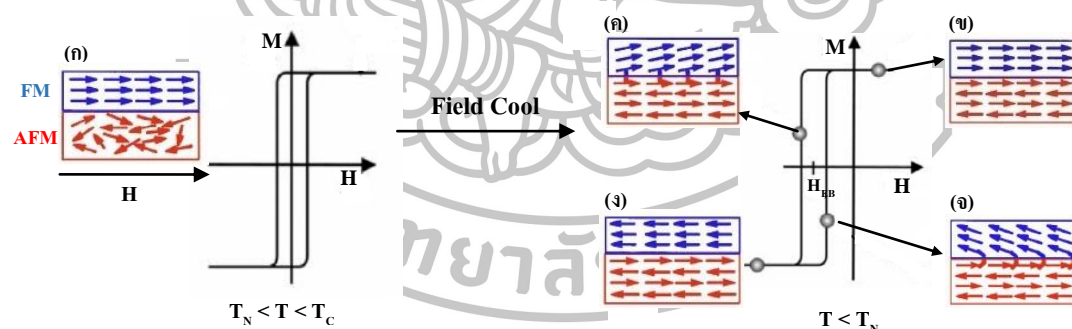
ให้อิสเตอร์ซีสตูปของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกมีความกว้างเพิ่มขึ้น (มีค่า  $H_c$  เพิ่มขึ้น) แต่ยังคงสมมาตรรอบแกนสนามแม่เหล็กเป็น 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ข) แต่เมื่อทำการปลูกฟิล์มเฟอร์โรแมกเนติกบนชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะกลายเป็นพาราแมกเนติก แต่อุณหภูมิที่ให้อิสเตอร์ซีสตูปจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีเพื่อรักษาสภาพของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกไว้ ในระหว่างการปลูกฟิล์มก็ให้สนามแม่เหล็กภายนอกด้วยเพื่อทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก หลังจากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต โมเมนต์แม่เหล็กของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะเริ่มมีการเรียงตัวตามสถานะแอนติเฟอร์โรแมกเนติก แต่ที่บริเวณรอยต่อของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะถูกเหนี่ยวนำจากชั้นเฟอร์โรแมกเนติกส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่บริเวณรอยต่อเรียงตัวในทิศทางเดียวกับชั้นเฟอร์โรแมกเนติก และโมเมนต์แม่เหล็กถัดมาของแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะเรียงตัวในทิศทางขนานกับตัวบนแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อให้แมกนีไทเซชันสุทธิเท่ากับศูนย์ตามสมบัติของแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เราเรียกกระบวนการนี้ว่า field cool ส่งผลให้อิสเตอร์ซีสตูปของเฟอร์โรแมกเนติกไม่สมมาตรและเลื่อนออกจากแกน 0 ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ค)



รูปที่ 2.20 อิสเตอร์ซีสตูปของเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากผลของสนามเอ็กซ์เชนจ์ไอออน เมื่อ (ก) ไม่มีชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (ข) เฟอร์โรแมกเนติกที่ปลูกบนชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (ค) เฟอร์โรแมกเนติกที่ปลูกบนชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ได้รับสนามแม่เหล็ก และมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต

อิสเตอร์ซีสตูปที่เลื่อนไปจากแกน 0 ที่เป็นผลมาจากเอ็กซ์เชนจ์ไอออนของชั้น FM/AFM สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.21 ถ้า  $T_N < T < T_C$  (เมื่อ  $T_N$  คืออุณหภูมิวิกฤต และ  $T_C$  คืออุณหภูมิคูรี :  $T_C > T_N$ ) แล้วทำการจ่ายสนามแม่เหล็กเข้าไป แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกจะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้อิสเตอร์ซีสตูป ในขณะเดียวกันชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะกลายเป็นพาราแมกเนติก เนื่องจากอุณหภูมิที่ให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต แมกนีไทเซชันของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ในกรณีนี้ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

ไม่ส่งผลกระทบต่อชั้นเฟอร์โรแมกเนติก จึงไม่เกิดเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.21(ก) เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังรูปที่ 2.21(ข) ชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะหมดสภาพพาราแมกเนติกและกลายเป็นสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก และเกิดการเหนี่ยวนำที่รอยต่อระหว่างชั้นเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกทำให้แมกนีไทเซชันของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่บริเวณรอยต่อเรียงตัวทิศเดียวกับชั้นเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกย้อนกลับในทิศลบ แมกนีไทเซชันของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกจะเริ่มเปลี่ยนแปลงทิศทาง แต่แมกนีไทเซชันของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะไม่เปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งเป็นผลจากพลังงานแอนไอโซโทรปี แต่จะเกิดการเหนี่ยวนำของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกต่อแมกนีไทเซชันของชั้น FM ที่บริเวณรอยต่อของชั้น FM/AFM ทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น FM มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้นจึงต้องใช้สนามแม่เหล็กในทางลบมากขึ้นในการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ดังรูปที่ 2.21(ค) เมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้นจนสามารถเอาชนะสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่บริเวณรอยต่อของชั้น FM/AFM แมกนีไทเซชันของชั้น FM จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามทั้งหมด ดังรูปที่ 2.21(ง) และเมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับทิศไปในทิศทางเริ่มต้น แมกนีไทเซชันของชั้น FM จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กได้ง่ายขึ้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กเสริมจากชั้น AFM ทำให้สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FM ต่ำลง ดังรูปที่ 2.21(จ)



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของชั้นเฟอร์โรแมกเนติก ที่บริเวณรอยต่อของ FM/AFM เมื่อ (ก) ก่อนผ่านกระบวนการ field cool (ข) หลังจากผ่านกระบวนการ field cool พร้อมทั้งให้สนามแม่เหล็กทางบวก (ค) ให้สนามแม่เหล็กทางลบ (ง) ให้สนามแม่เหล็กจนวนั้วทางลบ (จ) ให้สนามแม่เหล็กทางบวก

### บทที่ 3

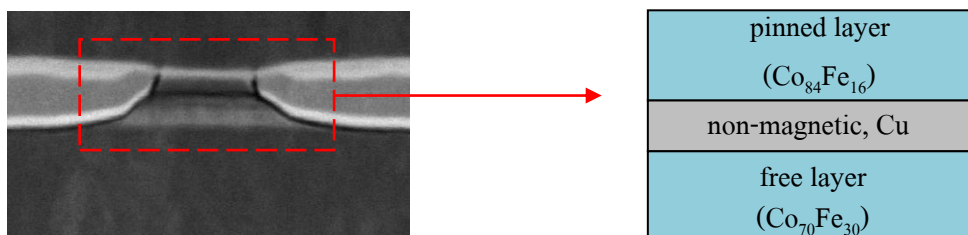
#### การจำลองไมโครแมกเนติก

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาไมโครแมกเนติกของหัวอ่านแบบไอแอนด์แมกนี-  
โตริซิสแอนด์ (GMR) โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OOMMF เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรม  
ของแมกนีไทเซชันในหัวอ่าน GMR ตลอดจนการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็ก  
ภายนอกซึ่งแสดงผลในรูปแบบของฮิสเตอร์ิซิสลูประหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็ก  
ภายนอก (M-H loop) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อสนามแม่เหล็กภาย  
นอก (R-H loop)

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงโครงสร้างของหัวอ่าน GMR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อธิบาย  
แบบจำลองไมโครแมกเนติก ส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง ตัวอย่างการศึกษาทิศทางของ  
แมกนีไทเซชันในรูปแบบของฮิสเตอร์ิซิสลูป การคำนวณมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นตรึง  
(pinned layer, PL) กับชั้นฟรี (free layer, FL) และแสดงการคำนวณค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง  
ไปเพื่อสร้างกราฟ R-H loop

#### 3.1 โครงสร้างของหัวอ่าน GMR

โครงสร้างของหัวอ่าน GMR ที่เราเลือกใช้ในการนำมาสร้างแบบจำลองไมโครแมก-  
เนติกด้วยโปรแกรม OOMMF มีโครงสร้างแบบ CoFe (PL)/Cu (non-magnetic, NM)/CoFe (FL)  
[25] ประกอบด้วยชั้นตรึง (PL) เป็นสารประกอบ CoFe ที่มีอัตราส่วน  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  หนา 3 nm ชั้น  
ฉนวนแม่เหล็กเลือกใช้สาร Cu หนา 3 nm และชั้นฟรี (FL) เป็นสารประกอบ CoFe ที่มีอัตราส่วน  
 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  หนา 3 nm ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR ที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  (3 nm)/Cu (3nm)/  
 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  (3 nm)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองของชั้น PL และชั้น FL แสดงในตารางที่ 3.1 ชั้น PL ถูกตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันด้วยสนามเอ็ชเชนจ์ไบอัสซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กจากชั้น AFM เพื่อกำหนดให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีทิศทางที่แน่นอน โดยในการจำลองไมโครแมกเนติก เราจะป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกขนาด 50 mT คงที่ [25] ในทิศทางแกน y เปรียบเสมือนเป็นสนามเอ็ชเชนจ์ไบอัสจากชั้น AFM กระทำต่อชั้น PL และในการจำลองเราจะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งไปและกลับตั้งแต่ขนาด -1000 mT ถึง +1000 mT ในทิศทางขนานกับ easy axis (+y และ -y) เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากมีเดีย

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก

structure of 3.1.1	pinned layer $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$	free layer $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$
Thickness(nm)	3	1-5
$M_s$ (A/m)	$15 \times 10^5$	$14 \times 10^5$
$K_u$ (J/m <sup>3</sup> )	$5 \times 10^3$	$5 \times 10^3$
A (J/m)	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$
bias field $\langle H_{\text{bias}} \rangle$ (A/m)	50	-
easy axis	y	y

### 3.2 การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF

ผู้วิจัยทำการจำลองไมโครแมกเนติกหัวอ่าน GMR โดยกำหนดโครงสร้างของหัวอ่านให้มีลักษณะเป็นกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดยาว ( $L_x$ ) 50 nm กว้าง ( $L_y$ ) 500 nm และหนา ( $L_z$ ) 9 nm [26] จากนั้นทำการแบ่งขนาดหัวอ่านออกเป็นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า “เซลล์” โดยกำหนดให้โครงสร้างของเซลล์ที่แบ่งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็กมีขนาดเซลล์เป็น  $5 \times 5 \times 0.5 \text{ nm}^3$  ทำให้มีจำนวนเซลล์ในแกน x =10 เซลล์ แกน y =100 เซลล์ แกน z =18 เซลล์ ตามลำดับ ดังนั้นในแบบจำลองของหัวอ่านจะมีจำนวนเซลล์ทั้งหมด 18,000 เซลล์ โดยในการกำหนดความยาวด้านของเซลล์จะต้องมีความยาวน้อยกว่าความยาวเอ็ชเชนจ์

จากนั้นเราจะคำนวณหาการกระจายตัวของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นภายในแต่ละเซลล์ของหัวอ่าน GMR โดยใช้สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต โดยมีรูปสมการดังสมการที่ (3.1)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}}) - \frac{\gamma\alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}}) \quad (3.1)$$

สมการนี้จะอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชัน  $M$  ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กยังผล  $H_{eff}$  เมื่อ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ความหน่วงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และ  $\gamma$  คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) โดยพลังงานที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในการจำลอง ประกอบด้วยพลังงาน 4 ชนิด ดังนี้ พลังงานซีแมน (zeeman energy) พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy) พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy) และพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy)

รายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF มีโครงสร้างของชุดคำสั่งแสดงดังต่อไปนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ใช้กำหนดโครงสร้างของหัวอ่าน ส่วนที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี และค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัว เป็นต้น ส่วนที่ 3 กำหนดสนามแม่เหล็กภายนอก และส่วนที่ 4 เป็นชุดคำสั่งการคำนวณไมโครแมกเนติกด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยกำหนดให้แมกนีไทเซชันเข้าสู่สมดุลเมื่อ  $\frac{dm}{dt} \leq 0.1$

# MIF 2.1 # MIF Example File: GMR.mif

set pi [expr 4\*atan(1.0)]

set mu0 [expr 4\*\$pi\*1e-7]

ส่วนที่ 1 ของโปรแกรมคำสั่ง

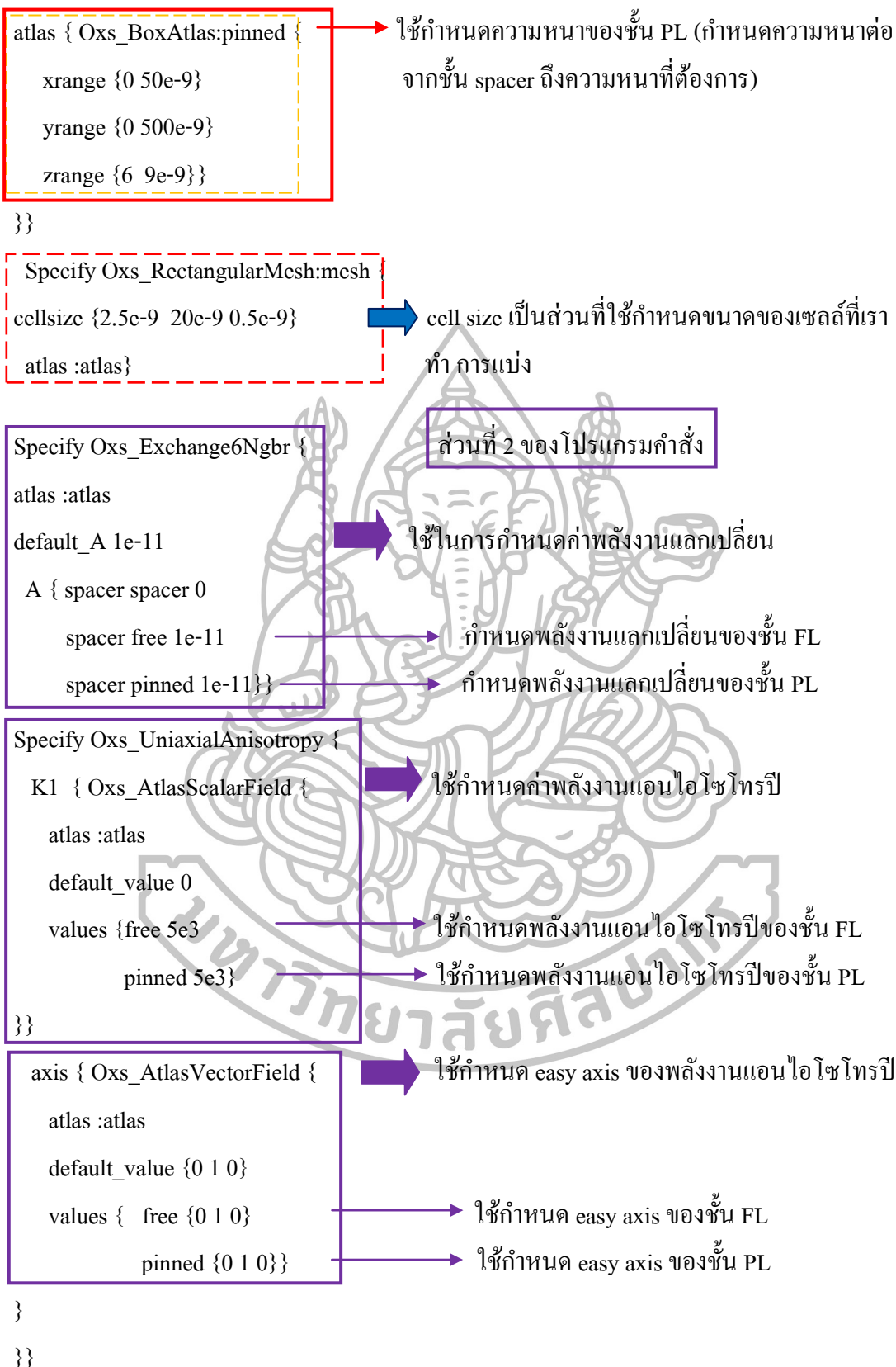
```
Specify Oxs_BoxAtlas:free {
  xrange {0 50e-9}
  yrange {0 500e-9}
  zrange {0e-9 3e-9}}
```

ใช้ในการสร้างหัวอ่านที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมโดย  
xrange แทนความยาวของหัวอ่านในแนวแกน x  
yrange แทนความยาวของหัวอ่านในแนวแกน y  
zrange แทนความหนาของหัวอ่าน

```
Specify Oxs_MultiAtlas:atlas {
  atlas :free
  atlas { Oxs_BoxAtlas:spacer {
    xrange {0 50e-9}
    yrange {0 500e-9}
    zrange {3e-9 6e-9}
  }
}
```

ใช้กำหนดความหนาของชั้น spacer ซึ่งเป็นชั้นที่กั้น  
กลางระหว่างชั้น FL และชั้น PL (โดยกำหนดความหนา  
ต่อ จาก ชั้น FL ถึงความหนาที่ต้องการ)

}}



# Add biasing field to bottom layer. 40 kA/m is approximately 500 Oe.

```
Specify Oxs_FixedZeeman:Bias {
  field { Oxs_AtlasVectorField {
    atlas :atlas
    values { free {0. 0. 0. }
            pinned{0. 40e3 0. }
    }}}
}
```

- ➡ ใช้กำหนดคสนามที่ใช้ในการตั้งทิศทางของแมกนีไทเซชันให้มีทิศทางที่ต้องการ
- ➡ ส่วนที่กำหนดสนามในการตั้งทิศทางของชั้น FL
- ➡ ส่วนที่กำหนดสนามไปอัสของชั้น PL

```
mesh :mesh
```

```
Ms { Oxs_AtlasScalarField {
  atlas :atlas
  default_value 0
  values {
    free 14e5
    pinned 15e5}}}
```

- ➡ ใช้กำหนดค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัวของสารแต่ละตัว
- ➡ ใช้กำหนดค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัวของชั้น FL
- ➡ ใช้กำหนดค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัวของชั้น PL

### # Stepped applied field

```
Specify Oxs_UZeeman [subst {
  multiplier [expr 0.001/$mu0]
  Hrange {
    { 0 0 0 0 1000 0 50 }
    { 0 1000 0 0 0 0 20 }
    { 0 0 0 0 -1000 0 50 }
    { 0 -1000 0 0 0 0 20 }
    { 0 0 0 0 1000 0 50 }
  }}]
```

➡ ส่วนที่ 3 ของโปรแกรมคำสั่ง

- ➡ เป็นการให้สนามแม่เหล็กภายนอกและกำหนดว่าจะให้สนามแม่เหล็กที่แกนไหน พร้อมทั้งใช้แบ่ง stage สนามแม่เหล็กเป็นส่วนย่อยๆ เช่นเราให้สนามแม่เหล็กจาก 0 - 200 mT ถูกแบ่งเป็น 50 สเตจ แสดงว่าสนามแม่เหล็กจะถูกแบ่งเป็น 0-4, 4-8, 8-12 จนถึง 200 mT

```
Specify Oxs_RungeKuttaEvolve:evolve {
  alpha 1.0}
```

➡ ค่า  $\alpha$  ใช้กำหนดว่าระบบจะเข้าสู่สมดุลเร็วหรือช้าโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1

```
Specify Oxs_TimeDriver { evolver :evolve
  stopping_dm_dt 0.1}
```

➡ ส่วนที่ 4

ใช้พิจารณาว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล เมื่อ  $\frac{dm}{dt} \leq 0.1$

```
m0 {0 1 0}
```

➡ เป็นการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของระบบว่าอยู่แกนไหน

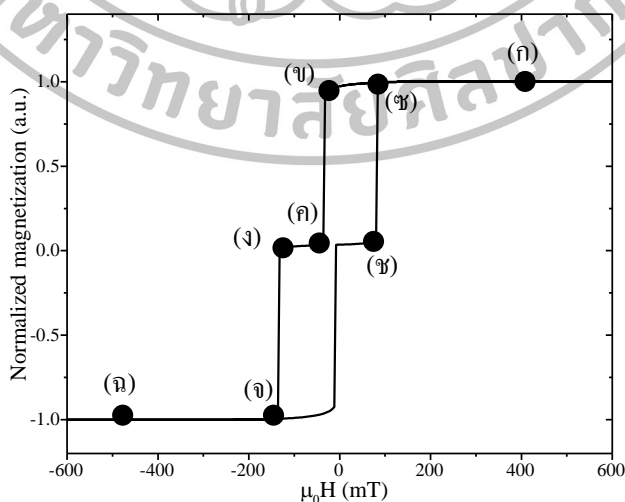
```
}
```

### 3.3 การศึกษาทิศทางของแมกนีไทเซชันจากกราฟฮิสเตอร์ซิสลูป

ในทางปฏิบัติฮิสเตอร์ซิสลูประหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก (M-H loop) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุแม่เหล็ก และสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์แม่เหล็ก โดย M-H loop จะช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็ก และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์แม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้เราจะใช้การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF เพื่อจำลองผล M-H loop ในศึกษาการตอบสนองของหัวอ่าน GMR

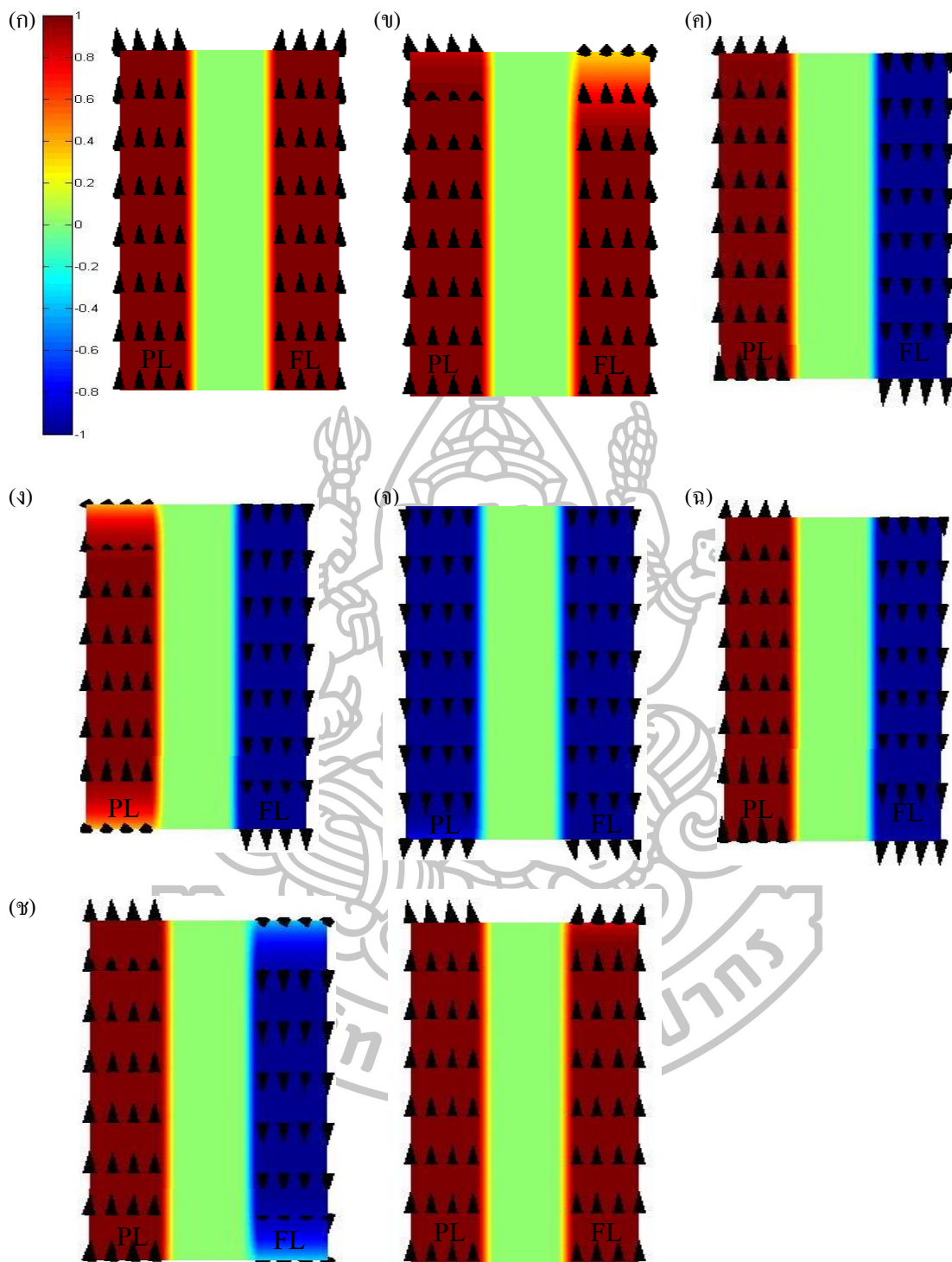
ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OOMMF เราจะทำการกำหนดอินพุตหรือสนามแม่เหล็กภายนอกที่จะป้อนให้กับระบบที่พิจารณา โดยเมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลหรือมีการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันน้อยกว่า 0.1 deg/ns โปรแกรม OOMMF จะทำการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ และจัดเก็บผลการจำลองอยู่ในไฟล์ .odt ซึ่งมีข้อมูลต่างๆ ได้แก่ แมกนีไทเซชันเฉลี่ย สนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานรวมเฉลี่ย พลังงานซีแมนเฉลี่ย พลังงานดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ย พลังงานแอนไอโซโทรปีเฉลี่ย และพลังงานเอ็กซ์เชนจ์เฉลี่ย เป็นต้น และค่าแมกนีไทเซชันที่แต่ละตำแหน่งจะถูกจัดเก็บในไฟล์ .omf

กราฟฮิสเตอร์ซิสลูปของหัวอ่าน GMR เกิดจากการนำค่าแมกนีไทเซชันในแนวแกน y ที่ทำการหาค่าเฉลี่ยมาพลอตกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และทิศทางของแมกนีไทเซชันที่แต่ละตำแหน่งของ GMR ที่นำมาจากไฟล์ .omf แสดงผลดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 ฮิสเตอร์ซิสลูปที่เกิดจากการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR โดยแกน x คือสนามแม่เหล็กภายนอกขนาดตั้งแต่ 1000 mT ถึง -1000 mT และแกน y คือแมกนีไทเซชันเฉลี่ย





รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของ GMR เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $y$  ขนาด (ก) 400 mT (ข) -32 mT (ค) -40 mT (ง) -132 mT (จ) -136 mT (ฉ) -8 mT (ช) 80 mT และ (ซ) 88 mT โดยกำหนดให้สีแดงเข้มแสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันอยู่ในแนวแกน  $+y$  สีน้ำเงินเข้มแสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันอยู่ในแนวแกน  $-y$  และลูกศรสีดำแทนไมโครแมกเนติกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

รูปที่ 3.3 แสดงแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL เมื่อชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT ในแกน +y และให้สนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่ 1000 mT ถึง -1000 mT ในแนวแกน y ตามที่ได้ระบุตำแหน่งไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.3(ก) เป็นช่วงที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก 400 mT ซึ่งแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL เปลี่ยนทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอก (แกน +y) จากนั้นจะให้สนามแม่เหล็กไปในทิศ -y รูป 3.3(ข) พบว่าที่สนามแม่เหล็กขนาด -32 mT แมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศตามสนามแม่เหล็ก แต่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแกน +y เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กขนาด -40 mT แมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนทิศทางตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y แต่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแกน +y ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ค) ขณะที่ทำการเพิ่มสนามแม่เหล็กจนมีขนาด -132 mT แมกนีไทเซชันของชั้น PL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y ดังแสดงในรูป 3.3(ง) และแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ ชั้น FL เปลี่ยนทิศตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y ดังแสดงในรูป 3.3(จ) หลังจากนั้นให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศ +y ในรูป 3.3(ฉ) ที่สนามแม่เหล็กขนาด -8 mT พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL เปลี่ยนทิศทางกลับไปในทิศ +y ก่อนชั้น FL ซึ่งเป็นผลจากสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่ให้แก่ชั้น PL เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขนาด 80 mT แมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศตามสนามแม่เหล็ก แต่แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการจัดเรียงตัวในทิศ +y มากขึ้น ดังแสดงในรูป 3.3(ช) และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กขนาด 88 mT แมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนทิศทางกลับไปในทิศ +y และถ้าเพิ่มสนามแม่เหล็กไปทิศ +y มากขึ้นแมกนีไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL จะเรียงตัวไปในทิศ +y ทั้งหมด

### 3.4 ความต้านทานที่เปลี่ยนไปของหัวอ่าน GMR

การศึกษาความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่าน GMR สามารถพิจารณาได้จากกราฟความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสนามแม่เหล็ก (R-H loop) ซึ่งค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของหัวอ่าน GMR สามารถประมาณได้จากมุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้น PL และชั้น FL [27] การสร้างกราฟ R-H loop จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม OOMMF มีขั้นตอนดังนี้

### 3.4.1 คำนวณข้อมูลของชั้น PL และชั้น FL

ในการจำลองเราได้ทำการบันทึกค่าแมกนีไทเซชันของหัวอ่าน GMR ที่แต่ละช่วงเวลา โดยในแต่ละไฟล์จะมีข้อมูลของแมกนีไทเซชันทั้งหมดตามจำนวนของเซลล์ที่เราทำการแบ่งในชั้นตอนของการจำลอง ดังนั้นเราจึงต้องทำการคำนวณเพื่อแยกแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ออกจากกันซึ่งมีวิธีการคำนวณดังตัวอย่างที่ 3.1

#### ตัวอย่าง 3.1 การคำนวณเพื่อแยกข้อมูลระหว่างชั้น PL และชั้น FL

ในการจำลองหัวอ่านมีขนาด  $L_x = 50 \text{ nm}$   $L_y = 500 \text{ nm}$  และ  $L_z = 9 \text{ nm}$  ทำการแบ่งหัวอ่านออกเป็นเซลล์ขนาด  $dx = 5 \text{ nm}$   $dy = 5 \text{ nm}$  และ  $dz = 0.5 \text{ nm}$  ดังนั้นจะมีจำนวนเซลล์ในแนวแกน  $x = 10$  แกน  $y = 100$  และแกน  $z = 18$  จากนั้นแยกข้อมูลของแต่ละชั้นโดยชั้น FL มีขนาด  $L_z = 3 \text{ nm}$  ถูกแบ่งเซลล์ออกเป็น  $10 \times 100 \times 6 = 6,000$  เซลล์ ดังนั้นข้อมูลของชั้น FL เป็นข้อมูลตั้งแต่ตัวที่ 1–6,000 ชั้น NM มีขนาด  $L_z = 3 \text{ nm}$  ทำให้ชั้น NM ถูกแบ่งเซลล์ออกเป็น  $10 \times 100 \times 6 = 6,000$  เซลล์ จะได้ข้อมูลของชั้น NM เป็นข้อมูลตั้งแต่ตัวที่ 6,001–12,000 และชั้น PL หนา  $3 \text{ nm}$  ทำให้ชั้น PL ถูกแบ่งเซลล์ออกเป็น  $10 \times 100 \times 6 = 6,000$  เซลล์จะได้ข้อมูลของชั้น PL เป็นข้อมูลตั้งแต่ 12,001–18,000

### 3.4.2 คำนวณแมกนีไทเซชันรวมของชั้น PL และชั้น FL

เมื่อทำการแยกข้อมูลแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ออกจากกันแล้ว โดยข้อมูลของแมกนีไทเซชันที่ได้จะอยู่ในรูป  $M_x$   $M_y$  และ  $M_z$  เท่ากับจำนวนเซลล์ที่เราทำการแบ่งในแต่ละชั้นจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันในแนวแกน  $x$  แกน  $y$  และแกน  $z$  เราจะได้ค่าแมกนีไทเซชันรวมของแต่ละชั้นที่แต่ละช่วงเวลาของชั้น PL และชั้น FL ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

$$\vec{M}_{PL} = M_{x_1} \hat{i} + M_{y_1} \hat{j} + M_{z_1} \hat{k} \quad (3.2)$$

$$\vec{M}_{FL} = M_{x_2} \hat{i} + M_{y_2} \hat{j} + M_{z_2} \hat{k} \quad (3.3)$$

เมื่อคำนวณหาแมกนีไทเซชันรวมของชั้น PL และชั้น FL เราจะนำทิศทางของแมกนีไทเซชันที่ได้มาคำนวณเพื่อหามุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$\vec{M}_{PL} \cdot \vec{M}_{FL} = |\vec{M}_{PL}| |\vec{M}_{FL}| \cos \theta \quad (3.4)$$

$$\text{โดยที่ } |\vec{M}_{PL}| = \sqrt{(M_{x_1})^2 + (M_{y_1})^2 + (M_{z_1})^2}$$

$$|\vec{M}_{FL}| = \sqrt{(M_{x_2})^2 + (M_{y_2})^2 + (M_{z_2})^2}$$

$$\text{และ } \vec{M}_{PL} \cdot \vec{M}_{FL} = M_{x_1}M_{x_2} + M_{y_1}M_{y_2} + M_{z_1}M_{z_2}$$

จากสมการ (3.4) จะได้

$$\theta = \arccos \left( \frac{\vec{M}_{PL} \cdot \vec{M}_{FL}}{|\vec{M}_{PL}| |\vec{M}_{FL}|} \right) \quad (3.5)$$

ในการคำนวณหามุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ของข้อมูลที่ถูกจัดเก็บอยู่ในไฟล์ .omf ที่ตำแหน่งเพียงหนึ่งตำแหน่ง มีวิธีการคำนวณดังตัวอย่างที่ 3.2

**ตัวอย่าง 3.2** การคำนวณหามุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ของข้อมูลที่ให้สนามแม่เหล็กเป็น 0 mT

$$\text{กำหนดให้ } \vec{M}_{PL} = (-1.17 \times 10^6) \hat{i} + 8.88 \times 10^5 \hat{j} + 7.35 \hat{k}$$

$$\vec{M}_{FL} = 1.23 \times 10^6 \hat{i} + (-6.35 \times 10^5) \hat{j} + 5.49 \hat{k}$$

$$\text{จากสมการ (2) } \vec{M}_{PL} \cdot \vec{M}_{FL} = |\vec{M}_{PL}| |\vec{M}_{FL}| \cos \theta$$

$$\text{โดยกำหนดให้ } |\vec{M}_{PL}| = \sqrt{(-1.17 \times 10^6)^2 + (8.88 \times 10^5)^2 + (7.35)^2} = 1.46 \times 10^6$$

$$|\vec{M}_{FL}| = \sqrt{(1.23 \times 10^6)^2 + (-6.35 \times 10^5)^2 + (5.49)^2} = 1.38 \times 10^6$$

$$\text{จะได้ } |\vec{M}_{PL}| |\vec{M}_{FL}| = 2.03 \times 10^{12}$$

$$\text{และ } \vec{M}_{PL} \cdot \vec{M}_{FL} = M_{PL_1} M_{FL_1} + M_{PL_2} M_{FL_2} + M_{PL_3} M_{FL_3}$$

$$= (-1.17 \times 10^6)(1.23 \times 10^6) + (8.88 \times 10^5)(-6.35 \times 10^5) + (7.35)(5.49)$$

$$= -2.01 \times 10^{12}$$

$$\text{แทนค่าในสมการที่ 2 จะได้ } -2.01 \times 10^{12} = (2.03 \times 10^{12}) \cos \theta$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{-2.01 \times 10^{12}}{2.03 \times 10^{12}} \right)$$

$$\theta = 171.95^\circ$$

ดังนั้นเราจะได้มุมที่เกิดขึ้นระหว่างแกนนี้ไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ของข้อมูลที่ได้รับสนามแม่เหล็กเป็น 0 mT เป็น  $171.95^\circ$

### 3.4.3 คำนวณหาความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของหัวอ่าน GMR

เมื่อเราทำการคำนวณมุมระหว่างแกนนี้ไทเซชันของชั้น PL และ FL จากนั้นนำมุมที่ได้มาคำนวณหาความต้านทานได้ดังสมการที่ (2.10)

$$R(\theta) = R_p \left( 1 + MR \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \right) \quad (2.10)$$

เนื่องจากอัตราส่วน  $MR$  ในสมการที่ (2.10) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของ GMR ที่มีค่าขึ้นอยู่กับสารที่ใช้สร้าง เทคนิคการปลูกฟิล์มของแต่ละชั้น รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ออบ GMR อัตราส่วน  $MR$  จึงเป็นตัวแปรที่ต้องวัดจากการทดลอง ค่าที่ได้จากการจำลองจึงไม่สามารถแสดงค่าความต้านทานออกมาเป็นตัวเลขได้ แบบจำลองนี้จึงเลือกใช้ค่า  $\frac{1}{2}(1 - \cos \theta)$  แทนความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปของหัวอ่าน GMR [28] จะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2}(1 - \cos(171.95^\circ))$$

จะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = 0.995$$

เนื่องจากข้อมูลที่ทำการบันทึกมีจำนวนของข้อมูลมาก และมีการแบ่งช่วงของสนามแม่เหล็กออกเป็นหลาย stage เพื่อให้ข้อมูลมีความละเอียดและมีความแม่นยำมากขึ้น จึงอาจทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณค่าแกนนี้ไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL คำนวณมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแกนนี้ไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสอง และคำนวณหาความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยในโปรแกรมคำสั่งของโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย 5 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของหัวอ่าน ส่วนที่ 2 ใช้กำหนดข้อมูลของชั้น FL ชั้น NM และชั้น PL ส่วนที่ 3 ใช้ในการคำนวณค่าแกนนี้ไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL ในแนวแกน x แกน y และแกน z ส่วนที่ 4 ใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรและสมการที่

ใช้ในการคำนวณมุมที่เกิดขึ้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL และสมการในการคำนวณความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป และส่วนที่ 5 เป็นส่วนที่ใช้กำหนดเพื่อแสดงค่าที่โปรแกรมทำการคำนวณ และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะถูกเก็บอยู่ในไฟล์ open ซึ่งแสดงรายละเอียดของโปรแกรมดังนี้

```

clc
Lx = 50;
Ly = 500;
Lz = 9;

cellsize_x = 5;
cellsize_y = 5;
cellsize_z = 0.5;

cellx_num = Lx/cellsize_x;
celly_num = Ly/cellsize_y;
cellz_num = Lz/cellsize_z;

Lz_pinned = 3/cellsize_z;
Lz_oxide = 3/cellsize_z;
Lz_free = 3/cellsize_z;

free_start = 1;
free_stop = (cellx_num*celly_num*Lz_free);
oxide_start = 1+(cellx_num*celly_num*Lz_free);
oxide_stop = (cellx_num*celly_num*(Lz_free+Lz_oxide));
pinned_start = 1+(cellx_num*celly_num*(Lz_free+Lz_oxide));
pinned_stop = cellx_num*celly_num*cellz_num;

name=dir('*.omf');

fid = fopen('open.txt','a');    %save output in file open.txt
fprintf(fid,'%59s\t%s\t%s\t%s\n','file name','mx','my','mz');

```

**ส่วนที่ 1**  
กำหนดขนาดกล่องสี่เหลี่ยมที่ทำการจำลอง

กำหนดขนาดของเซลล์

ส่วนที่แบ่งหัวอ่านออกเป็นส่วนย่อยๆ

ส่วนที่แบ่งเซลล์ของหัวอ่านในแนวแกน z แกน

**ส่วนที่ 2**  
กำหนดว่าแต่ละชั้นจะเลือกข้อมูลตั้งแต่ตัวที่เท่าใดและสิ้นสุดที่ตัวที่เท่าใด

```

for i=1:351
A=importdata(name(i,1).name, '', 38);

m=A.data;
mx1=mean(mean(mean(m(1:free_stop,1))));
my1=mean(mean(mean(m(1:free_stop,2))));
FL
mz1=mean(mean(mean(m(1:free_stop,3))));
mx2=mean(mean(mean(m(pinned_start:pinned_stop,1))));
my2=mean(mean(mean(m(pinned_start:pinned_stop,2))));
mz2=mean(mean(mean(m(pinned_start:pinned_stop,3))));

a=[mx1 my1 mz1];
b=[mx2 my2 mz2];
c=dot(a,b);

zeta=acosd(c/(sqrt(dot(a,a)).*sqrt(dot(b,b))))
deltaR=1-cosd(zeta)/2

fprintf(fid,'%59s\t%d\t%d\t%d\t%d\r\n',name(i,1).name,mx1,my1,mz1);
fprintf(fid,'%59s\t%d\t%d\t%d\t%d\r\n',name(i,1).name,mx2,my2,mz2);
fprintf(fid,'%59s\t%d\n',name(i,1).name,theta);
fprintf(fid,'%59s\t%d\n',name(i,1).name,deltaR);

end

fclose(fid);

display('finish');

```

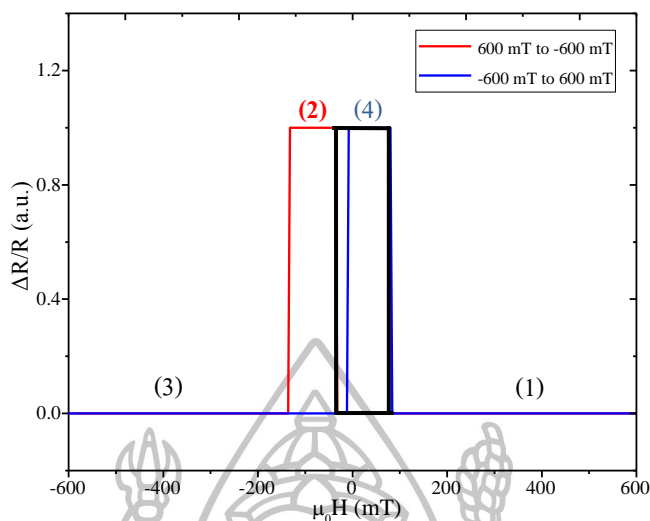
**ส่วนที่ 3**  
โปรแกรมจะอ่านไฟล์ข้อมูลตั้งแต่ข้อมูลที่ 1 ถึงข้อมูลที่ 351 โดยคำนวณแยกแมกนีไทเซชันรวมของชั้น PL และแมกนีไทเซชันรวมชั้น

**ส่วนที่ 4**  
เป็นส่วนที่กำหนดค่าของตัวแปร

สมการที่ใช้ในการคำนวณมุมที่เกิดขึ้นและคำนวณความต้านทานที่เปลี่ยนไป

**ส่วนที่ 5**  
เป็นส่วนที่แสดงค่าที่โปรแกรมคำนวณออกมา

หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ทำการคำนวณมาสร้างกราฟระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปกับสนามแม่เหล็กภายนอก (R-H loop) ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างของหัวอ่าน GMR ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่แกน x คือ สนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้ และแกน y คือค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของหัวอ่าน GMR



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (R-H loop) ของหัวอ่าน GMR ที่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT ในทิศ +y เส้นทึบสีแดงแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อให้สนามแม่เหล็กขนาด 1000 mT ถึง -1000 mT เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อให้สนามแม่เหล็กขนาด -1000 mT ถึง 1000 mT และเส้นทึบสีดำ แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของชั้น FL

จากรูปที่ 3.4 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้กับหัวอ่าน GMR โดยเราพบว่าเมื่อหัวอ่าน GMR ได้รับสนามแม่เหล็กจากภายนอกแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะหมุนเปลี่ยนทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอก โดยเมื่อเราเพิ่มสนามแม่เหล็กจนมีค่า 600 mT จะสังเกตเห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวขนานและมีทิศทางเดียวกันทางแกน +y (แมกนีไทเซชันทำมุม  $0^\circ$ ) ทำให้หัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานลดลงจากค่าความต้านทานปกติ ดังแสดงในช่วงที่ (1) แต่เมื่อเราทำการลดสนามแม่เหล็กลงแมกนีไทเซชันที่ชั้น FL เริ่มเปลี่ยนทิศทางกลับมาเข้าสู่ทางทิศ -y ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในทิศ +y เนื่องจากชั้น PL ได้รับอิทธิพลจากสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจึงทำให้เปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ทำมุมมากกว่า  $0^\circ$  หัวอ่าน GMR จึงมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเพิ่มขึ้นจากค่าความต้านทานปกติดังแสดงในช่วงที่ (2) หลังจากนั้นเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จนมีขนาด 600 mT ในทิศ -y แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวขนานและมีทิศทางเดียวกันในทิศ -y ทำให้หัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานลดลงจากค่าความต้านทานปกติอีกครั้งดังแสดงในช่วงที่ (3) และเมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับในทิศ +y แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะ



เปลี่ยนแปลงทิศทางกลับเข้าสู่ทิศ  $+y$  ง่ายกว่าชั้น FL เนื่องจากมีสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสในทิศ  $+y$  เสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน  $-y$  ทำให้หัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเพิ่มขึ้นจากค่าความต้านทานปกติดังแสดงในช่วงที่ (4)

ที่บริเวณเส้นทึบสีดำแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของชั้น FL เป็นช่วงที่จะใช้พิจารณาความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (sensitivity) โดยหัวอ่าน GMR จะมีความไวในการตอบสนอง เมื่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของชั้น FL เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศ  $+y$  และ  $-y$  ซ้อนทับกัน แต่ถ้าหัวอ่าน GMR จะมีความไวในการตอบสนองช้า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของชั้น FL เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศ  $+y$  และ  $-y$  เกิด loop หรือไม่ซ้อนทับกัน

### 3.5 การวิเคราะห์พลังงาน

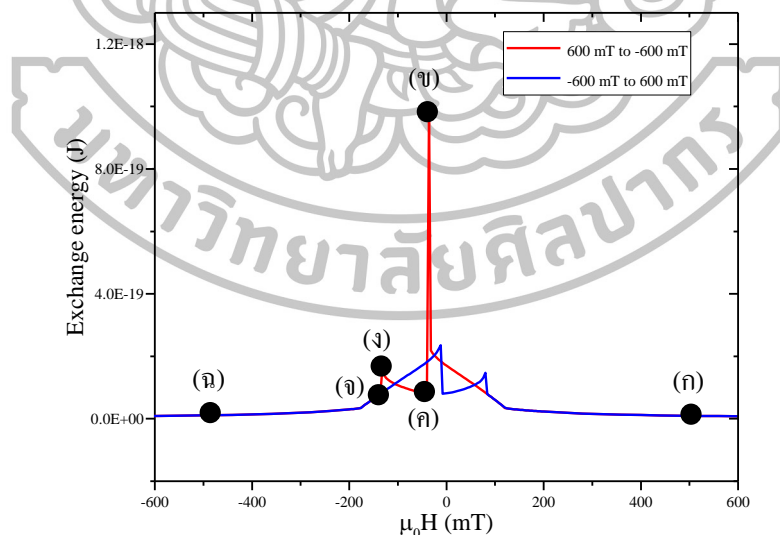
การศึกษาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่าน GMR นอกจากสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟ M-H loop และ R-H loop แล้ว เรายังสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับค่าพลังงานต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย พลังงานรวม พลังงานซีแมน พลังงานดีแมกนีไทเซชัน พลังงานแอนไอโซโทรปี และพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ ที่ได้จากการจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF และจัดเก็บข้อมูลอยู่ในไฟล์ .odt

#### 3.5.1 การวิเคราะห์พลังงานเอ็กซ์เซนจ์

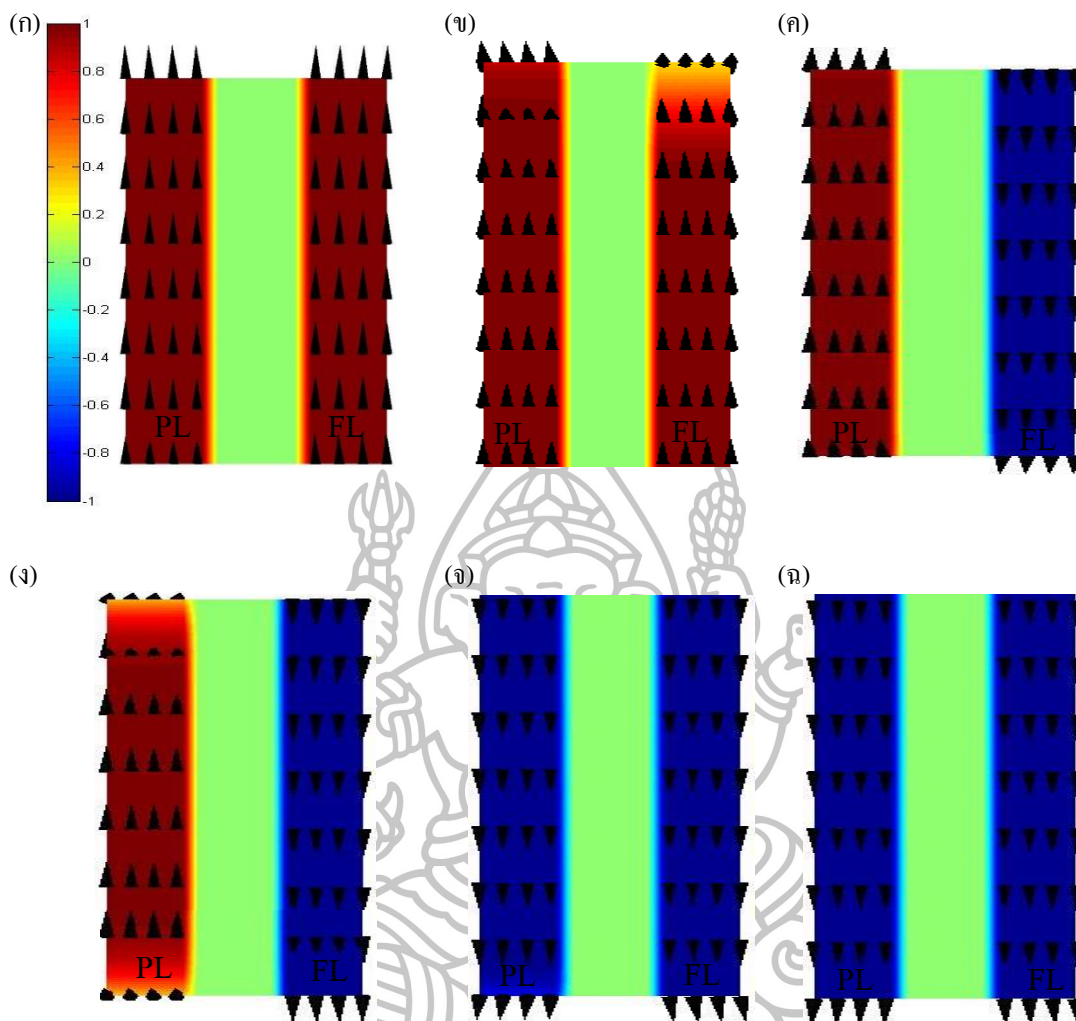
กราฟพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ของหัวอ่าน GMR เกิดจากการนำค่าพลังงานเอ็กซ์เซนจ์เฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL มีหน่วยเป็นจูล (J) มาพลอตกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยพลังงานเอ็กซ์เซนจ์จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอก และพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ มีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงข้ามกัน

จากรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 พิจารณาเส้นกราฟสีแดงของกราฟพลังงานเอ็กซ์เซนจ์เฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL ที่ให้สนามภายนอกจาก 1000 mT ถึง -1000 mT ในแนวแกน  $y$  จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ(ก) แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน  $+y$  ทั้งหมด ส่งผลให้พลังงานเอ็กซ์เซนจ์มีค่าเป็น 0 J เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงาน

เอ็กซ์เชนจ์ในการทำให้แมกนีไทเซชันเบี่ยงเบนทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อกราฟพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ เพิ่มขึ้นที่บริเวณ(ข) แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน +y ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน +y ทำให้มีพลังงานเอ็กซ์เชนจ์มากขึ้น เนื่องจากชั้น FL ต้องใช้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ในการกลับทิศทางตามสนามแม่เหล็ก ที่บริเวณ(ค) แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน +y ส่วน แมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนแปลงทิศทางในแนวแกน y เกือบทั้งหมดทำให้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์มีค่าลดลง เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมาที่บริเวณ(ง) ชั้น FL มีการเรียงตัวในแนวแกน -y ทั้งหมดส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น PL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวไปในแกน -y ทำให้มีพลังงานเอ็กซ์เชนจ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้น PL ต้องใช้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ในการกลับทิศทางตามสนามแม่เหล็ก จากนั้นก็เพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นเรื่อยๆที่บริเวณ(จ) แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยลง เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กมีทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กจนถึงสภาวะอิ่มตัวที่บริเวณ(ฉ) แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมด แมกนีไทเซชันไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์มีค่าลดลงเป็น 0 J



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานเอ็กซ์เชนจ์เฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL กับสนามแม่เหล็กภายนอก



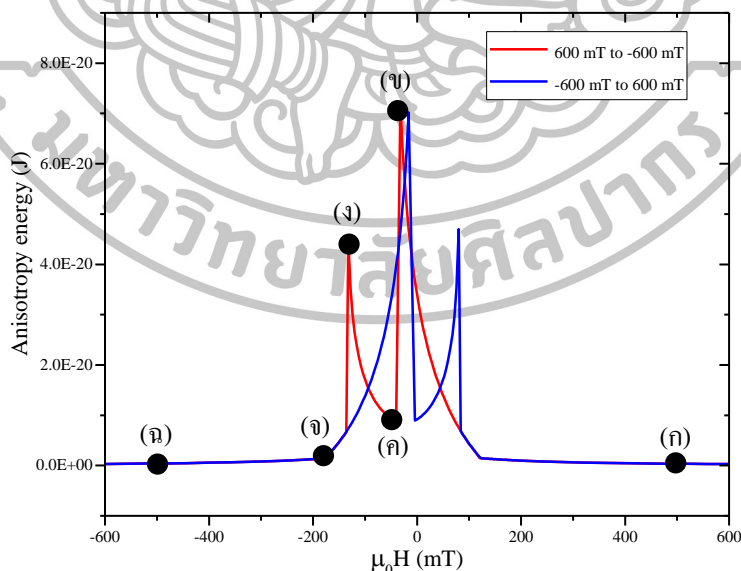
รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ที่สัมผัสกับพลังงานเอ็กซ์เซนจ์เฉลี่ยกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้หัวอ่าน GMR

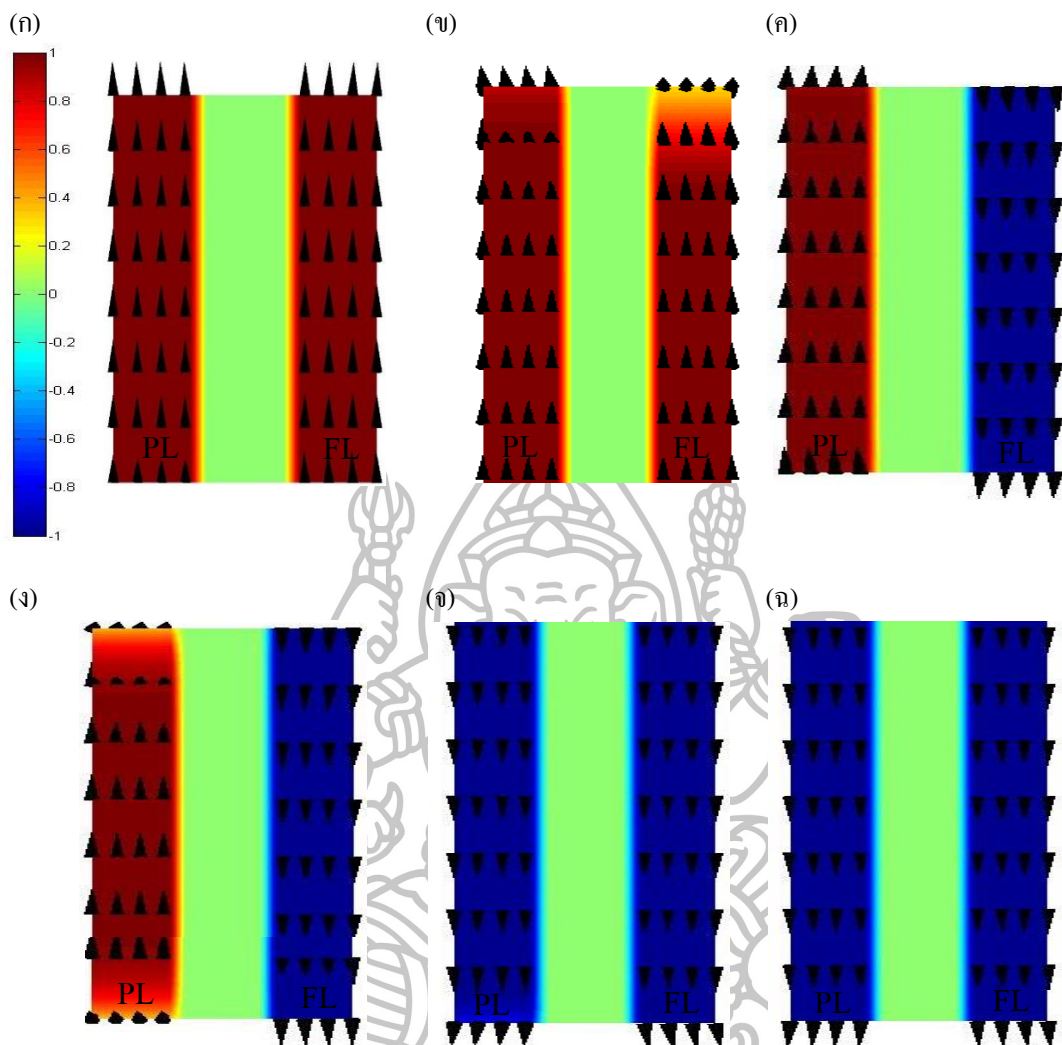
### 3.5.2 การวิเคราะห์พลังงานแอนไอโซโทรปี

กราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีของหัวอ่าน GMR เกิดจากการนำค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL มีหน่วยเป็น J มาพลดกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยพลังงานแอนไอโซโทรปีจะมีค่าน้อยที่สุด เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกับ easy axis และพลังงานแอนไอโซโทรปีจะมีค่ามากที่สุด เมื่อแมกนีไทเซชันมีทิศทางตั้งฉากกับ easy axis

จากรูปที่ 3.7 พิจารณาเส้นกราฟสีแดงของกราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีเฉลี่ยที่ให้สนามภายนอกจาก 1000 mT ถึง -1000 mT ในแนวแกน y จะเห็นว่าที่บริเวณ(ก) แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน +y ทั้งหมด แสดงว่า

แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองขนาน และมีทิศทางเดียวกับ easy axis ส่งผลให้พลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่าเป็น 0 เมื่อกราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีเพิ่มขึ้นที่บริเวณ(ข) แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน +y ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศทางไปทิศ -y ทำให้เกิดมุมระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กกับ easy axis ส่งผลทำให้มีพลังงานแอนไอโซโทรปีสูงขึ้น ที่บริเวณ(ค) แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน +y ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนแปลงทิศทางในแนวแกน -y เกือบทั้งหมดทำให้พลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่าลดลง เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมาที่บริเวณ(ง) ชั้น FL มีการเรียงตัวในแนวแกน -y ทั้งหมดส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น PL เริ่มมีการเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวไปในแกน -y ทำให้มีพลังงานแอนไอโซโทรปีเพิ่มขึ้น จากนั้นก็เพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นเรื่อยๆที่บริเวณ(จ) แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวไปในแกน -y เกือบทั้งหมด แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้น ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองทำมุมกับ easy axis ลดลง พลังงานแอนไอโซโทรปีจึงมีค่าลดลง จนถึงสถานะอิ่มตัวที่บริเวณ(ฉ) แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมด แมกนีไทเซชันภายในของชั้นแม่เหล็กทั้งสองขนานและมีทิศทางเดียวกับ easy axis ( $\theta = 0$ ) ทำให้พลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่าลดลงเป็น 0 J

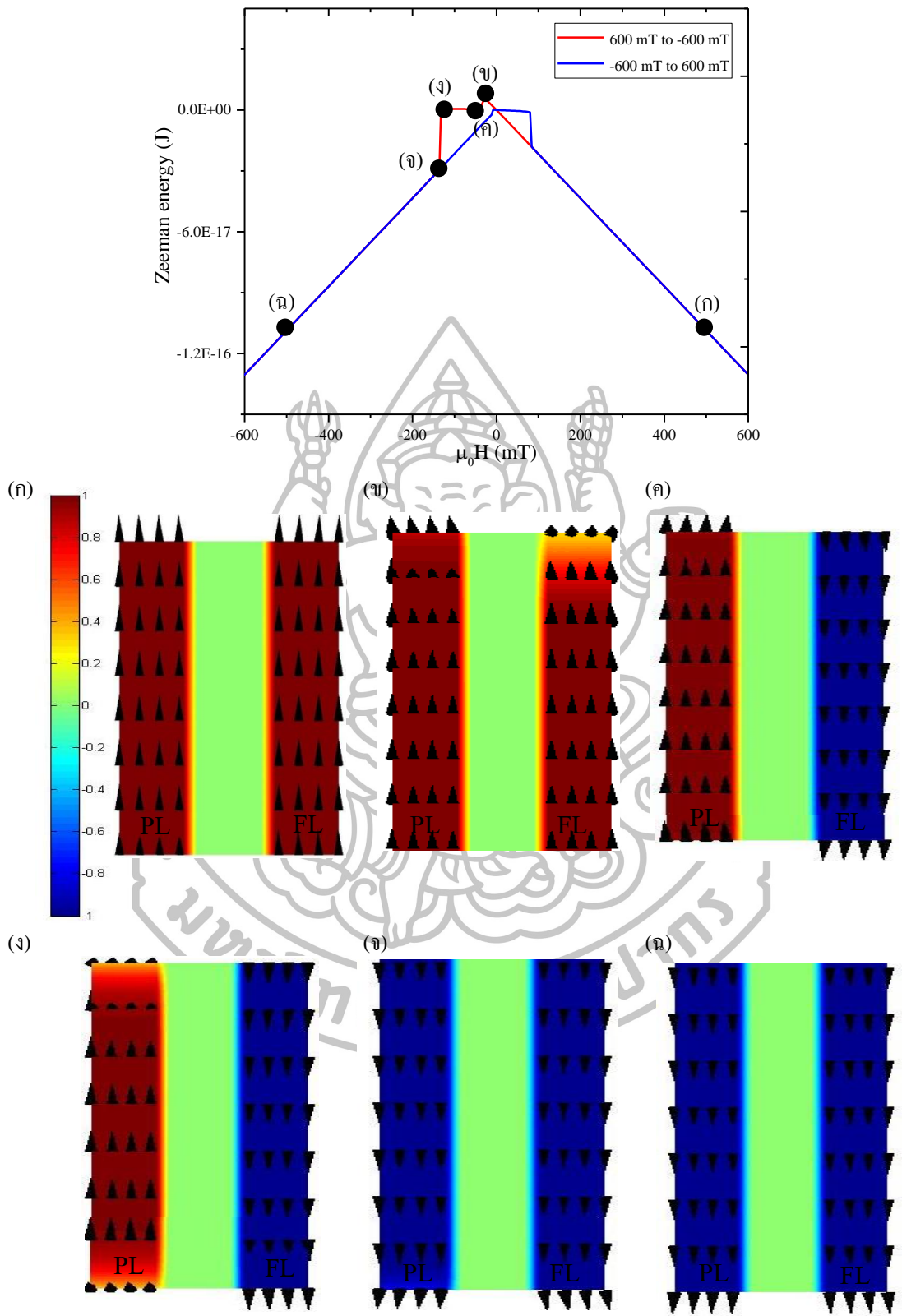




รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแอมไอโซโทปเปลี่งของชั้น PL และชั้น FL กับสนามแม่เหล็กภายนอก

### 3.5.3 การวิเคราะห์พลังงานซีแมน

กราฟพลังงานซีแมนของหัวอ่าน GMR เกิดจากการนำค่าพลังงานซีแมนเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL มีหน่วยเป็น J มาพลอตกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยพบว่าพลังงานซีแมนจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กมีการจัดเรียงตัวไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้ และพลังงานซีแมนจะมีค่าเป็น 0 J เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานซีแมนเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL กับสนามแม่เหล็กภายนอก

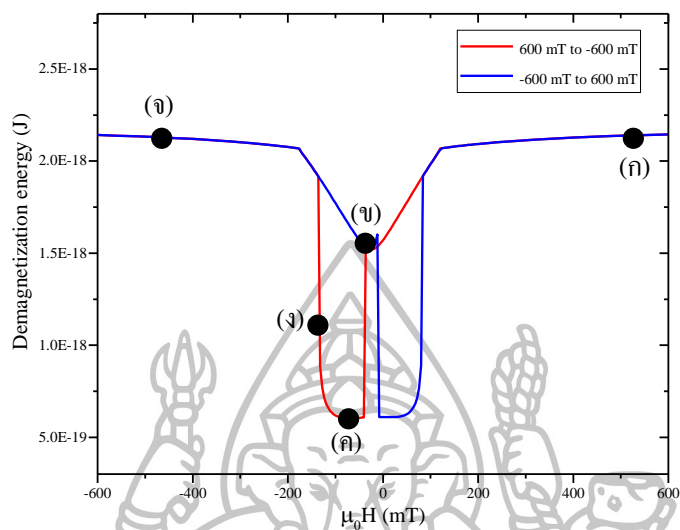
จากรูปที่ 3.8 พิจารณาเส้นกราฟสีแดงของกราฟพลังงานซีแมนเฉลี่ยที่ให้สนามภายนอกจากขนาด 1000 mT ถึง -1000 mT ในแนวแกน y จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ(ก) แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน +y ทั้งหมดทำให้พลังงานซีแมนมีค่าน้อย และจะน้อยลงเรื่อยๆเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้น เมื่อกราฟพลังงานซีแมนเพิ่มขึ้นที่บริเวณ(ข) แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวแกน -y ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มเปลี่ยนทิศทางมาในแนวแกน -y ทำให้พลังงานซีแมนมีค่าสูงที่สุด ที่บริเวณ(ค) และ (ง) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจนถึงค่า  $H_c$  พลังงานซีแมนจะมีค่าเป็น 0 J เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในชั้นแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ที่บริเวณ(จ) เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามแนวแกน -y แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยลงและมีทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้น ทำให้พลังงานซีแมนเริ่มมีค่าลดลงทางลบ และเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจนถึงสภาวะอิ่มตัวที่บริเวณ(ฉ) แมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมด ทำให้พลังงานซีแมนมีค่าน้อยลง

#### 3.5.4 การวิเคราะห์พลังงานดีแมกนีไทเซชัน

กราฟพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวอ่าน GMR เกิดจากการนำค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL มีหน่วยเป็น J มาพลอตกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.9 พลังงานดีแมกนีไทเซชันจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน และพลังงานดีแมกนีไทเซชันจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน

จากรูปที่ 3.9 พิจารณาเส้นกราฟสีน้ำเงินของกราฟพลังงานดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ยที่ให้สนามภายนอกจาก -1000 mT ถึง 1000 mT ในแนวแกน y จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ(ก) แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกน +y ทั้งหมดแสดงว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากที่สุดทำให้พลังงานดีแมกนีไทเซชันมีค่ามากที่สุด เมื่อลดสนามแม่เหล็กลงที่บริเวณ(ข) แมกนีไทเซชันของชั้น FL เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังคงเรียงตัวในทิศทาง -y ทำให้พลังงานดีแมกนีไทเซชันมีค่าลดลง ที่บริเวณ(ค) เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศ -y เพิ่มขึ้นแมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังมีทิศทางเรียงตัวอยู่ในแนวแกน +y ส่วนแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศ -y ทำให้พลังงานดีแมกนีไทเซชันมีค่าน้อยที่สุด ที่บริเวณ(ง) แมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการจัดเรียงตัวในทิศ -y ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางมาทาง -y ทำให้พลังงานดีแมกนีไทเซชันเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจนถึงสภาวะอิ่มตัวที่บริเวณ(จ) แมกนีไทเซชันของชั้น

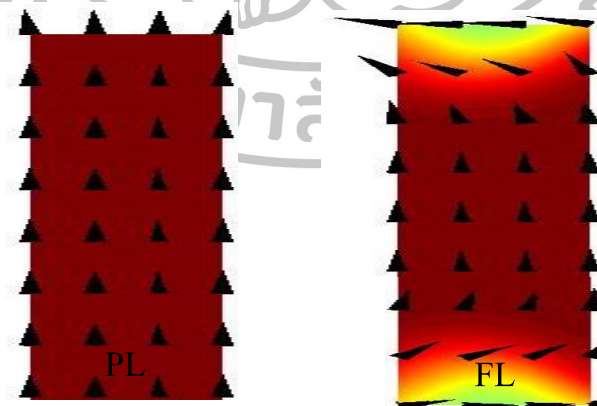
แม่เหล็กทั้งสองเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งหมด ทำให้พลังงานดีแมกนีไทเซชันมีค่าเพิ่มมากที่สุด



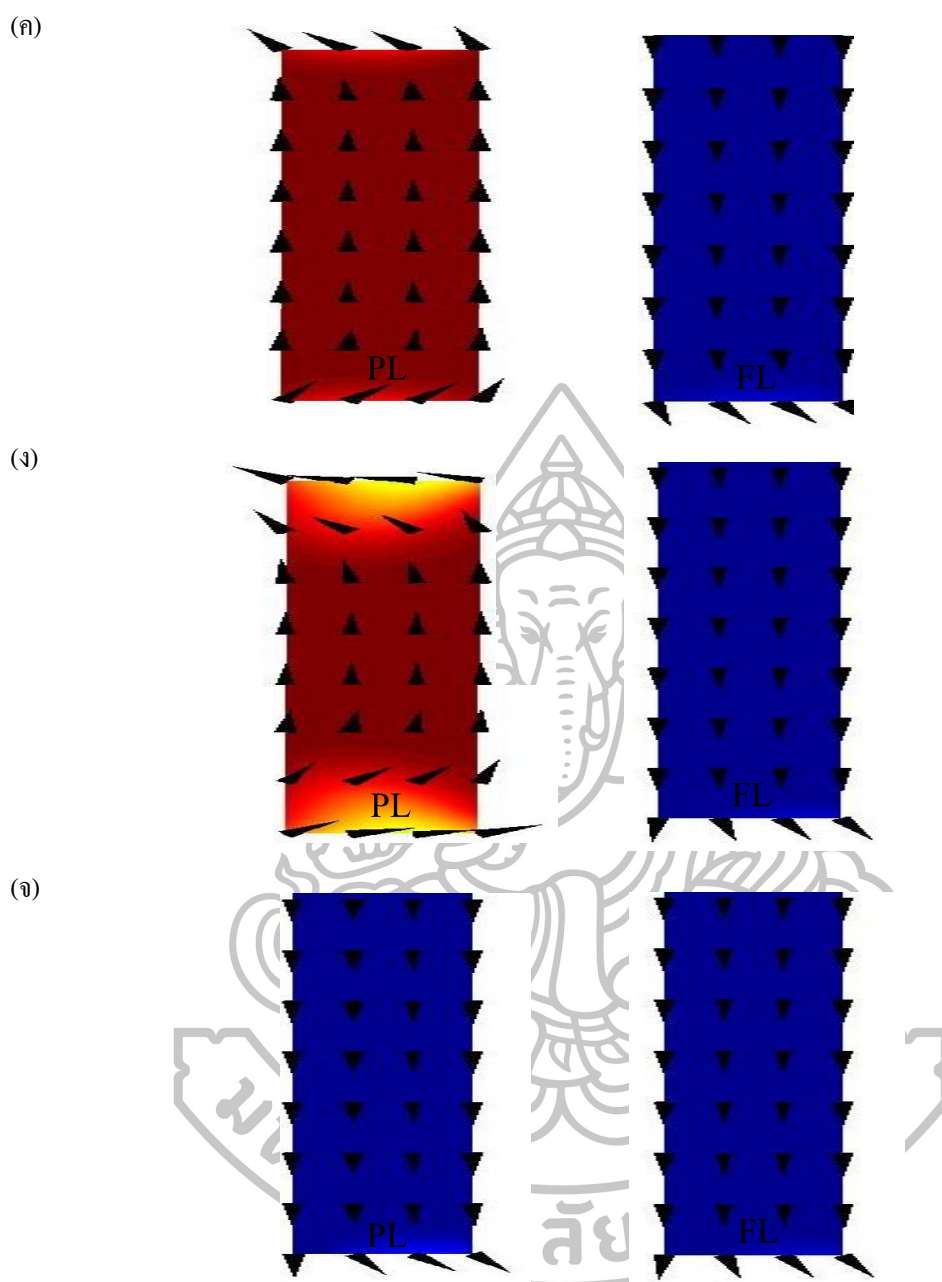
(ก)



(ข)





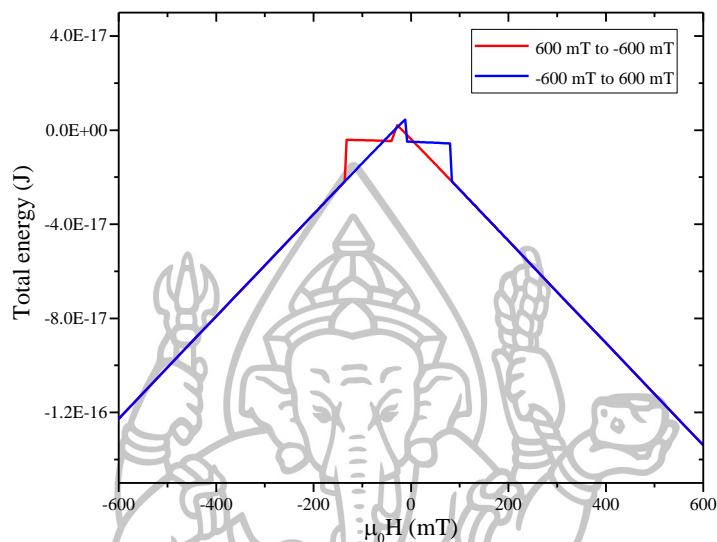


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก

### 3.5.5 การวิเคราะห์พลังงานรวม

พลังงานรวมเฉลี่ยเป็นผลรวมของพลังงานทั้ง 4 ชนิด คือพลังงานซีแมน พลังงานดีแมกนีไทเซชัน พลังงานแอนไอโซโทรปี และพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ ซึ่งพลังงานที่มีอิทธิพลต่อระบบมากที่สุดคือพลังงานซีแมน โดยพลังงานรวมจะมีค่าเป็น 0 จูล เมื่อพลังงานซีแมน และพลังงานดีแมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากันซึ่งเป็นผลจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีขนาดเท่ากับพลังงาน

ดีแมกนีไทเซชันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยกราฟพลังงานรวมเกิดจากการนำค่าพลังงานงานรวมที่ทำการหาค่าเฉลี่ยของชั้น PL และชั้น FL มีหน่วยเป็น J มาพลอตกับสนามแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็น mT ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรวมเฉลี่ยของหัวอ่าน GMR กับสนามแม่เหล็กภายนอก



## บทที่ 4

### การศึกษาผลกระทบที่ส่งผลต่อการตอบสนองของไอแอนท์แมกนีโตรีซิสแตนซ์

แบบจำลองไมโครแมกเนติกถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งแสดงผลในรูปของฮิสเทอรีซิสลูป (M-H loop) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของ GMR ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อผลของสนามแม่เหล็กภายนอก (R-H loop)

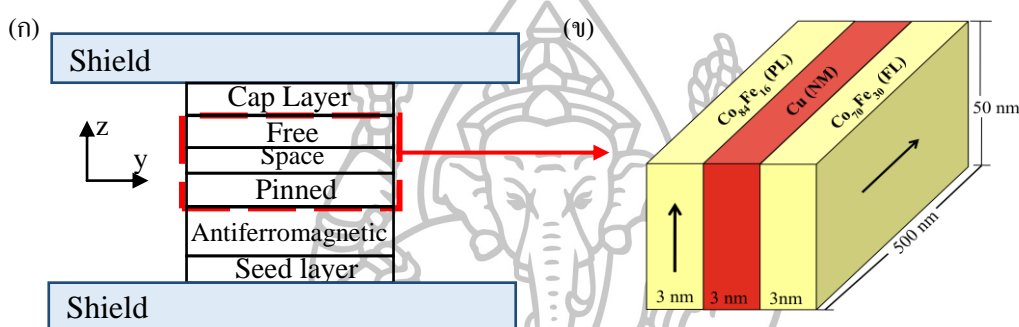
จากการทบทวนวารสารที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR ได้แก่ ความหนาของชั้น free layer (FL) [8, 29–31] สนามแม่เหล็กไบอัสเพื่อตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น pinned layer (PL) และ free layer (FL) [32–35] ตามลำดับ และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้าง GMR [26, 36] ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษา M-H loop และ R-H loop ของหัวอ่าน GMR ที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจาก (1) ความหนาของชั้น free layer (2) อิทธิพลของสนามเอ็ลซ์เซนจ์ไบอัส ( $H_{EB}$ ) ในการตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น pinned layer และอิทธิพลของสนามไบอัสในการตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น free layer และ (3) วัสดุแม่เหล็กอ่อนที่นำไปใช้ในชั้น free layer เช่น NiFe CoFeSiB และ CoSiB เป็นต้น

#### 4.1 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น FL

โครงสร้างหัวอ่าน GMR เบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 4.1(ก) ซึ่งประกอบด้วยชั้นของวัสดุต่างชนิดกันดังนี้ (1) ชั้น buffer layer หรือ seed layer เช่น Ta ทำหน้าที่เป็นชั้นตั้งต้นเพื่อใช้เป็นโครงสร้างแม่แบบในการปลูกวัสดุในลำดับชั้นถัดไป (2) ชั้น pinning layer ซึ่งเป็นสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (AFM) เช่น IrMn หรือ PtMn (3) ชั้น pinned layer (PL) เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก เช่น CoFe หรือ Co ซึ่งแมกนีไทเซชันของชั้นนี้จะถูกตรึงไว้ด้วยชั้น AFM ให้มีทิศทางตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (4) ชั้น spacer layer ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic, NM) เช่น Cu (5) ชั้น free layer (FL) เป็นชั้นเฟอร์โรแมกเนติกอีกชั้นหนึ่ง เช่น CoFe หรือ NiFe ซึ่งแมกนีไทเซชันจะเปลี่ยนทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

และ (6) capping layer เช่น Ta ทำหน้าที่ปกป้องการแพร่ของอะตอมระหว่างชั้น free layer กับ shield

ในการศึกษาแบบจำลองไมโครแมกเนติก เราพิจารณาโครงสร้างของหัวอ่าน GMR เพียง 3 ชั้นเท่านั้น ได้แก่ชั้น PL ชั้น NM และชั้น FL แสดงดังรูปที่ 4.1(ข) ขนาดของหัวอ่าน GMR มีความกว้าง 50 nm ความยาว 500 nm และความหนา 9 nm ตามลำดับ โดยชั้น PL เป็นโลหะผสม  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  และชั้น FL เป็นโลหะผสม  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  โดยมีความหนาชั้นละ 3 nm โดยถูกแยกออกจากกันด้วยชั้น NM หนา 3 nm



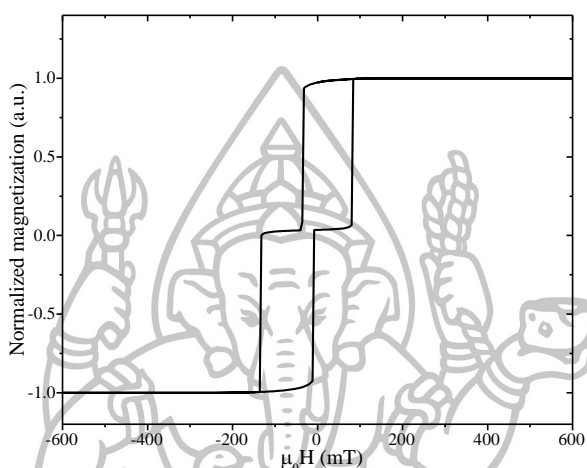
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของ GMR ที่ใช้ในการจำลองมีโครงสร้างแบบ  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  (3 nm)/Cu(3 nm)/ $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  (3 nm)

ในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้น FL (1–5 nm) ที่มีขนาดเล็กกว่าความหนาของชั้น PL ต่อการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL และการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ซึ่งในการจำลองนี้จะแสดงผลในรูปของ M–H loop และ R–H loop อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีขนาด  $-1000$  mT ถึง  $+1000$  mT ในทิศทางตามแนวแกน y

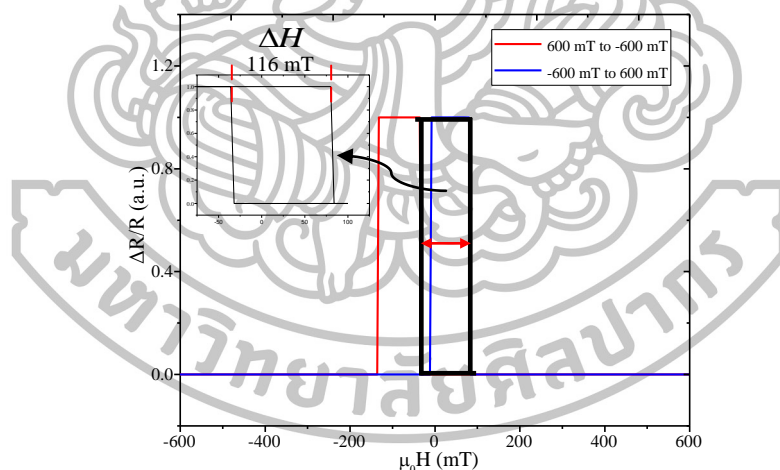
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR

parameter	$\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ (PL)	$\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ (FL)
Thickness (nm)	3	1–5
$M_s$ (A/m)	$15 \times 10^5$	$14 \times 10^5$
$K_u$ ( $\text{J/m}^3$ )	$5 \times 10^3$	$5 \times 10^3$
A (J/m)	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$
bias field $\langle H_{\text{bias}} \rangle$ (mT)	50	–
easy axis	+y	+y

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยชั้น PL ถูกตั้งทิศทางแมกนีไทเซชันด้วยสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กจากชั้น AFM เพื่อกำหนดให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีทิศทางในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (media) ซึ่งในที่นี้เรากำหนดให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL อยู่ในทิศ +y และมีขนาดเท่ากับ 50 mT



รูปที่ 4.2 M-H loop ของหัวอ่าน GMR เมื่อชั้น FL มีความหนา 3 nm



รูปที่ 4.3 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น FL มีความหนา 3 nm โดยรูปเล็กแทนส่วนขยายของ R-H loop ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง และเส้นทึบสีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิสloop ในการแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\Delta H$ )

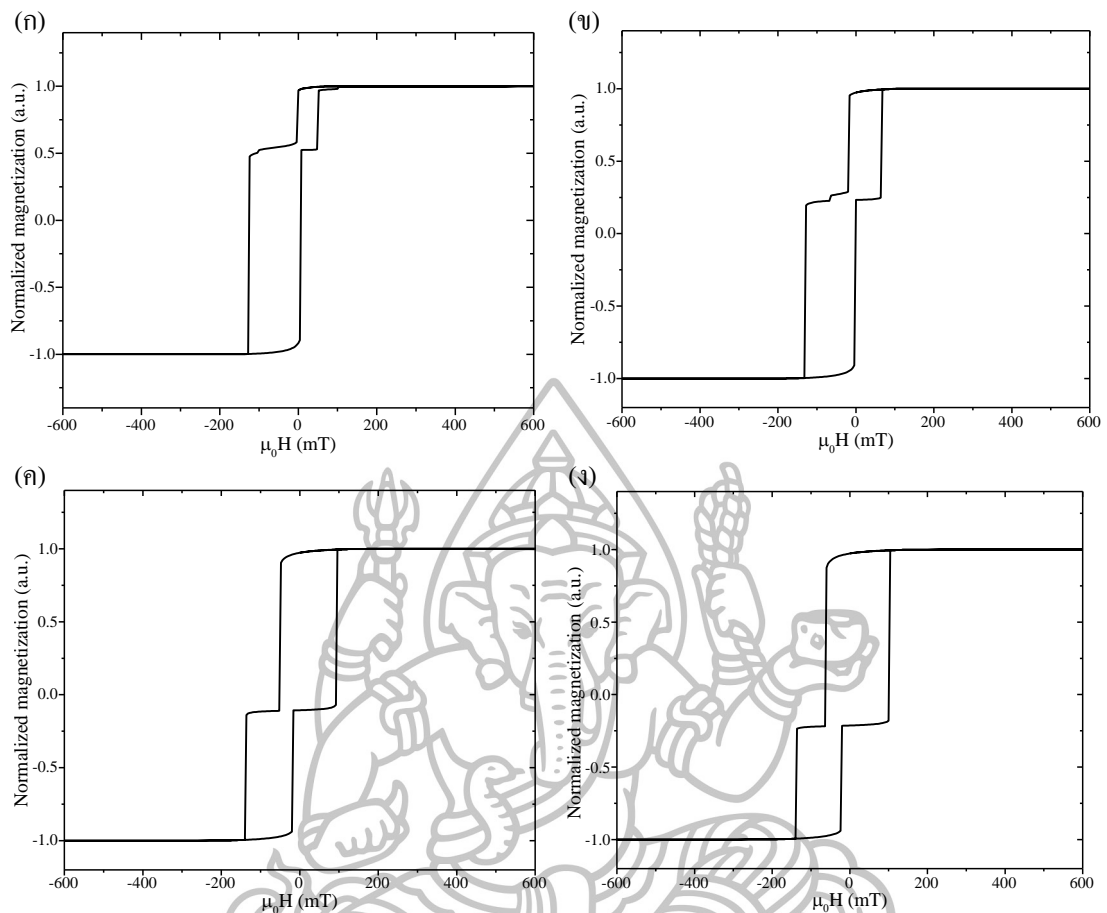
ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ในกรณีเมื่อชั้น FL ของหัวอ่าน GMR มีความหนา 3 nm จากกราฟในรูปที่ 4.2 พบว่าแมกนีไทเซชันของ PL เปลี่ยนแปลงทิศทางได้ยากกว่าแมกนีไทเซชันของ FL เนื่องจากชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสจากชั้น AFM การจะเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันจึงต้องใช้สนามแม่เหล็กมากกว่าปกติเพื่อเอาชนะ

สนาม เอ็กซ์เซนจ์ไบอัสเสียก่อนจึงจะสามารถเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของ PL ได้ ในขณะที่ชั้น FL ที่มีความหนา 3 nm ทำให้มีอิทธิพลของพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ในชั้น FL มีค่ามากจึงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ยากซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากกราฟ M-H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะกว้าง

เมื่อพิจารณากราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.3 เส้นทึบสีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิส ลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกอันเนื่องมาจากผลของ ชั้น FL ซึ่งต่อไปขอเรียกความกว้างของลูปนี้ว่า  $\Delta H$  ซึ่งจากกราฟพบว่าเมื่อชั้น FL มีหนา 3 nm ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 116 mT ซึ่งมีค่า อยู่ในช่วงตั้งแต่ -36 ถึง 80 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทาง ไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด -36 mT ในขณะที่เมื่อให้ สนามแม่เหล็กกลับทิศในแกน +y แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะต้องได้รับสนามแม่เหล็กเท่ากับ 80 mT จึงจะทำให้แมกนีไทเซชันเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กที่ออกมาจาก media ได้

ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ที่กำหนดให้อยู่ในทิศ +y จะมีการเปลี่ยนแปลง ทิศทางยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL ความกว้างของลูป PL (พิจารณาจากกราฟ M-H loop เมื่อ นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง -1) มีค่าเท่ากับ 132 mT แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะ เปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -136 mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ +y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -4 mT

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกในกรณีเมื่อความหนาชั้น FL ของหัวอ่าน GMR มีขนาด น้อย และมากกว่าความหนาของชั้น PL แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 จากกราฟในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อ ความหนาของชั้น FL มีค่าลดลง ทำให้มีอิทธิพลของพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ ในชั้น FL มีค่าลดลงจึงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่ายขึ้นตามขนาดความ หนาของชั้น FL ที่ลดลง กราฟ M-H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y จึงมีลักษณะแคบ ในขณะที่เมื่อความหนาของชั้น FL มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้มีอิทธิพลของพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ระหว่าง แมกนีไทเซชันที่อยู่ในชั้น FL มีค่ามากขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ ยากขึ้นตามขนาดความหนาของชั้น FL ที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากกราฟ M-H loop ในช่วงที่ เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะกว้างขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานของหัวอ่าน GMR มีการ เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.5

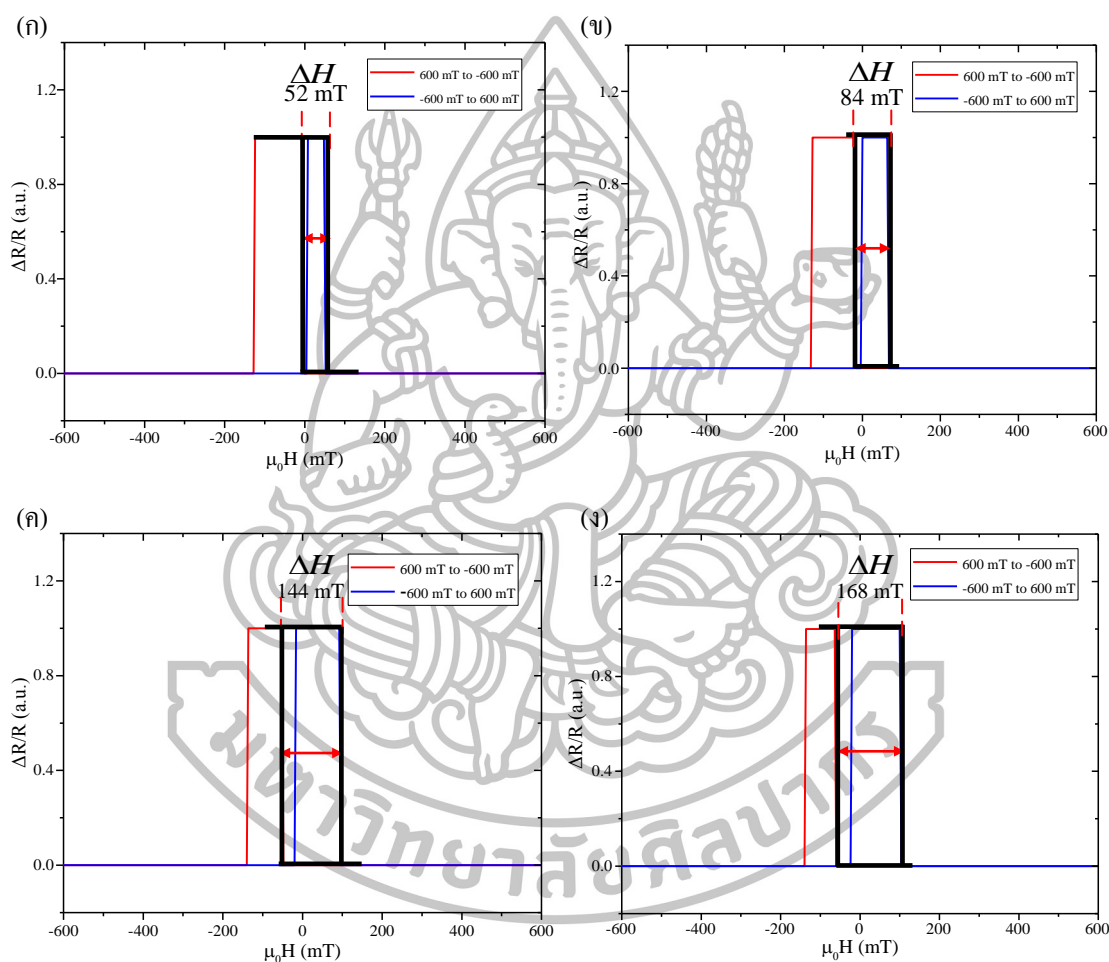


รูปที่ 4.4 M-H loop ของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL มีความหนา (ก) 1 nm (ข) 2 nm (ค) 4 nm และ (ง) 5 nm

จากกราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อชั้น FL มีความหนาลดลงเป็น 1 และ 2 nm ความกว้าง  $\Delta H$  จะมีขนาดแคบลง ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 52 และ 84 mT ตามลำดับ โดยมีช่วงตั้งแต่ -4 ถึง 48 mT และ -20 ถึง 64 mT ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อความหนาของชั้น FL มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 nm เราพบว่า ความกว้าง  $\Delta H$  จะมีขนาดกว้างขึ้น ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 144 mT และ 164 mT ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -52 ถึง 92 mT และ -64 ถึง 100 mT ตามลำดับ

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL เมื่อความหนา ชั้น FL ของหัวอ่าน GMR มีค่าลดลงเป็น 1 nm และ 2 nm แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด -128 mT และ -132 mT ตามลำดับ และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ  $+y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด 4 mT และ 0 mT ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของชั้น FL ลดลงที่ละ 1 nm ความกว้างของลูปของชั้น PL มีค่าคงที่เท่ากับ 132 แต่ลูปของชั้น PL มีการเลื่อนเข้าหาแกน  $H = 0$  ที่ละ 4 mT แสดงว่าชั้น PL มีค่าสนามเอ็กซ์เซนจ์ที่ไปอัดลดลง 4 mT ตามความหนาของชั้น FL ที่ลดลง ในขณะที่

ที่เมื่อความหนาของชั้น FL มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4 nm และ 5 nm แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางการสแกนแม่เหล็กภายนอกในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-140$  mT และ  $-144$  mT ตามลำดับ และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ  $+y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-8$  mT และ  $-12$  mT ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้น FL ส่งผลให้ชั้น PL มีค่าสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสเพิ่มขึ้น 4 mT สังเกตได้จากกลุ่มของชั้น PL มีการเลื่อนไปทางซ้ายออก จากแกน  $H = 0$  ด้วยสนามแม่เหล็กขนาด 4 mT ตามความหนาของชั้น FL ที่เพิ่มขึ้น

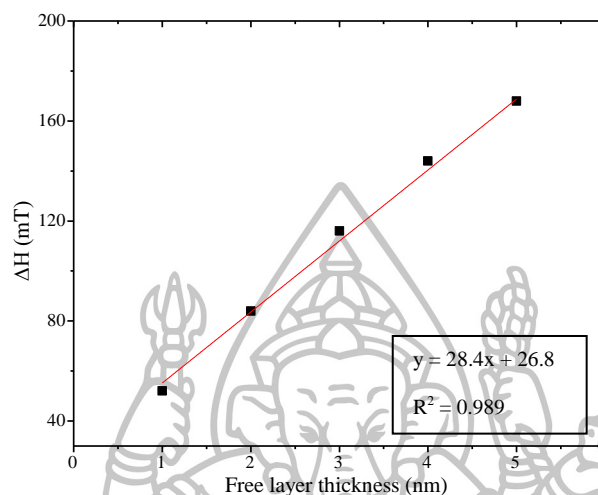


รูปที่ 4.5 R-H loop ของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL มีความหนา (ก) 2 nm (ข) 3 nm (ค) 4 nm และ (ง) 5 nm โดยเส้นทึบสีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิสloop ในการแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\Delta H$ )

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง  $\Delta H$  เนื่องจากผลของความหนาของชั้น FL ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะพบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเชิงเส้น โดยทุกๆความหนาของชั้น FL ที่เพิ่มขึ้น 1 nm จะทำให้ความกว้าง  $\Delta H$  เพิ่มขึ้น 28.4 mT แสดงให้เห็น



ว่าการเพิ่มความหนาของชั้น FL ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น จึงต้องใช้สนามแม่เหล็กในการกลับทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FL เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ความกว้างของฮิสเตอร์ีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนา

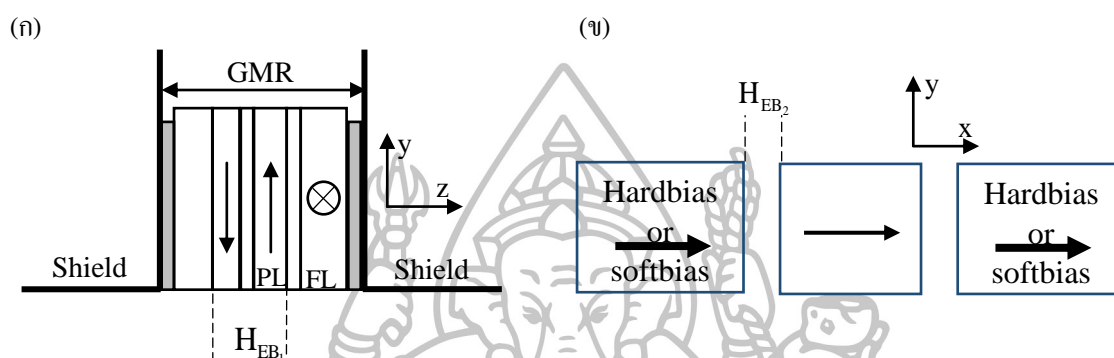
#### 4.2 อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไบอัสต่อการตอบสนองของหัวอ่าน GMR

จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ผ่านมาเราพบว่าเมื่อความหนาของชั้น FL ของหัวอ่าน GMR มีค่าเพิ่มขึ้น แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น ส่งผลให้ฮิสเตอร์ีซิสลูปที่พิจารณาได้จากกราฟ R-H loop มีความกว้างมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL ที่กำหนดให้เรียงตัวอยู่ในทิศ +y จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกขนาดมากพอในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL

ในหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาผลของสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่ให้แก่อัน PL ( $H_{EB_1}$ ) เพื่อทำการตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้นและทำการศึกษาผลของสนามไบอัสที่ให้แก่อัน FL ( $H_{EB_2}$ ) เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ง่ายขึ้น และ  $\Delta H$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และไม่เกิด loop

ในการจำลองนี้กำหนดให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL ถูกตรึงทิศทางด้วยสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส ( $H_{EB_1}$ ) ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กจากชั้น AFM เพื่อตรึงแมกนีไทเซชันของชั้น PL ให้มีทิศทางคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ยาก โดยเราจะทำการจำลองสนามแม่เหล็กจากภายนอกแทนการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น AFM กับชั้น PL ในทิศทางตามแกน +y ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก)

ในขณะที่แมกนีไทเซชันเริ่มต้นของชั้น FL จะถูกตรึงด้วยชั้น hard bias ซึ่งทำจากวัสดุแม่เหล็กถาวร หรือ soft bias ซึ่งทำจากวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อน โดยในการจำลองสนามไบอัส ( $H_{EB_2}$ ) จะถูกแทนด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของชั้น FL โดยมีทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้น PL ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข)

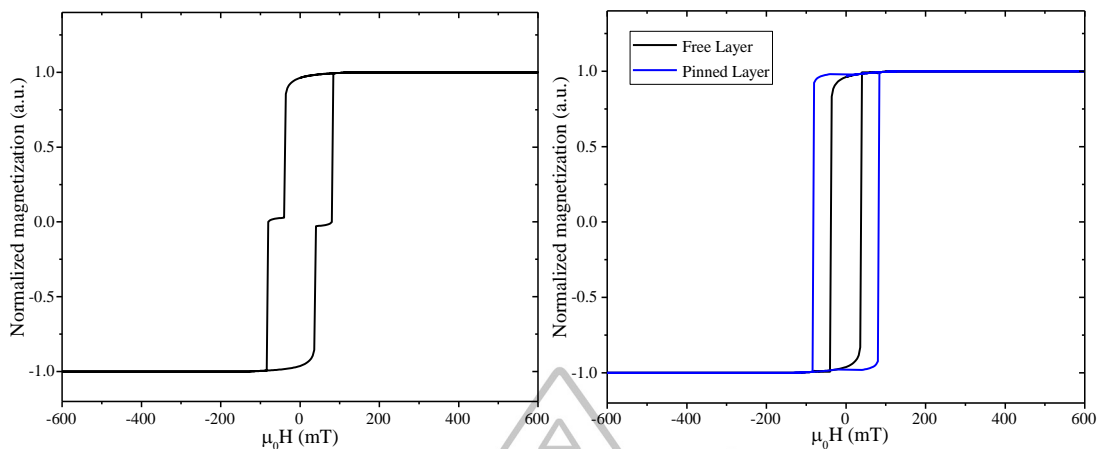


รูปที่ 4.7 โครงสร้างของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลองสนามแม่เหล็กไบอัส (ก) มุมมองด้านข้างแสดงการตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL จากการเหนี่ยวนำของชั้น AFM (ข) มุมมองด้านหน้าแสดงสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจากชั้น hard bias หรือ soft bias ที่ตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FL

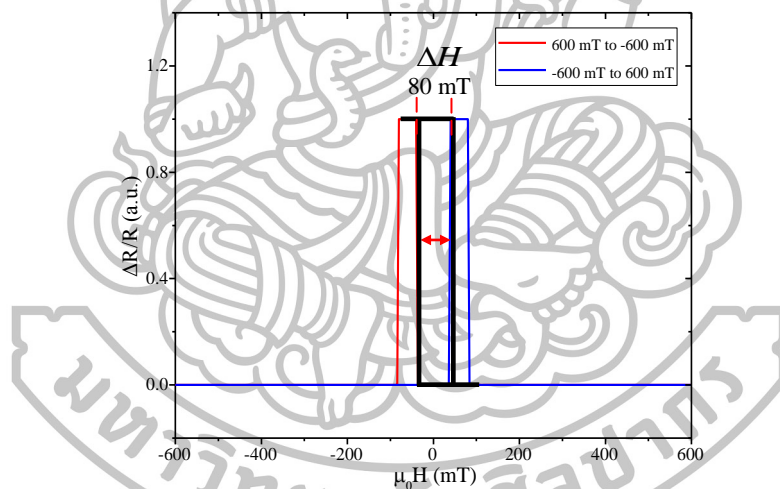
#### 4.2.1 อิทธิพลของสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสชั้น PL ต่อการตอบสนองของหัวอ่าน GMR

การจำลองนี้ทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส  $H_{EB_1}$  โดยกำหนดให้หัวอ่าน GMR มีคุณสมบัติเหมือนกับการจำลองที่ 4.1 และได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT ในทิศ +y ซึ่งมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งแทนสนามที่มาจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กซึ่งมีขนาดตั้งแต่ -1000 mT ถึง 1000 mT

ผลการจำลองไมโครแมกเนติก ในกรณีเมื่อชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันชั้น FL มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางช้ากว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL เนื่องจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ใช้ในชั้น PL เป็นสารแม่เหล็กที่มีค่า  $M_s$  มากกว่าวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่ใช้ในชั้น FL และ M-H loop จะสมมาตรที่สนามแม่เหล็กเท่ากับ 0 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ส่งผลให้ความต้านทานของ GMR มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเท่ากับอัตราส่วน MR ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจากชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดย แกน x คือสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้กับหัวอ่าน GMR และแกน y คือ (ก) นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันรวมเฉลี่ยระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL (ข) นอร์มอลไลซ์แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL



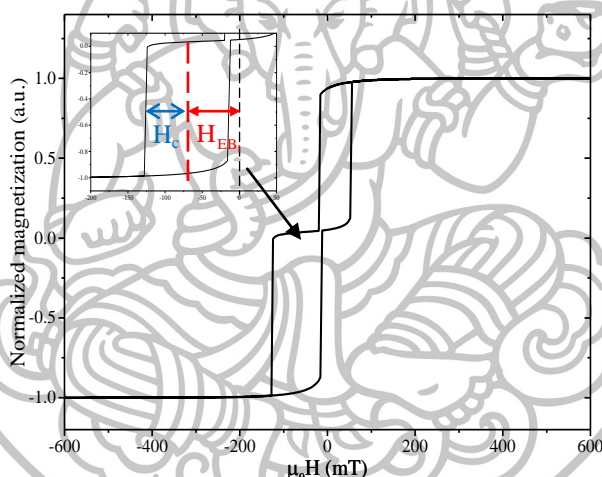
รูปที่ 4.9 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจากชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดย เส้นที่สีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\Delta H$ )

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความต้านทานพบว่าเมื่อชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีความกว้างเท่ากับ 80 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่  $-40$  ถึง  $40$  mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-40$  mT ในขณะที่เมื่อให้สนามแม่เหล็ก

กลับทิศในแกน  $+y$  แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด 40 mT

จากกราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.9 จะพบว่าหัวอ่าน GMR ที่ไม่มีสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจากชั้น AFM และ hard bias/soft bias ในสภาวะสมดุลหรือไม่ได้ถูกกระทำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ความต้านทานของ GMR จะมีค่าสูงสุดเสมอ

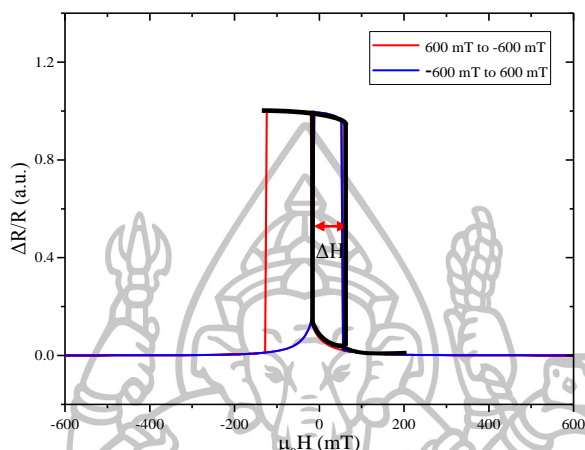
ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL เปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-80$  mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ  $+y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด 80 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL ซึ่งเป็นชั้นที่ใช้อ้างอิงในการวัดสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL



รูปที่ 4.10 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT โดยรูปเล็กแทนส่วนขยายของ M-H loop ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL

ผลการจำลองไมโครแมกเนติก ในกรณีเมื่อชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT ในทิศ  $+y$  แมกนีไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยที่บริเวณด้านล่างของกราฟ M-H loop เป็นบริเวณที่แสดงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเห็นว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในช่วง 1000 mT ถึง  $-1000$  mT ในทิศ  $-y$  กราฟ M-H loop มีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย ไม่สมมาตรที่จุดกำเนิดตามแนวแกนของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากหัวอ่าน GMR ต้องได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้นในการเอาชนะสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสก่อนจึงจะสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ใช้มีขนาดเท่ากับ  $-128$  mT และทำให้หัวอ่าน GMR มีค่า  $H_c$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ 58 mT แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกกลับในทิศ  $+y$  แมกนีไทเซชันของ PL จะเปลี่ยนแปลงง่ายกว่า

แมกนีไทเซชันของ FL เนื่องจากมีสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสในทิศ  $+y$  เสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใช้มีขนาดเท่ากับ  $-12$  mT ส่งผลให้ความต้านทานของ GMR มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.11

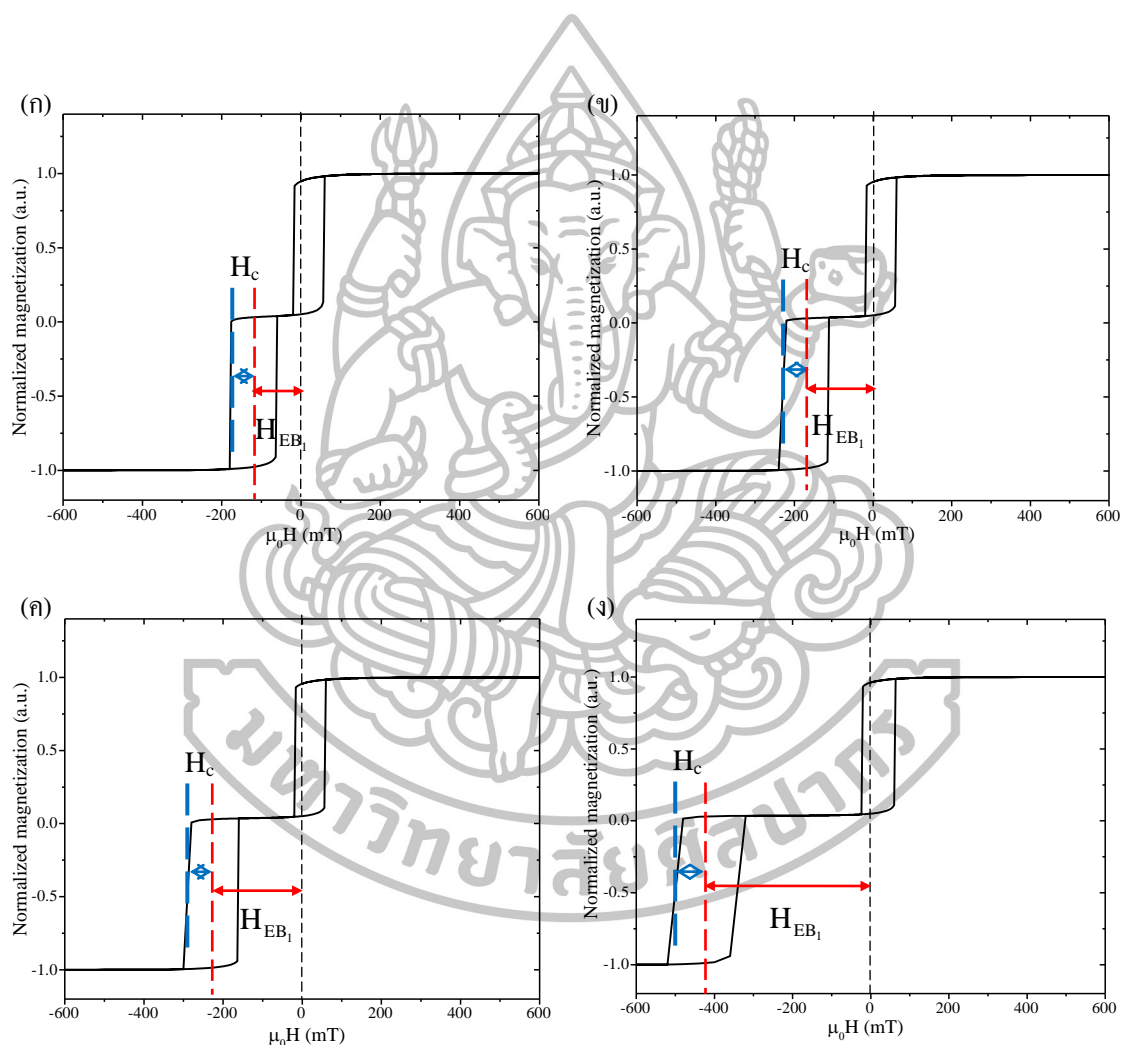


รูปที่ 4.11 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT โดยเส้นทึบสีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\Delta H$ )

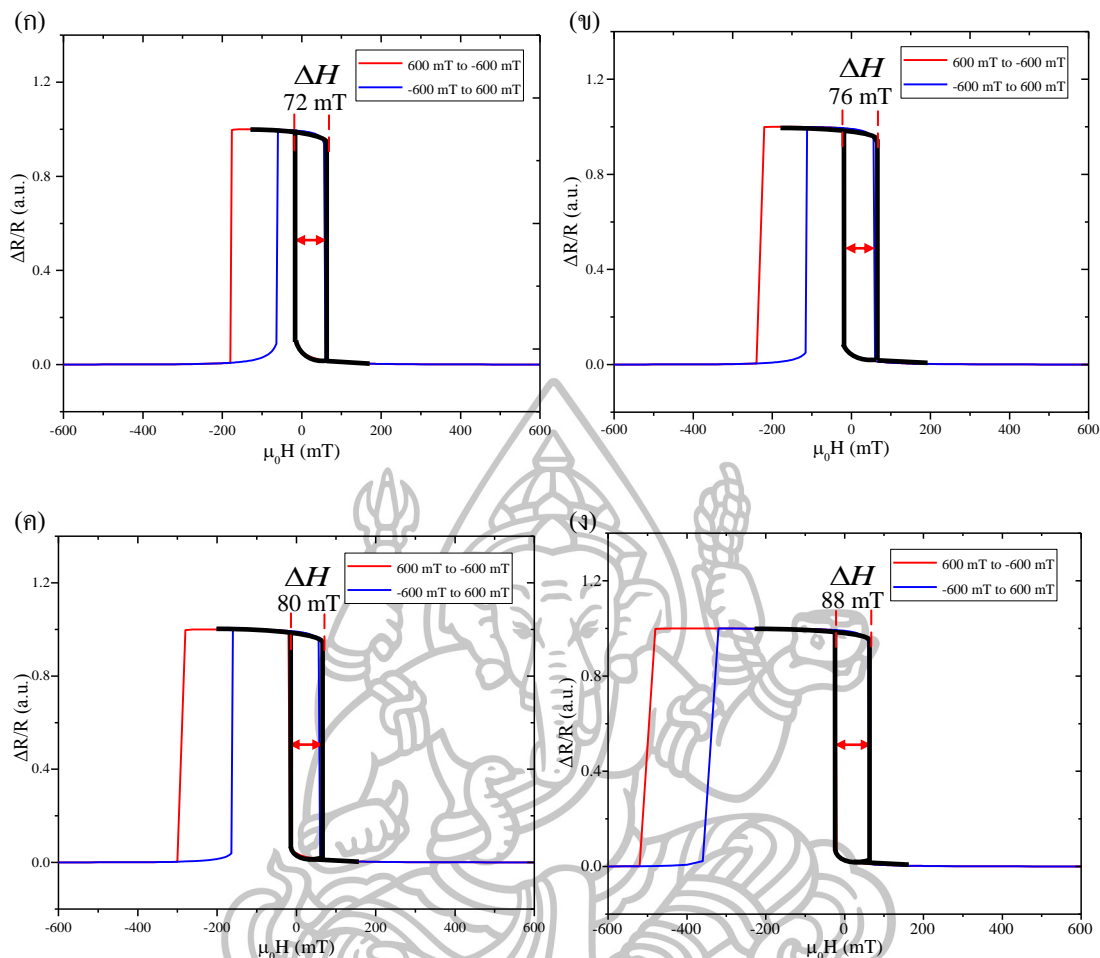
จากกราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 50 mT ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 72 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่  $-20$  ถึง 52 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-20$  mT ในขณะที่เมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับทิศในแกน  $+y$  แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะต้องได้รับสนามแม่เหล็กมากขึ้นขนาด 52 mT จึงจะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอก แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้นส่งผลให้กราฟ  $\Delta H$  เกิด loop ขึ้น

ผลการจำลองไมโครแมกเนติก ในกรณีเมื่อชั้น PL ของหัวอ่าน GMR ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสเพิ่มขึ้น M-H loop ของแมกนีไทเซชันของชั้น FL และชั้น PL แยกออกจากกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าลูปที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในช่วง 1000 mT ถึง  $-1000$  mT ในทิศ  $-y$  มีลักษณะไม่สมมาตรที่จุดกำเนิดตามแนวแกนของสนามแม่เหล็ก และเลื่อนไปทางแกน  $-y$  มากขึ้น เนื่องจากหัวอ่าน GMR ต้องได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้นในการเอาชนะสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีขนาดเท่ากับ  $-180$

mT -240 mT -300 mT และ -360 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของหัวอ่านมีการเปลี่ยนทิศทางการยกขึ้นหัวอ่าน GMR จึงมีค่า  $H_c$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ 60 mT 64 mT 70 mT และ 100 mT เมื่อได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT ตามลำดับ แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกกลับในทิศ +y แมกนีไทเซชันของ PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ง่ายกว่าแมกนีไทเซชันของ FL เนื่องจากมีสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสในทิศ +y เสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอก ส่งผลให้ความต้านทานของ GMR เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.12 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด (ก) 100 mT (ข) 150 mT (ค) 200 mT และ(ง) 400 mT



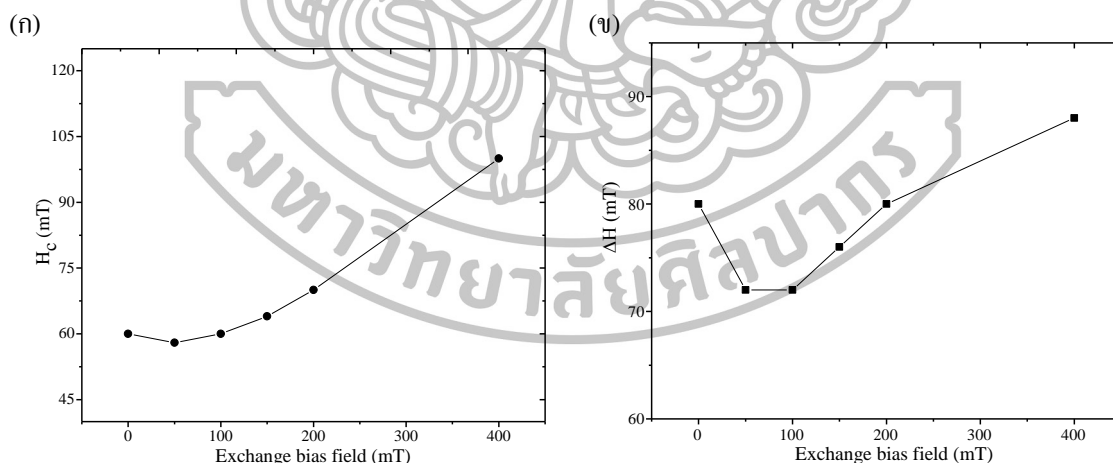
รูปที่ 4.13 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด (ก) 100 mT (ข) 150 mT (ค) 200 mT และ (ง) 400 mT โดยเส้นที่สีดำแทนความกว้างของฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\Delta H$ )

จากกราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส 100 mT ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 72 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -20 ถึง 52 mT แมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส 150 mT ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 76 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -20 ถึง 56 mT แมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส 200 mT ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 80 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -20 ถึง 56 mT และแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัส 400 mT ฮิสเทอรีซิสลูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 88 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -24 ถึง 64 mT แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดของสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาดมากกว่า 50 mT ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของ

ชั้น FL ทำให้  $\Delta H$  เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีความกว้างใกล้เคียงกัน

การจำลองในหัวข้อ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่า ยิ่งเพิ่มสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสให้แก่วัสดุ PL มากขึ้น ยิ่งทำให้ M-H loop ของชั้น FL และชั้น PL แยกออกจากกันมากขึ้น แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น จึงต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันมากขึ้น ทำให้หัวอ่าน GMR มีค่า  $H_c$  เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสให้กับชั้น PL มากขึ้น จะส่งผลให้ทิศแมกนีไทเซชันของชั้น PL ซึ่งใช้เป็นตัวอ้างอิงมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น ส่งผลโดยรวมต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR โดยในทางปฏิบัติเราสามารถเพิ่มสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสได้โดยการเลือกใช้วัสดุที่จะมาสร้างชั้น AFM เช่น FeMn [37, 38] IrMn [39–41] NiMn [42] PtMn [43] และ CoO [32, 44] โดยจากการทบทวนวารสารพบว่าในทางปฏิบัติสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสสูงถึง 300 mT จากวัสดุประเภท CoO [45]

นอกจากนั้นเรายังพบว่า การเพิ่มขนาดของสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส  $H_{EB}$  ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มากนัก เนื่องจากฮิสเทอรีซิสloop ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR มีความกว้างต่างกันเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.14(ข)



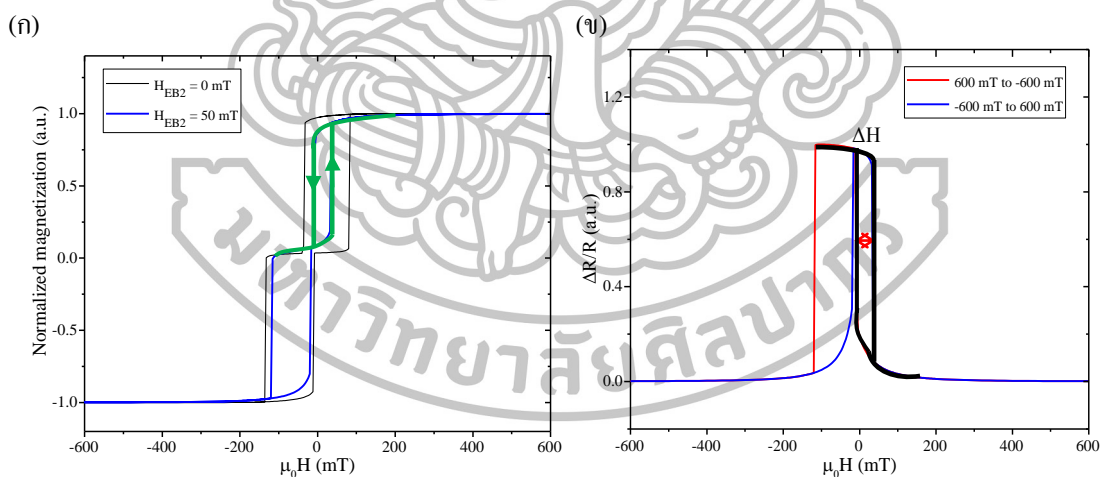
รูปที่ 4.14 สนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสที่ส่งผลต่อ (ก) ค่าโคเออร์ซิวิตีของชั้น PL และ (ข) ความกว้างของฮิสเทอรีซิสloop ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก



#### 4.2.2 อิทธิพลของสนามไบอัสของชั้น FL ต่อการตอบสนองของหัวอ่าน GMR

การเพิ่มขนาดของสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัส  $H_{EB_1}$  ในการจำลองที่ 4.2.1 ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางช้ากว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL มากขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้นตามสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มสนามสนาม เอ็กซ์เชนจ์ไบอัสไม่ส่งผลทำให้หัวอ่าน GMR มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เนื่องจาก  $\Delta H$  ที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลของสนามไบอัสจากชั้นแม่เหล็กถาวรหรือชั้นแม่เหล็กอ่อน ที่ใช้ตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น FL เพื่อทำการลด  $\Delta H$  ให้แคบลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น โดยในการจำลองกำหนดให้หัวอ่าน GMR มีคุณสมบัติเหมือนกับการจำลองที่ 4.1 ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 50 mT 100 mT 150 mT 200 mT และ 400 mT ในทิศ +x ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้น PL และกำหนดสนามไบอัสชั้น PL มีค่าคงที่เท่ากับ 50 mT ในแนวแกน +y ซึ่งมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก โดยในการจำลองนี้ให้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด -1000 ถึง 1000 mT

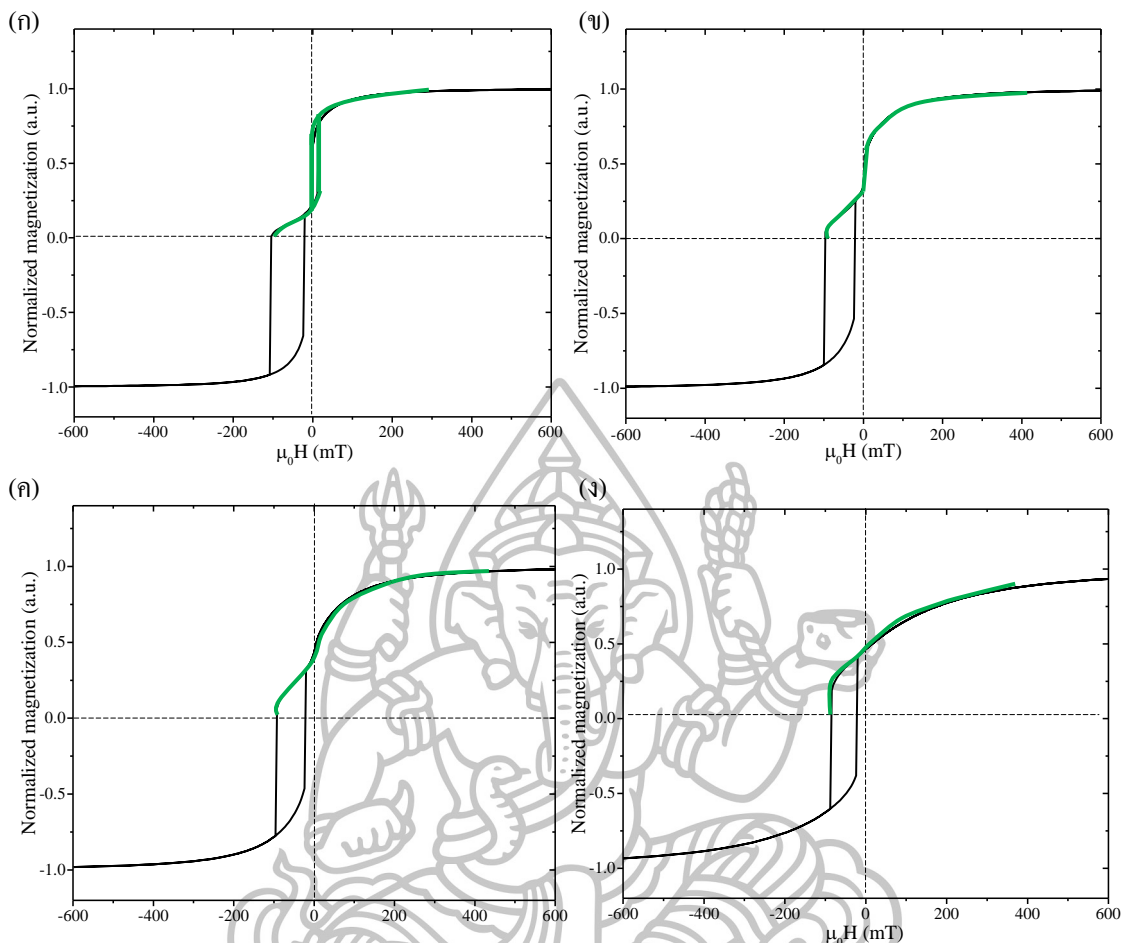


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR โดย (ก) M-H loop ที่ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 50 mT เปรียบเทียบกับ M-H loop ของชั้น FL ที่ไม่ได้รับสนามไบอัส (ข) R-H loop ที่ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 50 mT เมื่อเส้นทึบสีเขียวแทนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL และเส้นทึบสีดำแทน  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก

ผลการจำลองไมโครแมกเนติก ในกรณีเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามไบอัสจากชั้นแม่เหล็กอ่อนขนาด 50 mT ในทิศ +x จากกราฟในรูปที่ 4.15 (ก) พบว่าแมกนีไทเซชันของ FL เปลี่ยนแปลงทิศทางได้ง่ายกว่ากรณีที่แมกนีไทเซชันของ FL ไม่ได้รับสนามไบอัส เนื่องจากเมื่อทำการลดสนามแม่เหล็กภายนอกจาก 1000 mT จนสนามแม่เหล็กมีขนาดน้อยกว่าสนามไบอัสที่ให้กับชั้น FL แมกนีไทเซชันของ FL จะเริ่มมีการจัดเรียงตัวในทิศ +x ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้ จึงทำให้เมื่อเราเริ่มให้สนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นในทิศตรงข้ามกับตอนเริ่มต้น แมกนีไทเซชันของ FL จะมีการเปลี่ยนทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่ายขึ้น ทำให้กราฟ M-H loop บริเวณเส้นทึบสีเขียวที่แทนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีลักษณะแคบกว่า M-H loop กรณีที่แมกนีไทเซชันของชั้น FL ไม่ได้รับสนามไบอัส ส่งผลให้ความต้านทานของ GMR ในกรณีเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 50 mT เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.15(ข)

จากกราฟในรูปที่ 4.15(ข) พบว่าฮิสเตอร์ซิซิสloop ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 44 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -12 ถึง 32 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -12 mT ในขณะที่เมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับทิศในแกน +y แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะต้องได้รับสนามแม่เหล็กมากขึ้นขนาด 32 mT จึงจะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ แสดงให้เห็นว่าการให้สนามไบอัสขนาด 50 mT แก่ชั้น FL ส่งผลให้แมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนแปลงทิศทางง่ายขึ้น แต่ยังไม่สามารถทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนแปลงทิศทางในทิศ +y และ -y ด้วยสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากัน ส่งผลให้  $\Delta H$  ยังคงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

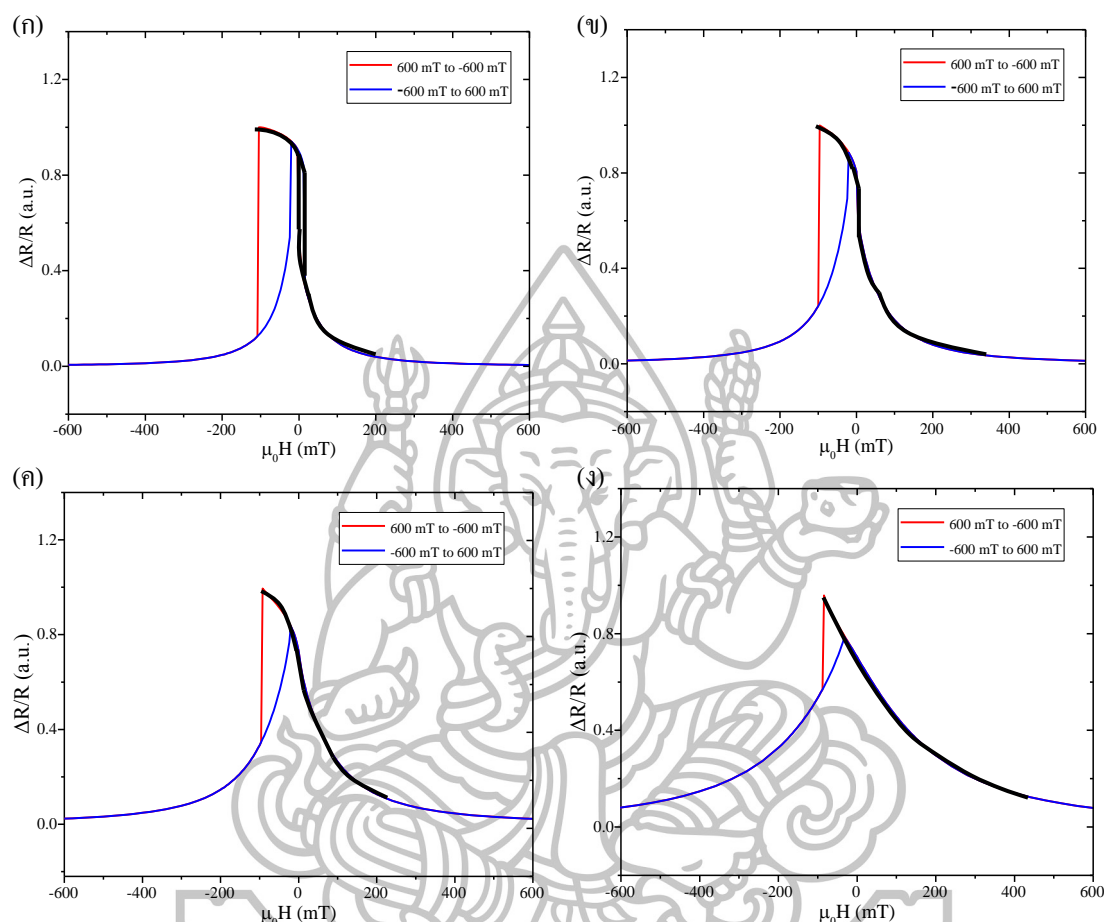
ในกรณีที่แมกนีไทเซชันของชั้น FL ของหัวอ่าน GMR ได้รับสนามไบอัสจากชั้นแม่เหล็กอ่อนมากขึ้นในทิศ +x จากกราฟในรูปที่ 4.16 พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่ายขึ้น สังเกตได้จากเส้นทึบสีเขียวที่บ่งแทนฮิสเตอร์ซิซิสloop ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะมีฮิสเตอร์ซิซิสloop แคบลง เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 50 ถึง 150 mT และฮิสเตอร์ซิซิสloop จะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นเมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาดมากกว่า 150 mT ส่งผลให้ความต้านทานของ GMR เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 M-H loop ของ GMR ที่ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด (ก) 100 mT (ข) 150 mT (ค) 200 mT และ (ง) 400 mT

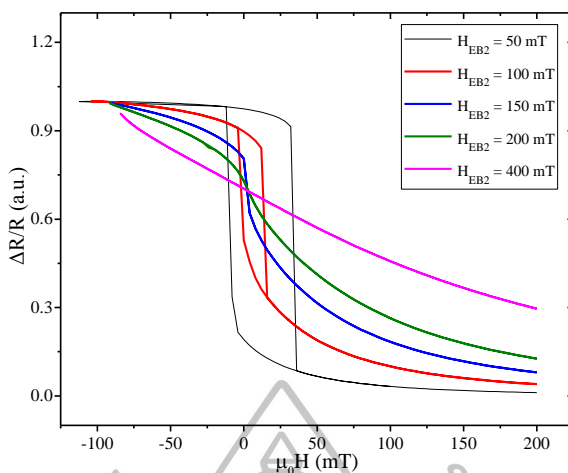
จากกราฟในรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด 100 mT ฮิสเตอร์ีซิสต์รูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 20 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -4 ถึง 20 mT เมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 150 mT ขึ้นไป ส่งผล  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นและไม่เกิด loop ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +y และ -y ด้วยสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากัน แต่การเพิ่มขนาดสนามไบอัสส่งผลให้ เมื่อหัวอ่าน GMR ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกกลับทิศทางจาก -1000 mT ถึง 1000 mT ในแนวแกน +y (เส้นสีน้ำเงินในกราฟ R-H loop) แมกนีไทเซชันของชั้น PL และแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไม่เหมือนเดิม ทำให้มุมระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ลดลงน้อยกว่า  $180^\circ$  ทำให้มีการ

เปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ลดลงซึ่งมุมระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ ชั้น FL จะลดลงมากขึ้นเมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.17 R-H loop ของ GMR ที่ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาด (ก) 100 mT (ข) 150 mT (ค) 200 mT และ (ง) 400 mT โดยเส้นทึบสีดำแทน  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก

การจำลองในหัวข้อ 4.2.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มสนามไบอัสให้แก่ชั้น FL มากขึ้น พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กได้ง่ายขึ้น เมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาดตั้งแต่ 150 mT ขึ้นไป  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่หัวอ่าน GMR จะมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี สนามไบอัสที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลทำให้หัวอ่าน GMR มีช่วงในการตอบสนองมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และนอกจากนั้นเรายังพบว่า การเพิ่มขนาดของสนามไบอัส  $H_{EB_2}$  ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL มากนัก เนื่องจาก M-H loop ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของชั้น PL มีความกว้างเท่าเดิม



รูปที่ 4.18 ฮิสเตอร์ีซิสสูปในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL กรณีที่ชั้น FL ได้รับสนามไบอัสจากชั้นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กอ่อน

#### 4.3 อิทธิพลของวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL ต่อการตอบสนองของหัวอ่าน GMR

จากการจำลองในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าหัวอ่าน GMR จะมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็ชเชนจ์ไบอัสที่มีขนาดมากกว่า 50 mT เพื่อให้ชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ยาก และ แมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาดมากกว่า 150 mT เพื่อให้ชั้น FL มีทิศทางเริ่มต้นในทิศทางตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้น PL ซึ่งจะทำให้  $\Delta H$  ของกราฟ R-H loop มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้เราต้องการศึกษาผลกระทบของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่นำมาใช้ในชั้น FL ที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และ FL และการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR โดยวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่เลือกใช้ได้แก่ โลหะผสม NiFe [46] CoSiB [47] และ CoFeSiB [48] ชั้น PL เป็นโลหะผสม  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  และตั้งทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น PL ด้วยสนามเอ็ชเชนจ์ไบอัสขนาด 200 mT ในทิศ +y ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะถูกไบอัสด้วยสนามไบอัสจากแม่เหล็กอ่อนขนาด 150 mT ในทิศ +x โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองแสดงดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก

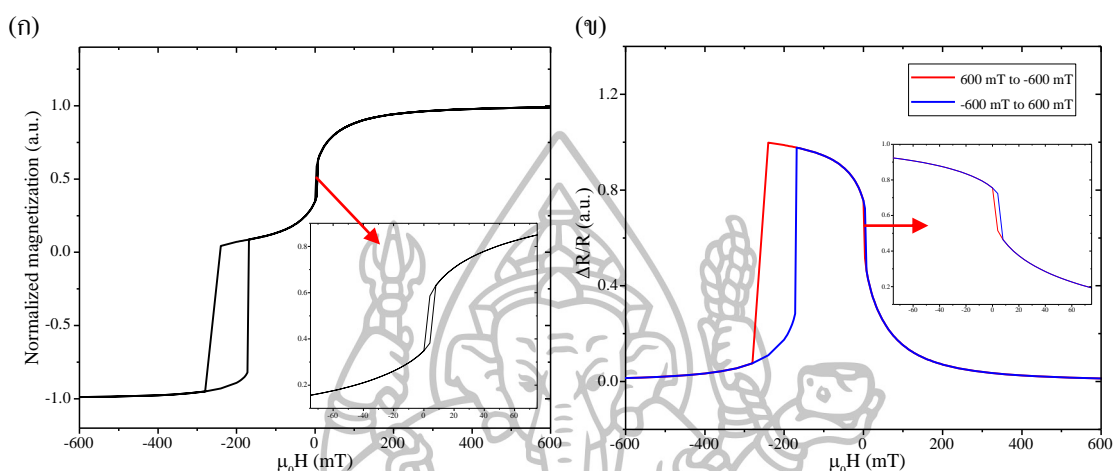
Parameters	pinned layer	free layer			
	$\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$	$\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$	$\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$	$\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$
Thickness(nm)	3	3	3	3	3
$M_s$ (A/m)	$1.5 \times 10^6$	$1.4 \times 10^6$	$8.1 \times 10^5$	$5.6 \times 10^5$	$4.7 \times 10^5$
$K_u$ (J/m <sup>3</sup> )	$5 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$1 \times 10^2$	$2.8 \times 10^2$	$1.5 \times 10^2$
A (J/m)	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-11}$
easy axis	y	y	y	y	y

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR ในกรณีเมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  จากกราฟในรูปที่ 4.19(ก) พบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT ถึง -1000 mT ในทิศ -y แมกนีไทเซชันของ PL เปลี่ยนแปลงทิศทางได้ยากกว่าแมกนีไทเซชันของ FL เนื่องจากชั้น PL ได้รับสนามเอ็ลเซนต์ไปอัสจากชั้น AFM ในขณะที่ชั้น FL จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่ายขึ้นเนื่องจากผลของสนามไปอัสจากชั้นแม่เหล็กอ่อนซึ่งสังเกตได้จากกราฟ M-H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะแคบแต่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

ในขณะเดียวกันแมกนีไทเซชันของชั้น PL ที่กำหนดให้เรียงตัวในทิศ +y จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL ความกว้างของลูป PL (จากกราฟ M-H loop) เมื่อออร์มอลไลท์แมกนีไทเซชันมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง -1) มีค่าเท่ากับ 116 mT แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -280 mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ +y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -164 mT

เมื่อพิจารณากราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.19(ข) พบว่า  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของ GMR จะมีความกว้างเท่ากับ 12 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -4 ถึง 8 mT แสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -4 mT ในขณะที่เมื่อให้สนามแม่เหล็กกลับทิศในแกน +y แมกนีไทเซชันของชั้น FL จะต้องได้รับสนามแม่เหล็กเท่ากับ 8 mT จึงจะทำให้แมกนีไทเซชันเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กที่ออกมาจาก media ได้ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL เปลี่ยนแปลงทิศทางในทิศ +y และทิศ -y ด้วยสนามแม่เหล็กขนาดไม่

เท่ากัน ส่งผลให้  $\Delta H$  ยังคงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และจากกราฟเราจะเห็นว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแบบเส้นตรงเกิดขึ้นในช่วงแคบมากทำให้หัวอ่านมีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกน้อย

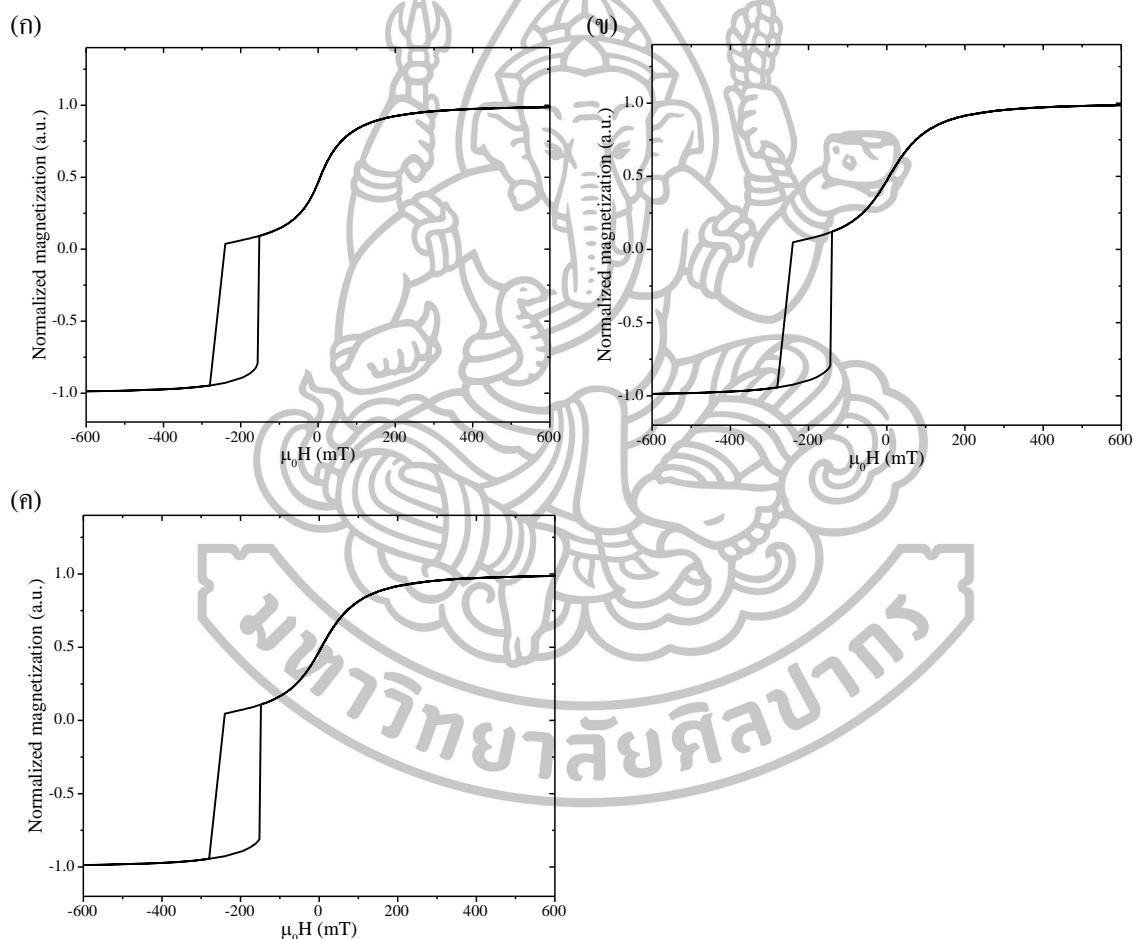


รูปที่ 4.19 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัวอ่าน GMR เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม CoFe ซึ่งแสดงผลในรูปของ (ก) M-H loop และ (ข) R-H loop โดยรูปสี่เหลี่ยมซ้าย คือส่วนขยายของ M-H loop และรูปสี่เหลี่ยมขวา คือส่วนขยายของ R-H loop ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวอ่าน GMR ในกรณีเมื่อชั้น FL เป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อน NiFe CoSiB และ CoFeSiB แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 จากกราฟในรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม NiFe CoSiB และ CoFeSiB ที่มีค่า  $M_s$  เท่ากับ  $8.1 \times 10^5$  A/m  $5.6 \times 10^5$  A/m และ  $4.6 \times 10^5$  A/m ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า  $M_s$  ของ CoFe ( $1.4 \times 10^6$  A/m) ทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ง่ายขึ้นจึงใช้สนามแม่เหล็กในการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยลงซึ่งสังเกตได้จากกราฟ M-H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

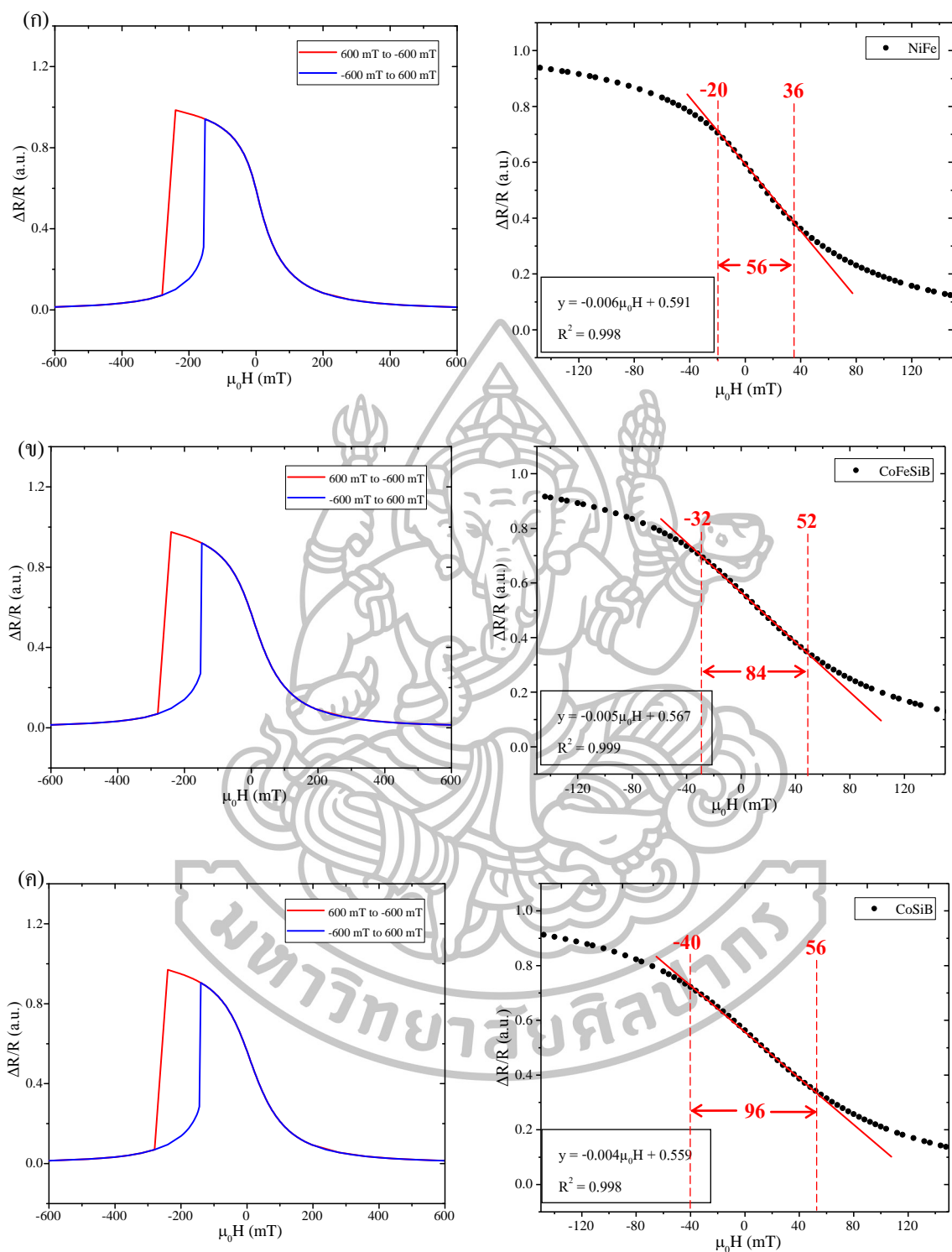
ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL เมื่อชั้น FL ของหัวอ่าน GMR เป็นโลหะผสม NiFe แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -280 mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปในทิศ +y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -156 mT เมื่อชั้น FL ของหัวอ่าน GMR เป็นโลหะผสม CoFeSiB แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด -280 mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางกลับไปใน

ทิศ +y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-148$  mT และเมื่อขึ้น FL ของหัวอ่าน GMR เป็นโลหะผสม CoSiB แมกนีไทเซชันของชั้น PL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางการสแกนแม่เหล็กภายนอกในทิศ  $-y$  เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-280$  mT และจะเปลี่ยนแปลงทิศทางการสแกนแม่เหล็กกลับไปในทิศ +y เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาด  $-140$  mT แสดงให้เห็นว่าเมื่อขึ้น FL ของหัวอ่าน GMR เป็นโลหะผสม NiFe CoFeSiB และ CoSiB ความกว้างของลูปของชั้น PL มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 124 132 และ 140 ตามลำดับ แสดงว่าแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น ตามชนิดของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้ในชั้น FL



รูปที่ 4.20 M-H loop ของ หัวอ่าน GMR เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน (ก) NiFe (ข) CoSiB และ (ค) CoFeSiB



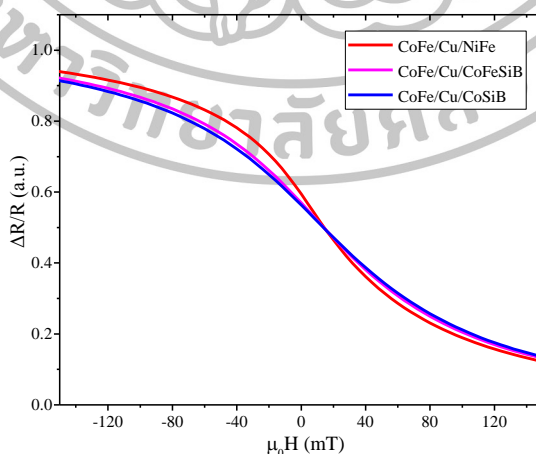


รูปที่ 4.21 R-H loop ของ หัวอ่าน GMR และฮิสเตอร์ิซิสloop ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนของชั้น FL เป็นโลหะผสม (ก) NiFe (ข) CoFeSiB และ (ค) CoSiB

เมื่อนำแมกนีไทเซชันของชั้น FL และ PL มาคำนวณ R-H loop ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเราสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาความไว (sensitivity) และช่วง (range) ในการตอบสนองของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL ทำจากวัสดุต่างกันได้

จากกราฟ R-H loop ในรูปที่ 4.21 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกไม่เกิดฮิสเทอรีซิสลูป และมีความเป็นเชิงเส้น โดยจากรูปที่ 4.21(ก) เมื่อชั้น FL เป็นโลหะผสม NiFe ความไวของหัวอ่าน GMR จะมีค่าเท่ากับ 0.006 และมีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากับ 52 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -20 mT ถึง 32 mT ในขณะที่เมื่อชั้น FL ทำจากโลหะผสม CoFeSiB การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR จะมีความไวเท่ากับ 0.005 และมีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเท่ากับ 84 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -32 mT ถึง 52 mT ดังแสดงในรูปที่ 4.21(ข) และจากรูปที่ 4.21(ค) เมื่อชั้น FL ทำจากโลหะผสม CoSiB ความไวในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR จะมีค่าเท่ากับ 0.004 และมีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นขนาดเท่ากับ 96 mT ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -40 mT ถึง 56 mT

เมื่อนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL ทำจากวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อนต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าหัวอ่าน GMR ที่มี NiFe เป็นชั้น FL มีความไวในการตอบสนองสูงสุดและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานลดลงมากกว่ากรณีวัสดุ CoFeSiB และ CoSiB เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากัน อย่างไรก็ตามเราจะพบว่ามันมีช่วงการตอบสนอง (ซึ่งยังคงความเป็นเชิงเส้นอยู่) น้อยกว่ากรณีวัสดุอื่นๆ โดยชั้น FL ที่เป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อน CoSiB มีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากที่สุด



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +y เมื่อชั้น PL เป็นวัสดุ CoFe และชั้น FL ทำจากวัสดุ NiFe CoFeSiB และ CoSiB ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวอ่าน GMR ผลกระทบของชั้น free layer (FL) และสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR โดยใช้การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการแลนเด-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต โดยทำการวิเคราะห์จากกราฟฮิสเตอรีซิสลูประหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก (M-H loop) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (R-H loop)

โครงสร้างของหัวอ่าน GMR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดกว้าง 50 nm ยาว 500 nm และหนา 9 nm ตามลำดับประกอบด้วยชั้น pinned layer (PL) ที่ทำจากโลหะผสม  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  และชั้น free layer (FL) ที่ทำจาก  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$  ซึ่งมีทองแดงคั่นกลางระหว่างชั้นแม่เหล็กทั้งสอง แต่ละชั้นจะมีความหนา 3 nm ชั้น PL ของหัวอ่าน GMR ถูกตรึงทิศทางแมกนีไทเซชันด้วยสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสขนาดเท่ากับ 50 mT ในทิศ +y โดยสนามเอ็กซ์เชนจ์ไบอัสเป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AFM และชั้น PL ทำให้แมกนีไทเซชันของชั้น PL ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง หรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL

ในการจำลองไมโครแมกเนติก หัวอ่าน GMR ถูกแบ่งออกเป็นเซลล์ทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็กโดยทุกด้านของเซลล์ต้องมีความยาวน้อยกว่าระยะความยาวเอ็กซ์เชนจ์เนื่องจากถ้ากำหนดเซลล์ให้มีขนาดเล็กกว่าระยะเอ็กซ์เชนจ์ โมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่อยู่ใกล้กันจะสามารถส่งอันตรียาเอ็กซ์เชนจ์ต่อกันได้ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของทั้งสองเซลล์เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และส่งผลให้การคำนวณหาทิศทางของแมกนีไทเซชันมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง

เมื่อหัวอ่าน GMR ได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกขนาดตั้งแต่  $-1000$  mT ถึง  $+1000$  mT ในแนวแกน y ซึ่งเป็นการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันสามารถพิจารณาได้จากกราฟ M-H loop โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันมีช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน 2 ช่วง คือ (1) ช่วงที่แมกนีไทเซชันรวมมีค่าสูงสุดเท่ากับค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว  $M_s$  ซึ่งจากกราฟจะเกิดจากกรณีที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL เรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้ในทิศ +y

และทิศ  $-y$  และ (2) ช่วงที่แมกนีไทเซชันรวมของระบบมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากกราฟจะเกิดจากแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจึงมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL ฮิสเตอร์ิซิสลูปในช่วงที่ให้สนามแม่เหล็กในทิศ  $-y$  (แทนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL) มีลักษณะเลื่อนไปทางซ้ายของแกนสมมาตรที่  $H = 0$  และเกิดจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางก่อนแมกนีไทเซชันของชั้น FL เนื่องจากมีสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสเสริมกับสนามแม่เหล็กภายนอก

การเปลี่ยนแปลงทิศทางที่แตกต่างกันของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ส่งผลทำให้ความต้านทานของหัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR มีช่วงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน 2 ช่วง คือ (1) ช่วงที่ความต้านทานของหัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลงคงที่ซึ่งจากกราฟ พบว่าเกิดจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ  $+y$  และ  $-y$  ทำให้ความต้านทานมีค่าต่ำที่สุด และเกิดจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL มีทิศทางตรงข้ามกันทำให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีค่าสูงที่สุด และ (2) เป็นช่วงที่กราฟความต้านทานของหัวอ่าน GMR มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการวัดการตอบสนองต่อแม่เหล็กของหัวอ่าน GMR จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเราพบว่าการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของกราฟเกิดจากเมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง และเกิดจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางแต่แมกนีไทเซชันของชั้น FL ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในกรณีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้น PL เป็นชั้นอ้างอิงของหัวอ่าน GMR จึงต้องเป็นชั้นที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง

กราฟการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่ได้จากการจำลองโครงสร้างพื้นฐานของหัวอ่าน GMR มีช่วงที่ความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรงเกิดขึ้นในช่วงที่แคบมาก นั่นแสดงว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กและนอกจากนี้ยังพบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL ซึ่งเป็นชั้นแม่เหล็กที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ออกจากมิเดีย มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กในทิศ  $+y$  และ  $-y$  ด้วยสนามแม่เหล็กขนาดต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน GMR มีประสิทธิภาพที่ไม่ดีพอในการวัดสนามแม่เหล็ก เราจึงทำการจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน

GMR ได้แก่ ความหนาของชั้น FL สนามแม่เหล็ก ไบอัสเพื่อตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL และชั้น FL ตามลำดับ และวัสดุที่ใช้สร้าง GMR

ปัจจัยแรกที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR คือความหนาของชั้น FL โดยในแบบจำลองนี้จะสร้างหัวอ่าน GMR ที่มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกันตลอดการจำลอง รวมทั้งชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสจาก AFM ขนาดคงที่เท่ากับ 50 mT แต่ความหนาของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงมีขนาดตั้งแต่ 1–5 nm ซึ่งมีขนาดน้อยกว่า และมากกว่าความหนาของชั้น PL ที่กำหนดให้มีความหนา 3 nm เมื่อความหนาของชั้น FL มีค่าลดลงน้อยกว่าความหนาของชั้น PL ซึ่งกำหนดให้มีความหนา 1 และ 2 nm ตามลำดับ ทำให้มีอิทธิพลของพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ในชั้น FL มีค่าลดลงจึงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่ายขึ้นตามขนาดความหนาของชั้น FL ที่มีขนาดลดลง กราฟ M–H loop ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL (ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y ) จึงมีลักษณะแคบ ส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีความกว้าง ( $\Delta H$ ) ลดลงตามความหนาของชั้น FL ที่ลดลงด้วย และเมื่อความหนาของชั้น FL มีค่าเพิ่มขึ้นขนาด 4 และ 5 nm ทำให้มีอิทธิพลของพลังงานเอ็กซ์เซนจ์ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ในชั้น FL มีค่ามากขึ้น แมกนีไทเซชันของชั้น FL จึงเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ยากขึ้นตามขนาดความหนาของชั้น FL ที่เพิ่มขึ้น กราฟ M–H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะกว้างขึ้นส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีความกว้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราจะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้น FL มากขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น และกราฟ R–H loop ของหัวอ่าน GMR เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงมากขึ้นเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน

การจำลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน GMR มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้ไม่ดี ซึ่งสังเกตได้จากกราฟ R–H loop เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ แมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้ทำการจำลองปัจจัยที่สองที่ส่งผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัวอ่าน GMR คือสนามแม่เหล็กไบอัสที่ให้แก่อ่าน GMR ซึ่งสนามแม่เหล็กไบอัสที่ให้แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่ให้แก่ชั้น PL และสนามไบอัสที่ให้แก่ชั้น FL

สนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่ให้แก่ชั้น PL ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างจากชั้น AFM เพื่อตรึงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL ให้มีทิศทางคงที่ กำหนดสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสที่

ให้แก่ชั้น PL หลายขนาดตั้งแต่ 0 mT ถึง 400 mT เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL ไม่ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสแมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากกว่าชั้น FL เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กของชั้น PL มีค่า  $M_0$  มากกว่าวัสดุแม่เหล็กของชั้น FL จึงต้องใช้สนามแม่เหล็กในการเปลี่ยนแปลงทิศทางมากกว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL ในขณะที่  $\Delta H$  ที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสให้ชั้น PL มากขึ้น แมกนีไทเซชันของชั้น PL เปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น ทำให้หัวอ่าน GMR มีค่า  $H_c$  เพิ่มขึ้น กราฟ M-H loop จึงมีลักษณะเลื่อนออกจากแกนสมมาตรมากขึ้น ส่งผลให้ทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้น PL ซึ่งใช้เป็นตัวอ้างอิงในการวัดสนามแม่เหล็กมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสของชั้น PL ไม่ส่งผลกระทบต่อ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กชั้น FL

สนามไบอัสที่ให้แก่ชั้น FL ที่เรียกว่า hard bias ซึ่งทำจากวัสดุแม่เหล็กถาวร หรือ soft bias ซึ่งทำจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันเริ่มต้นของชั้น FL มีทิศตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้น PL แบบจำลองนี้ใช้หัวอ่าน GMR มีคุณสมบัติเหมือนการจำลองที่ผ่านมาแต่ให้สนามไบอัสที่ให้แก่ชั้น FL หลายขนาดตั้งแต่ 50 mT จนถึง 400 mT เมื่อทำการเพิ่มสนามไบอัสให้แก่ชั้น FL มากขึ้น พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL จะเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กได้ง่ายขึ้น  $\Delta H$  ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีความกว้างลดลง และเมื่อชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาดตั้งแต่ 150 mT ขึ้นไป ความกว้างฮิสเทอรีซิสลูปของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวอ่าน GMR ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น ส่งผลทำให้หัวอ่าน GMR มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี และมีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากขึ้นด้วย และยังพบว่าการเพิ่มขนาดของสนามไบอัสไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น PL

การจำลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน GMR จะมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี เมื่อแมกนีไทเซชันของชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาดมากกว่า 50 mT และแมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามไบอัสขนาดตั้งแต่ 150 mT ขึ้นไป ซึ่งจะ ทำให้  $\Delta H$  ของกราฟ R-H loop มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และทิศของแมกนีไทเซชันของชั้น PL จะมีเสถียรภาพที่ดี เมื่อทำการสร้างแบบจำลองจะใช้หัวอ่าน GMR ที่มีโครงสร้างเหมือนแบบจำลองที่ผ่านมาในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยกำหนดให้ชั้น PL ได้รับสนามเอ็กซ์เซนจ์ไบอัสขนาด 200 mT และแมกนีไทเซชันของชั้น FL ได้รับสนามแม่เหล็กไบอัสขนาด 150 mT กราฟการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่ได้จากการจำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเกิด loop ขึ้น แสดงให้เห็นว่าหัวอ่าน GMR ที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสม CoFe ยัง

ไม่มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในชั้น FL

เมื่อทำการเปลี่ยนวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างชั้น FL เป็นโลหะผสม NiFe CoFeSiB และ CoSiB พบว่าแมกนีไทเซชันของชั้น FL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ง่ายขึ้นจึงใช้สนามแม่เหล็กในการเปลี่ยนแปลงทิศทางน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟ M-H loop ในช่วงที่เพิ่มสนามแม่เหล็กในทิศ +y มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น ในขณะที่แมกนีไทเซชันของชั้น PL มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางยากขึ้น ตามชนิดของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้ในชั้น FL

เมื่อนำแมกนีไทเซชันของชั้น FL และ PL มาคำนวณ R-H loop เราสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาความไว และช่วงในการตอบสนองของ GMR เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวอ่าน GMR ที่ชั้น FL ทำจากวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อนต่างชนิดกัน โดยพบว่าหัวอ่าน GMR ที่มี NiFe เป็นชั้น FL มีความไวในการตอบสนองสูงสุดและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานลดลงมากกว่ากรณีวัสดุ CoFeSiB และ CoSiB เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กขนาดเท่ากัน แต่มีช่วงการตอบสนองน้อยกว่ากรณีที่ชั้น FL เป็นสาร CoFeSiB และ CoSiB และชั้น FL ที่เป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อน CoSiB มีช่วงในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากที่สุด



## รายการอ้างอิง

- [1] M.N. Baibich, et al. (1988), “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices,” **Physical Review Letters**, Vol. 61: 2472–2475.
- [2] G.Binasch et al. (1989), “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange,” **Physical Review B**, Vol. 39: 4828–4830.
- [3] S. Iida (1963), “The difference between gilbert's and landau–lifshitz's equations,” **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, Volume 24, Issue 5: 625–630.
- [4] Shen Liu, et al. (2012), “Experimental research on hysteresis effects in GMR sensors for analog measurement applications,” **Sensors and Actuators A**, Vol. 182: 72–81.
- [5] Kai Zhong Gao, et al. (2009), “Read and write processes, and head technology for perpendicular recording,” **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 321: 495–507.
- [6] M. J. Donahue and D. G. Porter (2010), **OOMMF User's Guide**, Version 1, (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, July 19).
- [7] Evgeny Y. and Tsymbaland Igorzutic (2012), **Handbook of Spin Transport and Magnetism**, (CRC Press: Taylor & Francis Group), 95.
- [8] R. Coehoorn, et al. (1998), “Giant Magnetoresistance Materials for read heads,” **Philips Journal of Research**, Vol. 51, No. 1: 93–124.
- [9] Hartmann (2010), **Magnetic multilayers and Giant magnetoresistance: fundamentals and industrial applications**, 1<sup>st</sup> Edition (Verlag Berlin Heidelberg: Springer), 69.
- [10] N. F. Mott (1964), “Electrons in Transition Metals,” **Adv. Phys.**, Vol. 13, 51: 325–422.
- [11] S.M. Thompson (2008), “The discovery development and future of GMR: The Nobel Prize 2007,” **J. Phys. D. Appl. Phys.**, Volume 41: 11–20.



- [12] J.C. Slonczewski (1996), “Current-driven excitation of magnetic multilayers,” **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 159, Issues 1–2: 1–7.
- [13] J. S. Moodera, et al. (1995), “Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions,” **Phys. Rev. Lett.**, Volume 74: 3273.
- [14] M. Julliere (1975), “Tunneling between ferromagnetic films,” **Physics Lett. A**, Vol. 54, Issue 3: 225–226.
- [15] I. Zutic, Jaroslav Fabian, and S. Das Sarma (2004), “Spintronics: Fundamentals and applications,” **Rev. Mod. Phys.**, Vol. 76: 323–410.
- [16] Ben Van de Wiele (2010), “Numerical study of magnetic processes: extending the Landau–Lifshitz–Gilbert approach from nanoscale to microscale” (degree of doctor, department of Physical Engineering, Ghent University, March): 27–30.
- [17] A. E. LaBonte (1969), “Two–dimensional Bloch–type domain walls in ferromagnetic films,” **Journal of Applied Physics**, Volume 40, Issue 6: 2450–2458.
- [18] L.D. Landau, E. Lifshitz (1960), “**Electrodynamics of Continuous Media**,” translated from Russian by Sykes J.B. and Bell J.S. Pergamon Press, Oxford: 225–256.
- [19] Dan Wei (2012), “Micromagnetics and Recording Materials,” **Springer Briefs in Applied Sciences and Technology**, DOI: 10.1007/978-3-642-28577-6\_1.
- [20] H. E. Knoepfel (2000), **magnetic fields: a comprehensive theoretical treatise for practical use** (John Wiley & Sons, Inc.): 363.
- [21] D. David (2013), “Spintronic micromagnetic simulations using parallel computations,” (Doctor thesis Dept. phy. Appl., de la Universiteit of Salamanca): 35.
- [22] G. S. Abo, et al. (2013), “Definition of Magnetic Exchange Length,” **IEEE Transactions on magnetic**, Vol. 49, No. 4937: 31.

- [23] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean (1956), "New Magnetic Anisotropy," **Phys. Rev.**, Vol. 102: 1413–1414.
- [24] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean (1957), "New Magnetic Anisotropy," **Phys. Rev.**, Vol. 105: 904.
- [25] Yi Wang, et al. (2011), "Micromagnetic Studies on Tunneling Magnetoresistive Spin Valves," **IEEE Transactions on magnetic**, Vol. 47, No. 10 (October): 2720–2723.
- [26] Yin Cong, et al. (2014), "Modeling and analysis of nano-sized GMRs based on Co, NiFe and Ni materials," **Science China Information Sciences**, Vol. 57 (February): 1–14.
- [27] B. Dieny, et al. (1991), "Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers," **Phys. Rev. B.**, Vol. 43 (January): 1297.
- [28] T. Okazaki, et al.(2004), "GMR and soft magnetic properties of Ni–Mn alloys with dispersed ferromagnetic nano particles," **Rev. Adv. Mater. Sci.**, Vol. 6 (February): 150–161.
- [29] B. Szymanski, M. Urbaniak, F. Stobiecki (2007), "Magnetic and magneto resistive properties of CoFe/Au/Co/Au multilayered structures," **Materials Science–Poland**, Vol. 25, No. 4 (May): 1275–1279.
- [30] TaeHyo Lee, et al. (2003), "Free-layer thickness dependence of GMR in Co/Permalloy/Co/Cu/Co multilayers," **Physica B**, Vol. 328: 291–294.
- [31] Yang Ren, et al.(2010), "Effects of Interlayer Coupling in Elongated Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> /Au/Co Nanorings," **IEEE Transactions on magnetic**, Vol. 46, No. 6 (June): 1906–1909.
- [32] J. Nogués and I. K. Schuller (1999), "Exchange Bias," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 192: 203–232.

- [33] Jeong-Suk Park, et al. (2002), "Parametric sensitivity analysis on the giant magneto resistive characteristics of synthetic antiferromagnet-based spin valves," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 250: 25–31.
- [34] P. A. Grunberg (2001), "Exchange anisotropy, interlayer exchange coupling and GMR in research and application," **Sensors and Actuators A**, Vol. 91: 153–160.
- [35] SHE Sheng-Xian, et al. (2009), "Micromagnetic Simulation of Transfer Curve in Giant Magnetoresistive Head," **CHN. PHYS. LETT.**, Vol. 26, No. 12: 127503–1.
- [36] Daheum Kim, et al. (2003), "Magnetic properties of nanocrystalline iron group thin film alloys electrodeposited from sulfate and chloride baths," **Electrochimica Acta**, Vol. 48: 819–830.
- [37] D. Mauri, E. Kay, D. Scholl, and J. K. Howard (1987), "Novel method for determining the anisotropy constant of MnFe in a NiFe/MnFe sandwich," **J. Appl. Phys.**, Vol. 62: 2929–2932.
- [38] R. Jungblut, et al. (1994), "Orientational dependence of the exchange biasing in molecular beam epitaxy grown  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$  bilayers," **Journal of Applied Physics**, Vol. 75: 6659.
- [39] M. Tsunoda, T. Sato, and Takahiko Hashimoto (2004), "Exchange anisotropy of polycrystalline Mn–Ir/Co–Fe bilayers enlarged by long-time annealing," **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 84, No. 25 (June): 5222.
- [40] S. Anandakumar, et al. (2010), "Positive and negative exchange bias in IrMn/NiFe bilayers," **Thin Solid Films**, Vol. 519: 1020–1024.
- [41] Y.G. Wang, et al. (2002), "Magnetisation reversal of the ferromagnetic layer in IrMn/CoFe bilayer films," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 242–245: 1081–1084.

- [42] S. Groudeva-Zotova, et al. (2003), "Magnetic and structural characteristics of exchange biasing systems based on NiMn antiferromagnetic films," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 263: 57–71.
- [43] Y.G. Wang and A.K. Petford-Long (2004), "Magnetization reversal in the pinned layer of CoFe/PtMn bilayers," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 279: 82–90.
- [44] A.E. Berkowitz, Kentaro Takano (1999), "Exchange anisotropy a review," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 200: 552–570.
- [45] B. H. Miller and E. D. Dahlberg (1996), "Use of the anisotropic magnetoresistance to measure exchange anisotropy in Co/CoO bilayers," **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 69: 3932.
- [46] K. Matsuyama, et al. (1998), "Micromagnetics of magnetization switching in nano structured multilayer," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 177–181: 197–198.
- [47] J.Y. Hwang, et al. (2006), "Tunneling magnetoresistance and magnetization switching of CoFeSiB free layered magnetic tunnel junctions," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 303: 231–233.
- [48] J.Y. Hwang, et al. (2007), "Magnetoresistance and switching properties of magnetic tunnel junctions using amorphous CoSiB free layer," **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 310: 1943–1945.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF )

## ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม Object Oriented Micro Magnetic Framework (OOMMF)

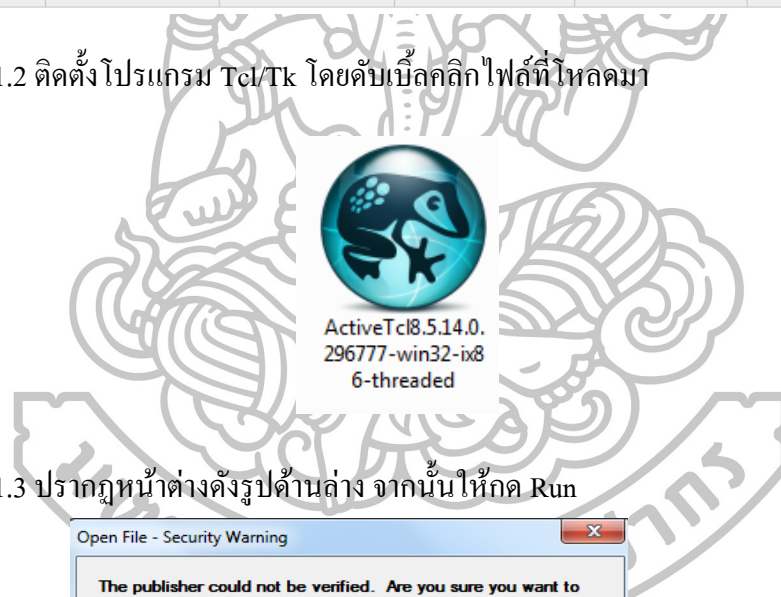
### 1. ติดตั้งโปรแกรม Tcl/Tk

1.1 ดาวน์โหลด Tcl/Tk ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้ในการอ่านโค้ดของโปรแกรม OOMMF จากเว็บไซต์ <http://www.activestate.com/activetcl/downloads> ตามเวอร์ชันของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง

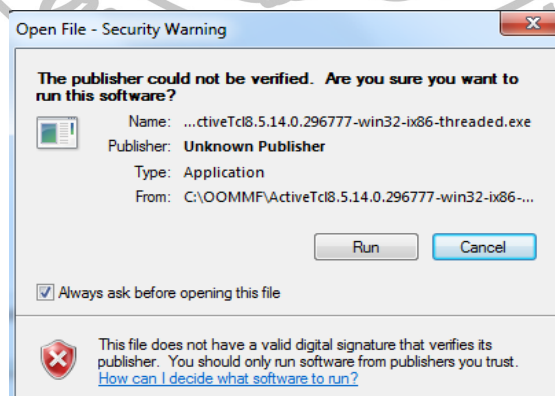
#### Download Tcl: Other Platforms and Versions

Version	Windows (x86)	Windows (64-bit, x64)	Mac OS X (10.5+, x86_64/x86)	Linux (x86)	Linux (x86_64)
8.6.4.1	Windows Installer (EXE)	Windows Installer (EXE)	Mac Disk Image (DMG)	AS Package	AS Package
8.5.18.0	Windows Installer (EXE)	Windows Installer (EXE)	Mac Disk Image (DMG)	AS Package	AS Package

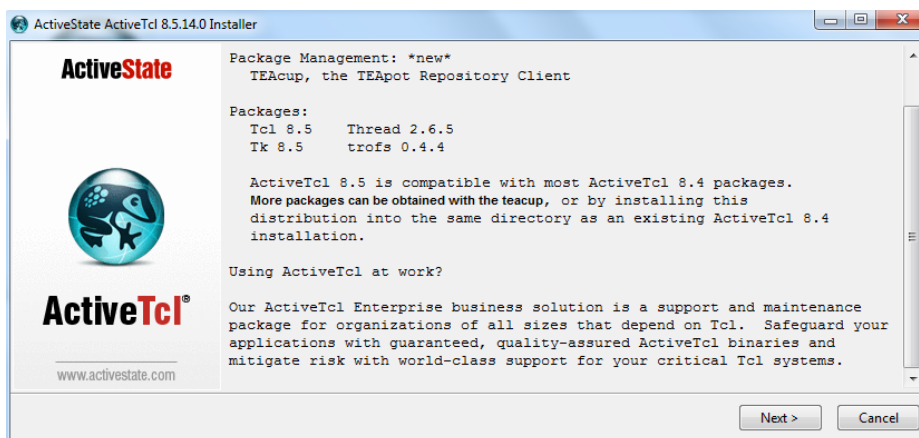
1.2 ติดตั้งโปรแกรม Tcl/Tk โดยดับเบิลคลิกไฟล์ที่โหลดมา



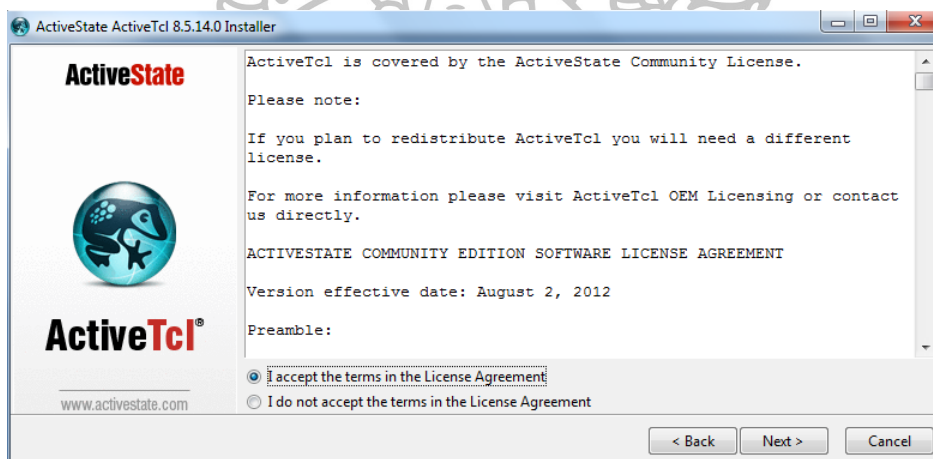
1.3 ปรากฏหน้าต่างดังรูปด้านล่าง จากนั้นให้กด Run



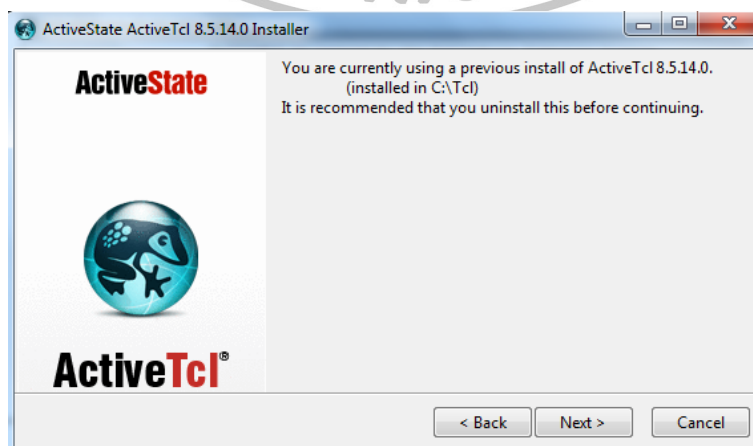
## 1.4 กด Next



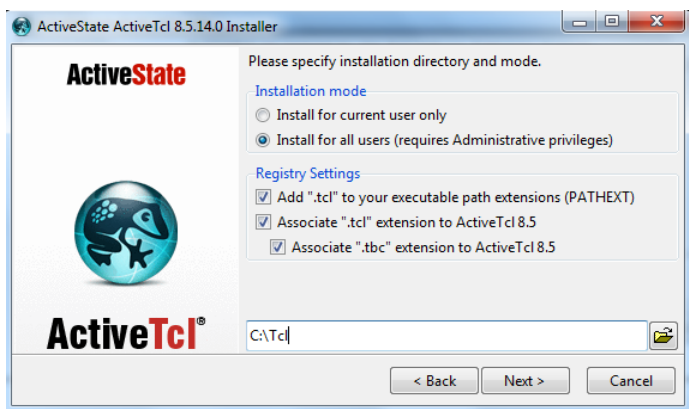
## 1.5 เลือกที่ I accept the terms in the License Agreement ต่อจากนั้นก็กด Next



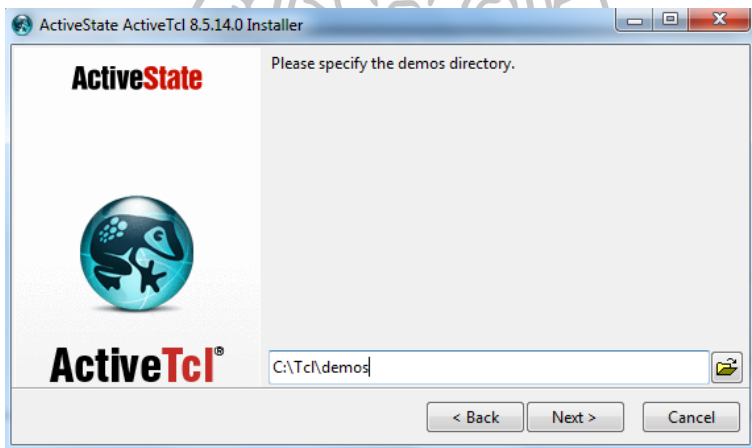
## 1.6 กด Next



1.7 กด Next



1.8 กด Next



1.9 เลือก keep the existing repository, and ignore the seed repository จากนั้นกด Next

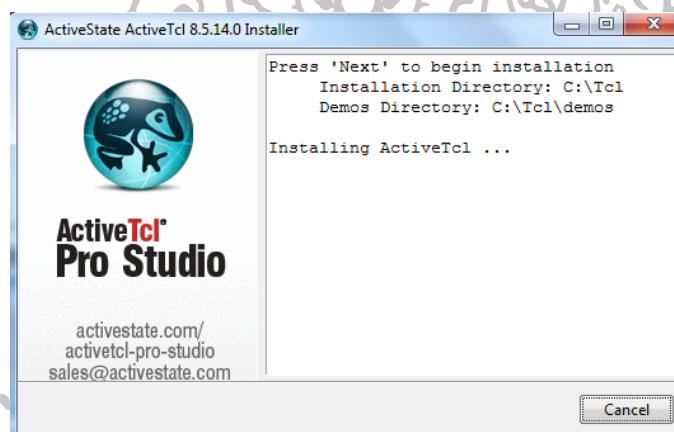




1.10 กด Next เพื่อเริ่มติดตั้ง Tcl/Tk



1.11 รอการติดตั้ง



1.12 เมื่อติดตั้งเสร็จจะขึ้นหน้าต่างดังรูปด้านล่างขึ้นมา จากนั้นก็กด Finish เป็นอันเสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม Tcl/Tk

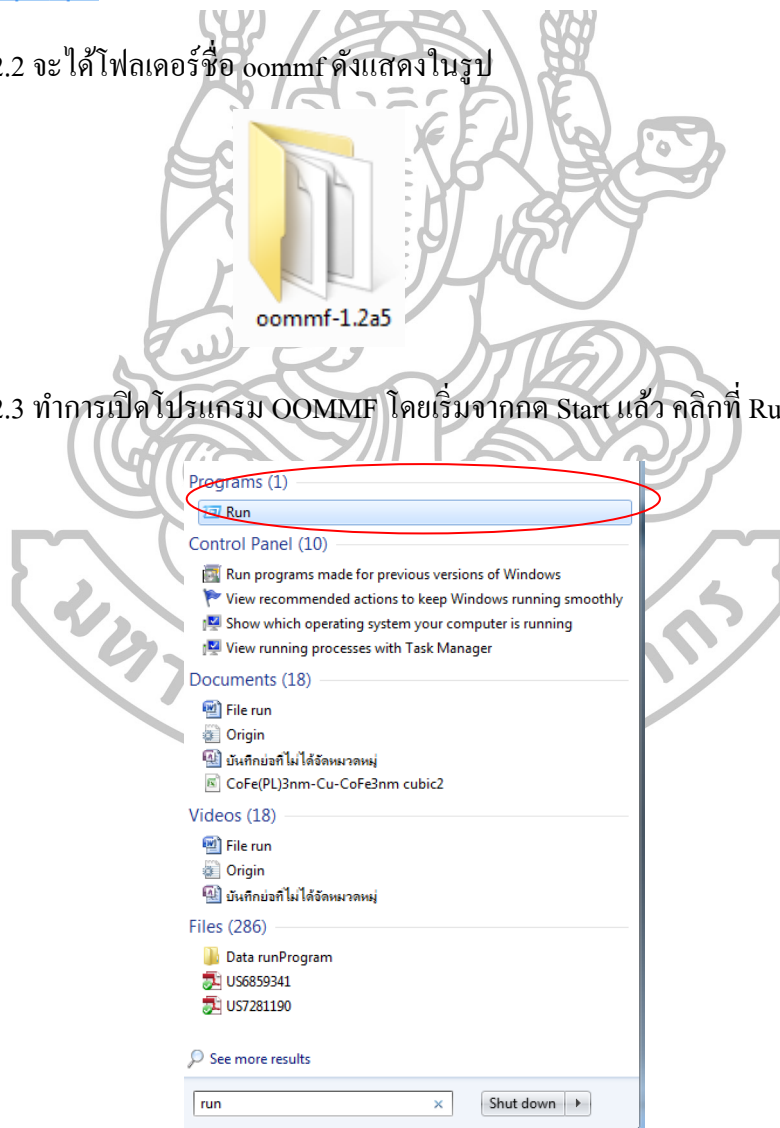


## 2. การติดตั้งโปรแกรม OOMMF

2.1 ดาวน์โหลดไฟล์โปรแกรม OOMMF เลือกตามเวอร์ชันของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง จากเว็บไซต์ <http://math.nist.gov/oommf/software-12.html>

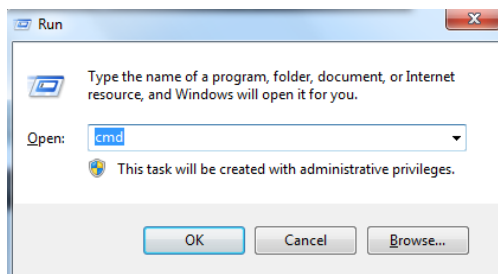
- OOMMF 1.2 alpha 6 (30-Sep-2015).
  - [Source-only](#) gzipped-tar file (14 140 195 bytes).
  - Source with pre-compiled [64-bit Windows executables \(x64\) for 64-bit Tcl/Tk 8.6.x](#). pkzipped archive (18 152 793 bytes).
  - Source with pre-compiled [32-bit Windows executables \(x86\) for 32-bit Tcl/Tk 8.5.x](#). pkzipped archive (17 806 047 bytes).
- OOMMF 1.2 alpha 5 bis (7-Apr-2014). Minor updates to the OOMMF 1.2a5 release candidate: Build support for Ubuntu 12, new Oxs\_Ext extension DMExchange6Ngr, updated versions of Oxs\_Ext extensions CYY\_STTEvolve and oommf-2dpbc.
  - [Source-only](#) gzipped-tar file (11 671 454 bytes).
  - Source with pre-compiled [64-bit Windows executables \(x64\) for 64-bit Tcl/Tk 8.6.x](#). pkzipped archive (15 285 045 bytes).
  - Source with pre-compiled [32-bit Windows executables \(x86\) for 32-bit Tcl/Tk 8.5.x](#). pkzipped archive (14 959 482 bytes).
- OOMMF 1.2 alpha 5, 28-Sep-2012. Release candidate.
  - [Source-only](#) gzipped-tar file (11 651 634 bytes).
  - Source with pre-compiled [32-bit Windows executables \(x86\) for 32-bit Tcl/Tk 8.5.x](#). pkzipped archive (14 722 760 bytes).
  - Source with pre-compiled [64-bit Windows executables \(x64\) for 64-bit Tcl/Tk 8.5.x](#). pkzipped archive (15 253 491 bytes).
- OOMMF 1.2 alpha 4 [development snapshots](#).

2.2 จะได้ไฟล์เครื่องชื่อ oommf ดังแสดงในรูป

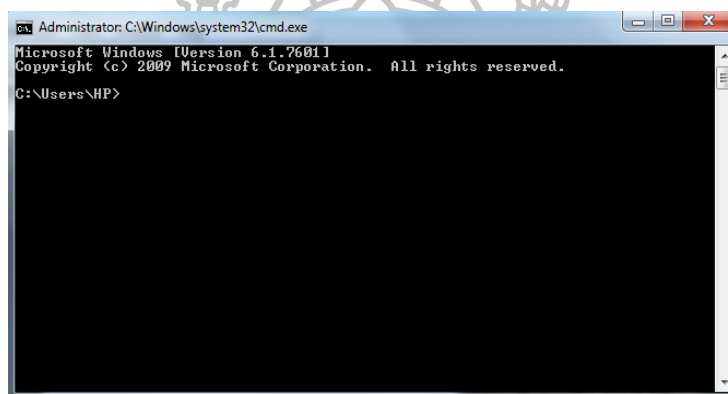


2.3 ทำการเปิดโปรแกรม OOMMF โดยเริ่มจากกด Start แล้ว คลิกที่ Run

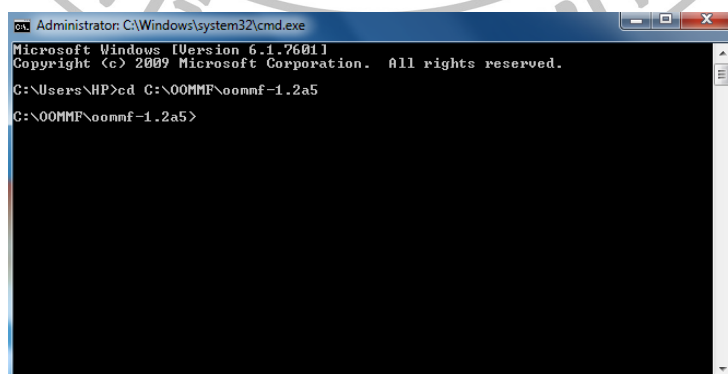
## 2.4 พิมพ์ cmd แล้ว กด OK



## 2.5 ปรากฏหน้าต่างต่าง Command windows



## 2.6 พิมพ์ cd แล้วเว้นวรรค จากนั้นลากโฟลเดอร์ oommf มาวางใน Command windows แล้วกด Enter

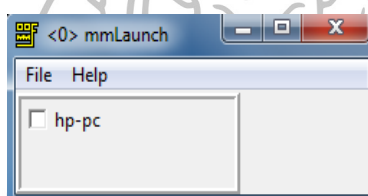


2.7 จากนั้นก็พิมพ์ oommf.tcl แล้วกด Enter

```
Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

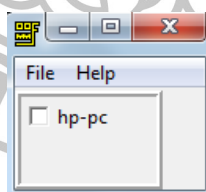
C:\Users\HP>cd C:\OoMMF\oommf-1.2a5
C:\OoMMF\oommf-1.2a5>oommf.tcl
C:\OoMMF\oommf-1.2a5>_
```

2.8 จะได้โปรแกรม oommf ขึ้นมา



### 3. การใช้งานโปรแกรม OoMMF

3.1 เปิดหน้าต่าง mmLaunch โดยการดับเบิลคลิกที่ไอคอนของ OoMMF จะปรากฏหน้าต่าง mmLaunch ขึ้นมาดังรูปด้านล่าง



3.2 เลือก hp-pc ทำให้เมนูบัญชีของผู้ใช้ปรากฏขึ้น เลือกช่องบัญชีผู้ใช้ จากนั้นจะปรากฏเมนูของตัวเลือก โดยเมนูตัวเลือกจะมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

**mmArchive:** บันทึกข้อมูลสนามสเกลาร์และเวกเตอร์อัตโนมัติของข้อมูลที่เราต้องการบันทึก

**mmDataTable:** การแสดงค่าปัจจุบันของผลสเกลาร์

**mmDisp :** แสดงสนามเวกเตอร์

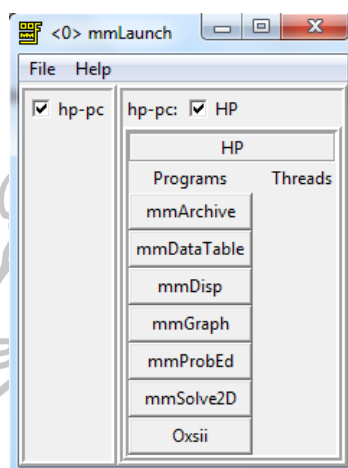
**mmGraph :** plot แกน x-y

**mmProbEd:** เพื่อแก้ไขปัญหาสำหรับ mmSolve2D

**mmSolve2D:** เพื่อควบคุมการแก้ปัญหามิติ (2D)

**Oxsii:** เพื่อควบคุมการแก้ปัญหามิติ (3D)

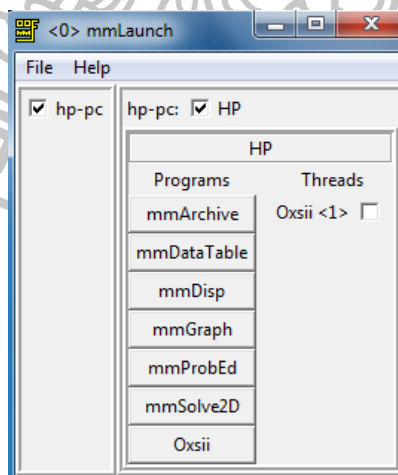
ในการเลือกใช้เมนู mmDisp mmGraph หรือ mmDataTable จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลลัพธ์ที่คุณต้องการใช้ ในขณะที่การเลือกใช้เมนู mmArchive เพื่อบันทึกข้อมูลไปยังดิสก์



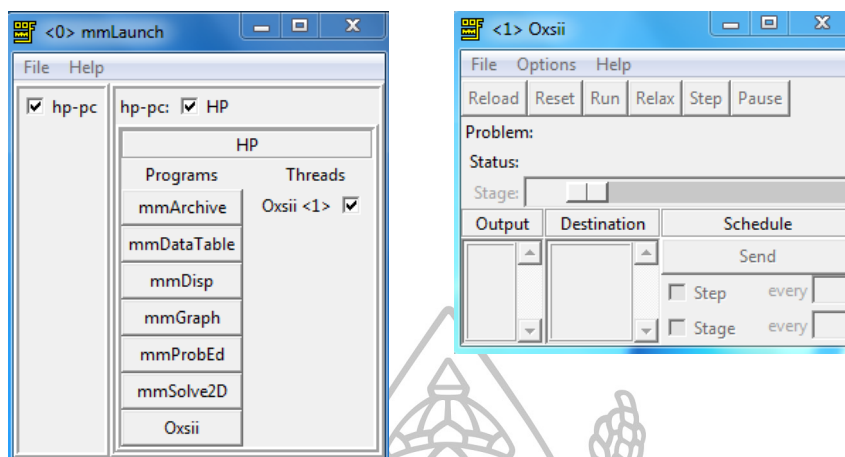
3.3 ในงานวิจัยนี้เราจะทำการแก้ปัญหามิติ 3 มิติ

3.3.1 บนหน้าต่าง mmLaunch คลิกที่ปุ่ม Oxsii เพื่อเปิดตัวอย่างของโปรแกรม Oxsii

รอให้ Oxsii ปรากฏในคอลัมน์ Threads ในหน้าต่าง mmLaunch

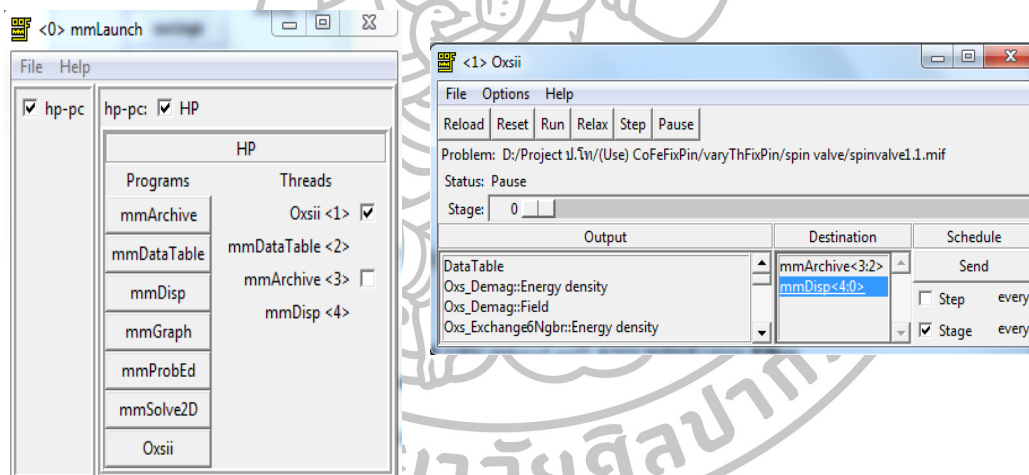


### 3.3.2 เลือกช่องถัดจาก Oxsii จากนั้นหน้าต่าง Oxsii จะปรากฏขึ้น



## 4. โหลดปัญหา :

### 4.1 บนหน้าต่าง Oxsii เลือก File >> Load จะปรากฏหน้าต่าง Load Problem



4.1.1 ดับเบิลคลิกที่ Path เพื่อเปลี่ยนไดเรกทอรี (directory) ตัวอย่างปัญหาสามารถพบในไดเรกทอรี oommf/app/oxs/examples

4.1.2 โหลดปัญหา ดับเบิลคลิกบน \*.mif (เช่น stdprod.mif) จากรายชื่อข้างบน Filter

4.2 บรรทัด status ในหน้าต่าง Oxsii จะบอกถึงปัญหานี้มีการโหลด

4.3 เมื่อปัญหามีการโหลดเสร็จบรรทัด status จะแสดง "Pulse" และแถบบนสุดของปุ่ม (Reload, Reset, ...) จะถูกใช้งานอยู่นอกจากนี้รายการผลลัพธ์จะเต็มด้วยผลที่ใช้ได้

4.4 ตั้งค่ากำหนดผลลัพธ์สำหรับผลลัพธ์ที่ต้องการ

4.4.1 เลือกแหล่งจ่ายที่มาจากรายการ Output

4.4.2 เลือกตัวรับจากรายการ Destination

4.4.3 ระบุความถี่ในการรับข้อมูลปัจจุบัน

o – Step: กรอกตัวเลขและกดเลือกที่ช่อง

o – Stage: กรอกตัวเลขและกดเลือกที่ช่อง

รายการ Output จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัญหาที่ถูกลด

รายการ Destination แสดงให้เห็นการบันทึกข้อมูลและการทำงานของโปรแกรม OOMMF

## 5. เริ่มการคำนวณ

5.1 บนหน้าต่าง Oxsii เริ่มต้นการคำนวณด้วย Run, Relax หรือ Stop

5.2 ถ้าต้องการผลลัพธ์ mmDataTable เลือกที่ช่องสำหรับปริมาณที่ต้องการในหน้าต่าง mmDataTable ภายใต้เมนู Data เพื่อให้ทั้งหมดปรากฏขึ้นและมีการปรับปรุงให้เป็นไปตามกำหนดของคุณ

5.3 ในทำนองเดียวกันทำการเลือกช่องที่ต้องการสำหรับปริมาณของ X, Y1 และ Y2 ในหน้าต่าง mmGraph ภายใต้เมนูของ X, Y1 และ Y2

## 6. การบันทึกผลลัพธ์

6.1 ข้อมูลสนาม Vector (magnetization and effective field) อาจจะมีการเขียนไปยังดิสก์โดยใช้ mmDisp หรือซึ่งจะบันทึกข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับโดยอัตโนมัติ mmArchive เช่นในการบันทึกสถานะเป็นแม่เหล็กที่สุดท้ายของปัญหาแต่ละขั้นตอน เริ่มต้นตัวอย่างของ mmArchive และเลือก Stage เลือกที่ช่อง Magnetization output คู่มือของ mmArchive (Stages หมายถึงจุดในการจำลองบาง เหตุการณ์ที่สำคัญเช่นเมื่อถึงสมดุลหรือบางการจำลองล่วงหน้าที่ตั้งไว้เป็นเวลาเดียวกันเกณฑ์เหล่านี้ถูกกำหนดโดยการใส่ไฟล์ MIF)

6.2 ข้อมูล DataTable (ตารางข้อมูล) อาจถูกบันทึกโดยการส่งระหว่างการแก้ปัญหาไปยัง mmArchive ซึ่งจะบันทึกข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับโดยอัตโนมัติ mmGraph สามารถดำเนินการฟังก์ชันนี้ส่งออกไปยัง mmGraph ตามต้องการและใช้การทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งหรือการบันทึกแบบอัตโนมัติสำหรับ mmGraph คุณสามารถตั้งค่าการตั้งเวลาแก้ไขปัญหาข้อมูลก่อนจะเริ่มการคำนวณแต่ต้องรอข้อมูลจุดแรกในการกำหนดค่า mmGraph ก่อนที่จะบันทึกข้อมูลใดๆวิธีแก้ปัญหาคุณอาจกำหนดค่า mmGraph โดยให้แก้ปัญหาที่สถานะเริ่มต้นและใช้ Option | clear Data เมนูใน mmGraph เพื่อลบข้อมูลจุดตั้งต้น

## 7. Midcourse control

7.1 บนหน้าต่าง Oxsii หลายปุ่มสามารถหยุดและเริ่มการคำนวณ

- Reload : โหลดไฟล์เดียวกันจากดิสก์
- Reset : กลับไปที่จุดเริ่มต้นของปัญหา
- Run : ขั้นตอนที่ผ่านมาทุกขั้นตอนจนเสร็จสมบูรณ์ทั้งหมด
- Relax : รันจนกว่าจะถึงเกณฑ์การสิ้นสุดขั้นตอนปัจจุบัน
- Step : ทำการแก้ปัญหาซ้ำแล้วหยุด
- Pause : คลิกที่เวลาที่จะหยุดแก้ปัญหา ดำเนินการจำลองต่อจากที่หยุดชั่วคราว เพื่อ Run หรือ Relax หรือ Step.
- Stage : การเปลี่ยนแปลงขั้นตอนปัจจุบันได้โดยการพิมพ์จำนวนขั้นตอนที่ต้องการ (โดยนับจาก 0) ลงใน Stage หรือโดยการเลื่อนแถบที่เกี่ยวข้อง

7.2 ตัวเลือกผลลัพธ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และเปิดหน้าต่างผลลัพธ์ใหม่ ปุ่ม Send ในหน้าต่างย่อย Oxsii Schedule จะใช้เพื่อการส่งออกไปยังคู่ Output และ Destination ที่เลือกไว้

## 8. การออกจากโปรแกรม OOMMF

8.1 การใช้งาน OOMMF ส่วนบุคคลสามารถถูกยกเลิกได้โดยการเลือกเมนู File>>Exit จากหน้าต่าง

8.2 การเลือก File>>Exit ที่หน้าต่าง mmLaunch จะเปิดหน้าต่าง mmLaunch และหน้าต่างส่วนติดต่อสำหรับ mmArchive, mmSolve2D และ Oxsii อย่างไรก็ตามโปรแกรมเหล่านั้นจะยังคงทำงานในส่วนพื้นหลังและส่วนติดต่อของพวกเขาอาจจะแสดงใหม่อีกครั้งโดยเริ่มต้น mmLaunch ใหม่

8.3 การปิดทุกการใช้งานของโปรแกรม OOMMF ทั้งหมดอัตโนมัติให้เลือก File>>Exit All OOMMF จากแถบเมนู mmLaunch





ภาคผนวก ข

คำสั่ง OOMMF ที่ใช้ในการจำลองหัวอ่าน GMR ด้วยสมการรันเดา - ดิฟิซิทซ์-กิลเบิร์ต

คำสั่งที่ใช้ในการจำลองหัวอ่าน GMR ด้วยสมการลันเดา – ลิฟวิทซ์ กิลเบิร์ต

1. การจำลองหัวอ่าน GMR กรณีที่มีการเปลี่ยนสารแม่เหล็กในชั้น FL

```
# MIF 2.1
# Description: Hysteresis loop using Runge-Kutta evolver and time driver.
set pi [expr 4*atan(1.0)]
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
RandomSeed 1
#Parameter cellsize 10e-9

Specify Oxs_BoxAtlas:CoFe {
  xrange {0 50e-9}
  yrange {0 500e-9}
  zrange {6e-9 9e-9}
}

Specify Oxs_MultiAtlas:atlas {
  atlas :CoFe
  atlas { Oxs_BoxAtlas:spacer {
    xrange {0 50e-9}
    yrange {0 500e-9}
    zrange {3e-9 6e-9}
  } }
  atlas { Oxs_BoxAtlas:NiFe {
    xrange {0 50e-9}
    yrange {0 500e-9}
    zrange {0 3e-9}
  } }
}

Specify Oxs_RectangularMesh:mesh [subst {
```

```

cellsize {5e-9 5e-9 0.5e-9}
atlas :atlas}]

```

```
Specify Oxs_UniaxialAnisotropy {
```

```

  K1 { Oxs_AtlasScalarField {
    atlas :atlas
    default_value 0
    values {
      CoFe 5e3
      NiFe 1e2
    }
  }}

```

```

  axis { Oxs_AtlasVectorField {
    atlas :atlas
    default_value {0 1 0}
    values {
      CoFe {0 1 0}
      NiFe {0 1 0}
    }
  }}
}

```

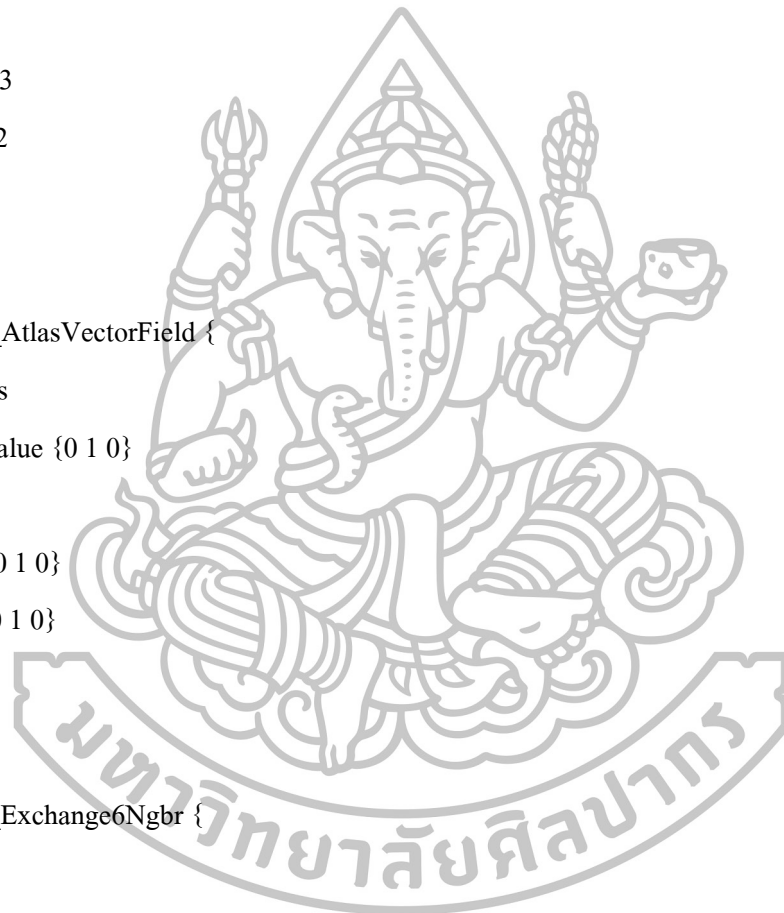
```
Specify Oxs_Exchange6Nbr {
```

```

  atlas :atlas
  default_A 1e-11
  A {
    spacer spacer 0
    spacer CoFe 1e-11
    spacer NiFe 1e-11
  }
}

```

```
# Add biasing field to bottom layer. 40 kA/m is approximately 500 Oe.
```



```
Specify Oxs_FixedZeeman:Bias {
```

```
  field { Oxs_AtlasVectorField {
```

```
    atlas :atlas
```

```
    default_value {0. 0. 0.}
```

```
    values {
```

```
      CoFe {0. 160e3 0. }
```

```
      NiFe {120e3 0. 0. }
```

```
  } } }
```

```
Specify Oxs_UZeeman [subst {
```

```
  multiplier [expr {0.001/$mu0}]
```

```
  Hrange {
```

```
    { 0 0 0 0 200 0 50 }
```

```
    { 0 200 0 0 1000 0 20 }
```

```
    { 0 1000 0 0 200 0 10 }
```

```
    { 0 200 0 0 0 0 50 }
```

```
    { 0 0 0 0 -200 0 50 }
```

```
    { 0 -200 0 0 -1000 0 20 }
```

```
    { 0 -1000 0 0 -200 0 20 }
```

```
    { 0 -200 0 0 0 0 50 }
```

```
    { 0 0 0 0 200 0 50 }
```

```
    { 0 200 0 0 1000 0 20 }
```

```
  }
```

```
}]
```

```
Specify Oxs_Demag {}
```

```
Specify Oxs_RungeKuttaEvolve:evolve {}
```

```
Specify Oxs_TimeDriver [subst {
```

```
  basename sample
```

```
  evolver :evolve
```

```
  stopping_dm_dt 0.1
```

```
mesh :mesh
Ms { Oxs_AtlasScalarField {
  atlas :atlas
  default_value 0
  values {
    CoFe 1.5e6
    NiFe 8.1e5
  }
}}
m0 { 1 0.02 0.01 }
vector_field_output_format {text %7g}
}]
```

