



การศึกษานามแม่เหล็กคงค่าของหัวเขียนแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

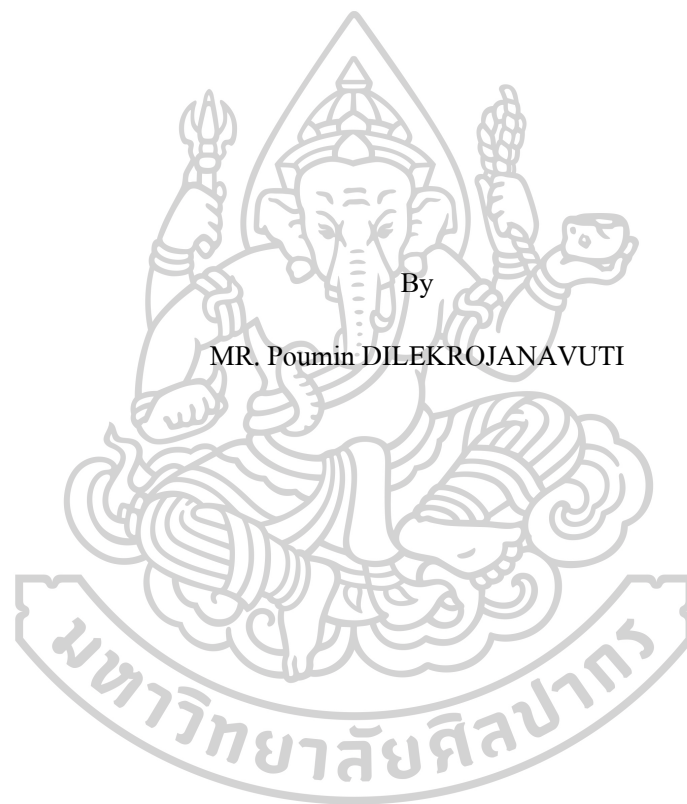
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษานามแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF REMNANT FIELD OF MAGNETIC WRITE HEADS USING
MAGNETIC FORCE MICROSCOPY



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements

for Master of Science (PHYSICS)

Science Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษานามแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็กโดยใช้กล้อง จุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
โดย	ภูมินทร์ ดิเรก โรจน์วุฒิ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปานใจ ชาริสนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัทริยา คำรงค์ศักดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชร รัตนสกุลทอง)



56306208 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, สนามแม่เหล็กค้ำ

นาย ภูมินทร์ ดิเรก โรจนวุฒิ: การศึกษาสนามแม่เหล็กค้ำของหัวเขียนแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์

หนึ่งในปัญหาหลักในกระบวนการผลิตหัวบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งคือการเกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่หัวเขียน ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กค้ำที่พุ่งออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กค้ำสามารถเขียนแตร็คข้อมูลที่ไม่ต้องการหรือลบแตร็คข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กได้ ในงานนี้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy, MFM) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาหลักการพื้นฐานของการเกิดสนามแม่เหล็กค้ำบนหัวเขียนและเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของสนามแม่เหล็กค้ำ เริ่มแรกเราศึกษาสนามแม่เหล็กค้ำที่เกิดขึ้นหลังจากที่หัวเขียนถูกป้อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ และถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยภาพ MFM ของหัวเขียนทั่วไป แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กค้ำอย่างอ่อนสามารถสังเกตเห็นได้เฉพาะบริเวณขอบด้านข้างของชิลด์ซึ่งจะไม่พบบนโพลหลัก ตำแหน่งของสนามแม่เหล็กค้ำจะขึ้นอยู่กับทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของชิลด์ด้านข้าง จากนั้นวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบตัวอย่างหัวเขียนที่มีความแตกต่างกัน 3 กลุ่ม ในการทดลองแรกเราเปรียบเทียบหัวเขียนที่มีชิลด์ล้อมรอบแบบปิด (fully wrapped around shield) ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างกัน 2 รูปแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการค้ำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกันระหว่างหัวเขียนทั้งสองรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามเราพบว่าโครงสร้างหัวเขียนที่มีช่องว่างด้านข้างแคบจะมีสนามแม่เหล็กค้ำค่อนข้างอ่อน ในการทดลองที่สองเป็นการศึกษาเปรียบเทียบหัวเขียนแม่เหล็กที่ถูกปรับสภาพด้วยแก๊สต่างชนิดกัน ผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพผิวด้วยแก๊สส่งผลกระทบต่ออาการเกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่ปลายโพลหลัก ในส่วนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบผลกระทบของความหนาของชั้นป้องกันคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond-like carbon, DLC) ต่อการค้ำบนหัวเขียน ผลที่ได้พบว่าชั้น DLC ไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนหรืออาจส่งผลกระทบต่อที่น้อย

56306208 : Major (PHYSICS)

Keyword : magnetic force microscopy, remanence

MR. Poumin DILEKROJANAVUTI: A study of remnant field of magnetic write heads using magnetic force microscopy Thesis advisor : Badin Damrongsak, Ph.D.

One of main problems in manufacturing a perpendicular magnetic recording head is the write head remanence, which is the remaining out-of-plane magnetic field on the magnetic write head. The remnant field can write unwanted tracks or erase written tracks on a magnetic recording media. In this work, magnetic force microscopy (MFM) was employed to study the basic principle behind the write head remanence and to observe the remanence locations. Firstly, we studied the occurring head remanence after the write head was biased with the AC write current and induced by the external magnetic field. MFM images revealed that, for normal write heads, the weak remnant field can be observed only on the edges of the side shield, not on the write main pole. The location of the remnant field was dependent on the initial direction of the side shield magnetizations. The method was then employed to investigate three different sets of write head samples. In the first experiment, we compared two different designs of the write heads with a fully wrapped around shield. Results showed that the pattern of the head remanence was similar between the two designs; however, it was found that the head design with a narrower side gap had the relatively weaker residual magnetic field. Comparison study of magnetic write heads that were etched with different etching recipes was done in the second experiment. Experimental results revealed that the etching gases had a big impact on the main pole-tip remanence. The last section examined the influence of the coating thickness of the diamond-like carbon (DLC) protective layer on the write head remanence. Results suggested that the DLC layer had no or less effect on the magnetic properties of the write heads.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก อ.ดร.บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีตลอดการทำงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.วัชรวิ รัตนสกุลทอง ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทางบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่คอยสนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงสถานที่ดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ยังรวมถึงบุคลากรทุกคนที่คอยให้ความรู้และความช่วยเหลือในระหว่างการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณจักรกฤษณ์ สุภาวสุทธิ์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย คุณกานต์ แสงแก้ว ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คุณอิทธิพล เชาว์วานิชย์ ที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคลากรในแผนก Technical Support Engineer ที่ให้คำแนะนำสอนการใช้เครื่องมือและคอยดูแลอย่างดีระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ช่วยให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา นอกจากนี้ยังรวมถึงเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษาแลกเปลี่ยนความรู้ ให้คำแนะนำด้านโปรแกรมและให้ความช่วยเหลือกันตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบคุณบิดา มารดา ที่มอบโอกาสทางการศึกษา รวมถึงบุคคลภายในครอบครัวที่ให้กำลังใจและคอยสนับสนุนผู้วิจัยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ภูมินทร์ ดิเรกโรจน์วุฒิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ประวัติแม่เหล็ก.....	6
2.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก	10
2.2.1 ไดอะแมกเนติก (diamagnetic).....	10
2.2.2 พาราแมกเนติก (paramagnetic).....	10
2.2.3 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic)	11
2.2.4 เฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic)	12
2.2.5 เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)	12

2.3 ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop)	13
2.4 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมน (magnetic domains and magnetic domains wall)	14
2.4.1 พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy, E_{ex})	15
2.4.2 พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy, E_{ani})	16
2.4.3 พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy, E_{demag})	17
2.4.4 พลังงานซีแมน (zeeman energy, E_{zee})	18
2.5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD)	19
2.5.1 แผ่นบันทึกข้อมูล (media)	20
2.5.2 มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกข้อมูล (spindle motor)	20
2.5.3 แขนหัวเขียน / อ่าน (actuator Arm)	20
2.5.4 หัวอ่าน / เขียน (read / write head)	21
2.6 เทคโนโลยีหัวเขียน	21
2.7 ความเป็นมาของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	22
2.8 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy, MFM)	23
2.8.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	23
2.8.1.1 ตัวสแกนเพียโซ (piezo-scanner หรือเรียกกันว่า piezoelectric)	23
2.8.1.2 เลเซอร์ไดโอด (laser diode)	24
2.8.1.3 โฟโตไดโอด (photodiode sensitivity detector, PSD)	24
2.8.1.4 คานและหัววัด (cantilever and tip)	25
2.8.2 รูปแบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	26
2.8.2.1 โหมดคงที่ (static mode, DC)	26
2.8.2.2 โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode, AC)	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและการศึกษานามแม่เหล็ก	33
บทที่ 3 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ในการศึกษานามแม่เหล็กคงค้าง ...	38

3.1 ลักษณะโครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	38
3.2 การตรวจวัดสนามแม่เหล็กบนหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	39
3.2.1 ขั้นตอนการจัดตั้งอุปกรณ์และการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	39
3.2.2 ขั้นตอนการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก.....	41
3.2.3 การสร้างรูปภาพสนามแม่เหล็ก.....	42
3.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปภาพแม่เหล็ก.....	45
บทที่ 4 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ โพลของหัวเขียน โดยการใช้ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	48
4.1 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก.....	49
4.2 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากอิทธิพลของขนาดและชนิดของกระแสไฟฟ้า.....	52
4.3 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียน.....	60
4.4 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สต่างชนิด.....	64
4.5 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร.....	66
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล.....	72
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก (ก).....	78
ประวัติผู้เขียน.....	84

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 วิธีการสแกนในแต่ละครั้ง	42
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก.....	42



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ผลเสียของสนามแม่เหล็กค้างบนหัวเขียนแม่เหล็ก	2
รูปที่ 1.2 ภาพการตรวจวัดสนามแม่เหล็กค้างด้วยเทคนิค contact scanning recording	2
รูปที่ 2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	8
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัลของธาตุนีออน (Ne)	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะการเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กของสารพาราแมกเนติก	11
รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก	11
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กของสารเฟอร์ริแมกเนติก	12
รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันของสารเฟอร์โรแมกเนติก	13
รูปที่ 2.7 กราฟฮิสเทอรีซิสลูป	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะ โดเมนแม่เหล็ก	15
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไดโพล โมเมนต์ในผนังโดเมน	16
รูปที่ 2.10 การวางตัวของแมกนีไทเซชันเมื่อกำหนดแกนง่ายของผลึก	17
รูปที่ 2.11 เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก	17
รูปที่ 2.12 การลดพลังงานรวมของสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยเพิ่มจำนวนโดเมนแม่เหล็ก	19
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	20
รูปที่ 2.14 หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก	21
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	23
รูปที่ 2.16 โฟโตไดโอด	24
รูปที่ 2.17 การตอบสนองของหัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กอย่างแข็ง	25
รูปที่ 2.18 การตอบสนองของหัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กอย่างอ่อน	26

รูปที่ 2.19 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในโหมดคงที่	27
รูปที่ 2.20 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในโหมดไดนามิกส์.....	27
รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของคานเมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำ.....	30
รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของคานเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ.....	32
รูปที่ 2.23 รูปแบบจำลองหัวเขียน	33
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของแบบจำลองหัวเขียน	34
รูปที่ 2.25 การเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อแมกนีไทเซชันเริ่มต้น (M_0) ต่างกัน	34
รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบการคงค้างที่กระแสต่างกัน	35
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการคงค้างเมื่อหัวเขียนมีขนาดต่างกัน	35
รูปที่ 2.28 ภาพโครงสร้างโดเมนเมื่อจ่ายกระแส 10 mA	36
รูปที่ 2.29 ภาพโครงสร้างโดเมนเมื่อจ่ายกระแส 17 mA	37
รูปที่ 3.1 ลักษณะ โครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	39
รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้าน ABS.....	39
รูปที่ 3.3 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก	40
รูปที่ 3.4 กราฟการเปลี่ยนแปลงของคาน	41
รูปที่ 3.5 ลักษณะการสแกนของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	41
รูปที่ 3.6 การสร้างรูปภาพสนามแม่เหล็ก.....	43
รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมในการสร้างภาพแม่เหล็ก	44
รูปที่ 3.8 รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเทียบกับภาพของหัวเขียน	45
รูปที่ 3.9 รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	46
รูปที่ 4.1 การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก	49
รูปที่ 4.2 การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางต่างกัน	49
รูปที่ 4.3 สนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก.....	50
รูปที่ 4.4 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันบนหัวเขียน	51

รูปที่ 4.5 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเทียน.....	52
รูปที่ 4.6 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสตรงทางลบ	53
รูปที่ 4.7 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสตรงทางบวก	54
รูปที่ 4.8 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสสลับ	55
รูปที่ 4.9 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กขณะจ่ายกระแสตรงและสลับ	57
รูปที่ 4.10 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กหลังการจ่ายกระแสตรงและสลับ.....	58
รูปที่ 4.11 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระแส 30 mA.....	59
รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างหัวเทียน.....	61
รูปที่ 4.13 ภาพแม่เหล็กคงค้างของหัวเทียนรูปแบบ A และ B	61
รูปที่ 4.14 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเมื่อมีการจ่ายกระแส 30 mA.....	63
รูปที่ 4.15 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันหลังหยุดจ่ายกระแส 30 mA.....	63
รูปที่ 4.16 ภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเทียนเมื่อใช้แก๊สสูตร A	65
รูปที่ 4.17 ภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเทียนเมื่อใช้แก๊สสูตร B	65
รูปที่ 4.18 ภาพแม่เหล็กคงค้างหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	67
รูปที่ 4.19 กราฟหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	68
รูปที่ 4.20 ภาพแม่เหล็กขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	69
รูปที่ 4.21 กราฟขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	69
รูปที่ 4.22 ภาพแม่เหล็กคงค้างหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	70
รูปที่ 4.23 กราฟหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าของหัวเทียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน	71

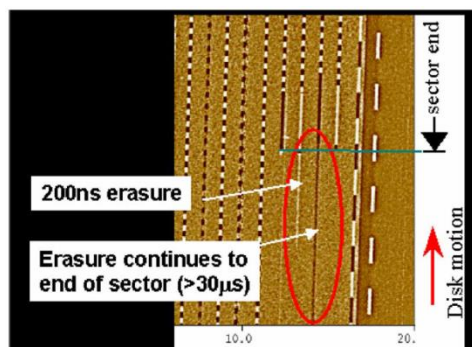
บทที่ 1

บทนำ

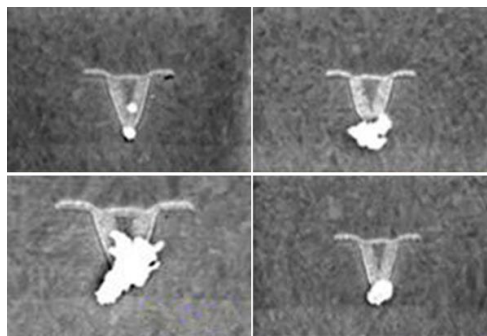
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของหัวเขียนแม่เหล็ก (magnetic write head) ในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD) มีลักษณะการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording, PMR) ซึ่งเกิดจากการพัฒนาให้ใช้พื้นที่ในการบันทึกข้อมูลบนแผ่นบันทึกน้อยลงเมื่อเทียบกับสมัยก่อน โดยทั่วไปของการสร้างหัวบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กนิยมใช้สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) เนื่องจากสารเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติการเป็นฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) กล่าวคือสามารถทำให้สารแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวได้ด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับใช้ในการเขียนและบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึก แต่อย่างไรก็ตามสารเฟอร์โรแมกเนติกยังมีคุณสมบัติธรรมชาติอีกอย่างหนึ่งคือ การคงค้างของสนามแม่เหล็กเมื่อหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่สารแม่เหล็ก ซึ่งคุณสมบัติการคงค้างดังกล่าวเป็นผลเสียที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรของหัวเขียนเช่นกัน

สนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กมีปัจจัยการกระตุ้นหลายสาเหตุด้วยกันเช่น (1) การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียนในระหว่างการทำงานหรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึก แต่การเขียนข้อมูลไม่ได้ทำอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้มีช่วงที่หยุดการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน และหากหัวเขียนดังกล่าวเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างขึ้นจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การลบหรือเขียนทับข้อมูลก่อนหน้าได้ (erase after write, EAW) [1] ดังรูปที่ 1.1 (ก) และสาเหตุที่ (2) ในกระบวนการผลิตหัวบันทึกแม่เหล็ก (magnetic recording head) จะมีขั้นตอนของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวอ่าน (read head) เพื่อทำการปรับสภาพความเป็นแม่เหล็กในชั้นฟรีของหัวอ่าน (free layer, FL) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่หัวเขียนได้เช่นเดียวกัน การคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของกระบวนการผลิตจะส่งผลให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็ก (contamination) และทำให้หัวเขียนดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้งานได้ดังรูปที่ 1.1 (ข)



(ก)

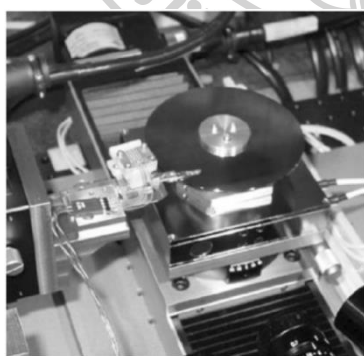


(ข)

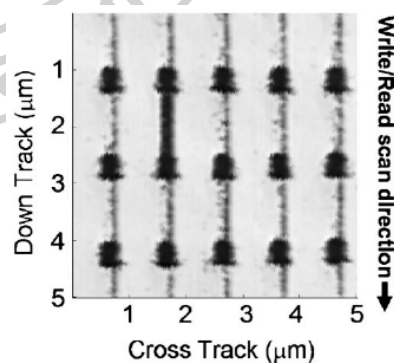
รูปที่ 1.1 ผลเสียของสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) การเขียนหรือลบข้อมูลก่อนหน้า และ (ข) การปนเปื้อนอนุภาคแม่เหล็ก

ที่มา : S. P. Mohammed and R. H. Victora, "Simulation of Erase After Write on 2.4 T FeCo Solid Pole Writer," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 5, pp. 1212-1219, 2010.

จากรูปที่ 1.1 สังเกตว่าผลของสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กถือเป็นปัญหาใหญ่สำหรับอุปกรณ์ HDD เป็นอย่างมาก นอกจากนี้หัวเขียนที่ถูกพัฒนาในปัจจุบันมีขนาดที่เล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นความท้าทายในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กเป็นอย่างมาก โดยในทางปฏิบัติการคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนสามารถศึกษาได้โดยการใช้เทคนิคการบันทึกด้วยการกวาดแบบสัมผัส (contact scanning recording) [2] แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถทำได้ในขั้นตอนนี้สุดท้ายก่อนประกอบเป็นอุปกรณ์ HDD



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 ภาพการตรวจวัดสนามแม่เหล็กคงค้างด้วยเทคนิค contact scanning recording และตัวอย่างการตรวจวัด

ที่มา : Z. Yuchen and Z. Jian-Gang, "Perpendicular write head remanence characterization using a contact scanning recording tester," APPLIED PHYSICS, 2005.

ในกระบวนการผลิตหัวบันทึกแม่เหล็กในอุตสาหกรรม HDD จะเริ่มตั้งแต่หัวบันทึกแม่เหล็กอยู่ในรูปแบบเวเฟอร์ (wafer) ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการตัดให้อยู่ในรูปแบบสไลด์บาร์ (slider bar) หลังจากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการขัดเปิดและกัดเซาะผิวหน้า เพื่อให้ได้รูปแบบตามการออกแบบของหัวเขียนหรือหัวอ่านในแต่ละรุ่นของ HDD สไลด์บาร์ที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมาแล้วจะถูกตัดออกเป็นชิ้น ๆ เรียกว่า สไลด์ (slider) [3] โดยภายในประกอบไปด้วยหัวเขียนและหัวอ่าน 1 หัว ซึ่งก่อนนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ HDD หัวเขียนจะถูกนำไปตรวจสอบสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการคล้ายกับงานวิจัยของ Z. Yuchen และ Z. Jian-Gang [2] โดยการทดสอบดังกล่าวสามารถทำได้ในรูปแบบของสไลด์เท่านั้น ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตหัวเขียน อีกทั้งยังส่งผลให้เสียเวลาและมูลค่าทางการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy, MFM) มาใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียน ซึ่งการตรวจสอบดังกล่าวสามารถทำได้ในรูปแบบของสไลด์บาร์ โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนที่เกิดอันเนื่องมาจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกและการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็ก
2. เพื่อศึกษาดำเนินการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยการกระตุ้น ได้แก่ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกและการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน
3. เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็กที่มีรูปทรงต่างกัน หัวเขียนที่ผ่านการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊ส (gas etching) ต่างกัน หรือเคลือบชั้นป้องกันต่างกัน ตามลำดับ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ปัญหาการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็กสามารถที่จะดึงดูคอนูภาคแม่เหล็กขนาดเล็กในระหว่างกระบวนการผลิต และในกระบวนการใช้งานจริงสนามแม่เหล็กคงค้างอาจรบกวนข้อมูลบนแผ่นบันทึกได้ คาดการณ์ได้ว่ามีสนามแม่เหล็กที่พุ่งออกจากหัวเขียนในแนวแกน Z (out-of-plane) โดยทั่วไปการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนวัสดุแม่เหล็กนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงคาดว่าสนามแม่เหล็กคงค้างดังกล่าวสามารถที่จะตรวจวัดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเช่นกัน

ปัจจัยการกระตุ้นหัวเขียนที่ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าจะมีผลต่อสนามแม่เหล็กคงค้าง ได้แก่ (1) ทิศทางการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในกระบวนการผลิต เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกส่งผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชัน (magnetization) ภายในหัวเขียน ซึ่งอาจทำให้เกิดการคงค้างที่ตำแหน่งแตกต่างกันได้ (2) การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดต่างกันให้แก่ขดลวดของหัวเขียน อาจส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่แตกต่างกัน โดยไฟฟ้ากระแสตรงอาจส่งผลกระทบต่อคงค้างที่มากกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงสามารถที่จะเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนให้มีทิศทางไปทางเดียวตลอดเวลา นอกจากนี้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นอาจส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่มากขึ้นได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กของบริษัท ฮิตาชิ ไฮ-เทค โนโลยี (hitachi high-technology) รุ่น BM3100 มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่มีรูปแบบชิลด์ล้อมรอบแบบปิด (fully wrapped around shield, FWAS) ซึ่งเป็นหัวเขียนที่ได้จากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด (Western Digital Co., Ltd.)

ในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็กจะทำการศึกษาเฉพาะด้านแอร์เบริงเซอร์เฟซ (air bearing surface, ABS) เท่านั้น โดยปัจจัยที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างในการศึกษานี้ ได้แก่ (1) การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กขนาด 1 Tesla ที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นแม่เหล็กของหัวอ่าน (2) การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 5 – 50 mA ให้แก่ขดลวดของหัวเขียน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการคงค้างของสนามแม่เหล็กเมื่อ (1) หัวเขียนมีช่องว่าง (gap) ระหว่างโพล (pole)

กับชิลด์ล้อมรอบ (shield) กว้างและแคบ ตามลำดับ (2) หัวเขียนที่ผ่านการปรับสภาพผิวหน้าด้วย แก๊สสูตร A (ที่ไม่มีส่วนผสมของซีนอน (Xe)) กับแก๊สสูตร B (ที่มีส่วนผสมของซีนอน) และ (3) หัวเขียนที่เคลือบชั้นป้องกันด้วยฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond like carbon, DLC) ที่ความหนา 2 3 และ 4 nm ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรง แม่เหล็กจะออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม แมทแลบ (matrix laboratory, MATLAB) สำหรับการสร้างรูปภาพแม่เหล็กและใช้ในการวิเคราะห์ ความแตกต่างเกิดขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถที่ใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งการเกิด สนามแม่เหล็กคงค้ำงบนหัวเขียนแม่เหล็ก เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่วิศวกรฝ่ายออกแบบหรือพัฒนา หัวเขียนแม่เหล็ก
2. กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถที่จะลดระยะเวลาในการตรวจสอบคุณภาพ ของหัวเขียนแม่เหล็กก่อนนำไปใช้งานจริงได้ เนื่องจากปัจจุบันการตรวจสอบสามารถทำได้ใน ขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต
3. งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษางานเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กั่วไหลที่ เป็นสาเหตุการเขียนข้อมูลหรือลบข้อมูลข้างเคียงได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันข้อมูลต่าง ๆ ได้ถูกเก็บอยู่ในรูปแบบดิจิทัล โดยการเก็บข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ HDD มีอยู่ในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง นอกจากนี้การเข้าถึงคอมพิวเตอร์ของมนุษย์ในปัจจุบันถือเป็นเรื่องง่ายและใกล้ตัว ส่งผลให้มีการพัฒนาเกี่ยวกับข้อมูลหรือ โปรแกรมการใช้งานให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น และสิ่งที่ตามมาจากการพัฒนาคือการใช้พื้นที่ในการบันทึกที่มากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ความจุมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องหรือกลุ่มนักวิจัยที่มีความสนใจได้พยายามศึกษาและพัฒนาให้ HDD มีความจุที่มากขึ้นหรือเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ โดยการพัฒนาที่สามารถทำได้มีหลายวิธีเช่น การพัฒนาแผ่นบันทึกให้มีการบันทึกข้อมูลที่ง่ายขึ้น การพัฒนาหัวเขียนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดการใช้พื้นที่ที่ใช้งาน แต่การพัฒนาสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ก็มีข้อจำกัดบางอย่างซึ่งทำให้เกิดปัญหาที่ตามมา เช่น แผ่นบันทึกข้อมูลไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) และอีกหนึ่งปัญหาที่ผู้วิจัยสนใจที่จะนำการศึกษา คือปัญหาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็ก

ดังนั้นในบทนี้ ผู้วิจัยจะกล่าวถึงความเป็นมาของสารแม่เหล็ก พลังงานแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทฤษฎีของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจสอบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติแม่เหล็ก

เมื่อประมาณ 2500 ปีก่อนนั้นยังไม่มีมนุษย์คนไหนที่รู้จักแม่เหล็กจนกระทั่ง ได้มีการค้นพบแร่ธาตุชนิดแรกที่เมืองแมกนีเซีย โดยแร่ธาตุดังกล่าวมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถดึงดูดโลหะชนิดอื่น ๆ ได้ และแร่ธาตุชนิดนี้ถูกเรียกว่าแมกนีไทต์ (magnetite, Fe_3O_4) ต่อมามนุษย์ก็พยายามคิดค้นการใช้ประโยชน์จากแม่เหล็กโดยการสังเคราะห์รูปร่างของแมกนีไทต์และได้นำไปลอยน้ำพบว่ามีการหมุนจนกระทั่งหยุดและชี้ไปในทิศเหนือได้เสมอ ดังนั้นมนุษย์จึงใช้คุณสมบัติดังกล่าวไปสร้างเป็นเข็มทิศบอกทิศทางที่ใช้ในการเดินเรือยุคโบราณ

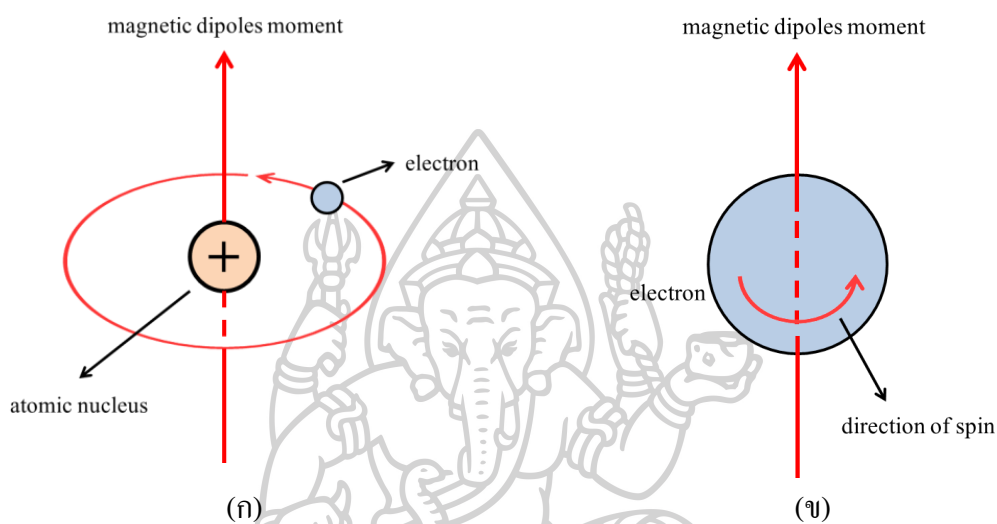
ในสมัยนั้นเรื่องราวของแม่เหล็กยังไม่มีการศึกษาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริงแต่มีการพัฒนาสำหรับการใช้งานเท่านั้น จนกระทั่งในปี 1600 วิลเลียม กิลเบิร์ต (William Gilbert) ได้ทำการเผยแพร่ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กด้วยการอธิบาย โดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์อย่างเป็นทางการครั้งแรก [4]

หลังจากที่ วิลเลียม กิลเบิร์ต ได้เผยแพร่ผลงานการศึกษานั้นก็ยังไม่มีการที่สามารถสร้างแม่เหล็กขึ้นมาเองได้จนกระทั่งในปี 1820 ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) ได้สังเกตเห็นว่า ในขณะที่เขาทำการเปิดสวิตช์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด เข็มทิศที่วางอยู่ใกล้ ๆ นั้นมีการหมุนทำแนวตั้งฉากกับขดลวดและเมื่อเขาทำการปิดสวิตช์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด เข็มทิศดังกล่าวจะหมุนชี้ไปในทิศเหนือได้เหมือนปกติ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าสามารถที่จะเหนี่ยวนำหรือสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาได้ นี่ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับแม่เหล็ก

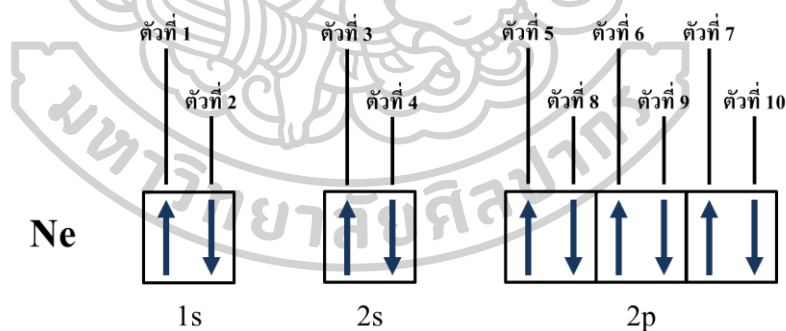
จากการศึกษาสารแม่เหล็กต่าง ๆ พบว่า ภายในอะตอมของสารแม่เหล็กจะประกอบไปด้วยนิวเคลียสและอิเล็กตรอน โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ 1. การที่อิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียส และ 2. การที่อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง (electron spin) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือแท่งแม่เหล็กเสมือนที่อิเล็กตรอนแต่ละตัว แต่อย่างไรก็ตามในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ ๆ แตกต่างกันทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางที่ต่างกัน ดังนั้นเมื่อทำการรวมผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงทำให้สนามแม่เหล็กลัพธ์นั้นเป็นศูนย์ และเมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพื่อกระตุ้นหรือเหนี่ยวนำแท่งแม่เหล็กเสมือนให้มีการชี้ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้สารแม่เหล็กดังกล่าวสามารถแสดงอำนาจทางแม่เหล็กหรือที่เรียกกันว่าแม่เหล็กชั่วคราว (ต่อไปนี้จะขอเรียกแท่งแม่เหล็กเสมือนที่เกิดจากอิเล็กตรอนว่า ไดโพล โมเมนต์แม่เหล็ก)

แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีสารแม่เหล็กที่สามารถแสดงอำนาจทางแม่เหล็กได้ แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะต้องเรียงตัวตามออร์บิทัล (orbital) ตามทฤษฎีควอนตัม โดยอิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกกำหนดด้วยเลขควอนตัมทั้งหมด 4 อย่างคือ (1) เลขควอนตัมหลัก (principle quantum number, n) (2) เลขควอนตัม โมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number, l) (3) เลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number, m) และ (4) เลขควอนตัมสปิน (spin quantum number, s) และจากหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) กล่าวว่า ในหนึ่งออร์บิทัลสามารถมีอิเล็กตรอนได้ไม่เกินสองตัว โดยในหนึ่งออร์บิทัลจะต้องมีเลขควอนตัมทั้งสี่ตัวที่มีค่าต่างกัน

ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนสองตัวที่อยู่ในออร์บิทัลเดียวกันจะต้องมีสปินที่ตรงข้ามกัน โดยการเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากันนั้น จะเริ่มที่การบรรจุอิเล็กตรอนที่มีสปินชี้ขึ้น (up) ให้เต็มออร์บิทัลก่อนจากนั้นจึงเติมสปินที่มีทิศชี้ลง (down) ตามกฎของฮุนด์ (Hund's law) และจะต้องเติมอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่ระดับพลังงานต่ำก่อน หลังจากนั้นจึงค่อยเติมในระดับพลังงานที่สูงขึ้นไปตามหลักเอาฟเบา (Aufbau principle) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.2



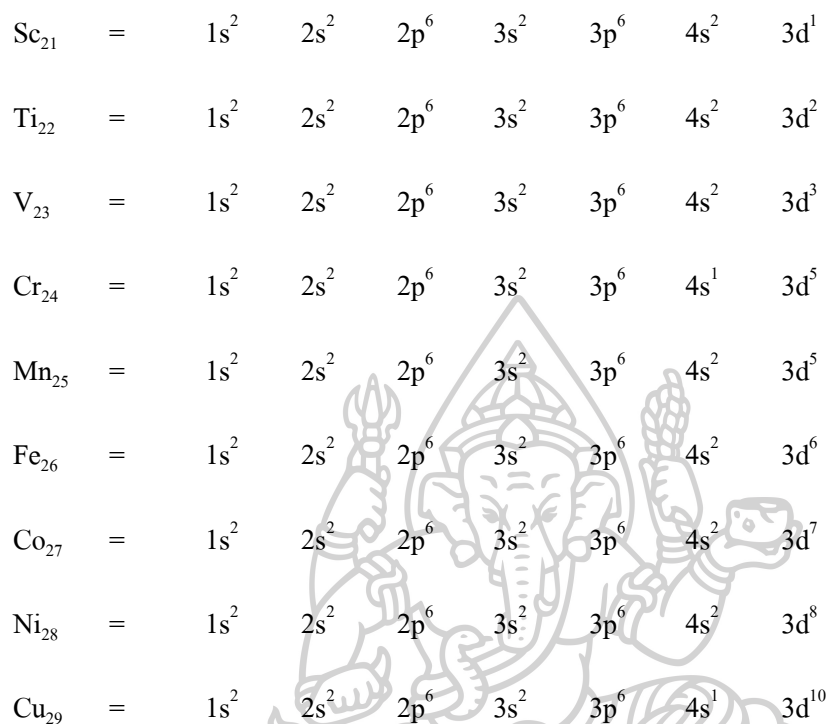
รูปที่ 2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ก) อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส และ (ข) อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัลของธาตุนีออน (Ne) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

จากตัวอย่างการจัดเรียงอิเล็กตรอนของธาตุนีออนพบว่า เป็นการบรรจุอิเล็กตรอนแบบเต็มออร์บิทัลซึ่งถือว่ามีความเสถียรมากที่สุดเนื่องจากไดโพล โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic dipoles moment) รวมเป็นศูนย์ และรองลงมาจะเป็นการบรรจุอิเล็กตรอนแบบครึ่ง ซึ่งมียอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเป็นคู่โดดเดี่ยว (unpaired electrons) แต่ก็ยังมีความเสถียรมากกว่าแบบอื่น ๆ โดยลักษณะแบบนี้สามารถที่จะแสดงความเป็นแม่เหล็กได้ เนื่องจากไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กรวมไม่เป็นศูนย์ แต่ไม่ใช่ทุกธาตุที่จะสามารถแสดงคุณสมบัติของแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์

ตัวอย่างเช่น สแกนเดียม (Sc) ไทเทเนียม (Ti) วาเนเดียม (V) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) โดยธาตุทั้ง 9 สามารถจัดเรียงอิเล็กตรอนได้ดังนี้



สังเกตว่าธาตุตัวอย่างดังกล่าวอยู่ในกลุ่ม โลหะแทรนซิชัน (transition metal) โดยออร์บิทัลชั้นนอกสุดคือ 4s จะถูกบรรจุอิเล็กตรอนแบบเต็มออร์บิทัล และออร์บิทัลชั้นในคือ 3d จะถูกบรรจุอิเล็กตรอนแบบไม่เต็มออร์บิทัล ยกเว้นธาตุ Cr และ Cu ที่มีอิเล็กตรอนในชั้น 4s เพียง 1 ตัว เนื่องจากต้องการให้อิเล็กตรอนในชั้น 3d บรรจุได้แบบครึ่งและเต็ม ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้มีความเสถียรมากกว่าการจัดเรียงอิเล็กตรอนให้เต็มในชั้น 4s นอกจากนี้การจัดเรียงอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันก็ส่งผลให้ธาตุต่าง ๆ แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ต่างกัน เช่นธาตุ Sc_{21} Ti_{22} V_{23} จะอยู่ในกลุ่มสารพาราแมกเนติก (paramagnetic) Cr_{24} Mn_{25} จะอยู่ในกลุ่มสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic) Fe_{26} Co_{27} Ni_{28} จะอยู่ในกลุ่มสารเฟอร์โรแมกเนติก และ Cu_{29} จะอยู่ในกลุ่มสารไดอะแมกเนติก (diamagnetic) ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงชนิดของสารแม่เหล็ก [5]

2.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก

สารแม่เหล็กแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้า นอกจากนี้ยังขึ้นกับพันธะที่เกิดขึ้นของสาร การจัดเรียงโครงสร้างของผลึก ระยะห่างระหว่างอะตอม และค่าสภาพยอมรับได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility, χ_m) เป็นต้น ในขณะที่แมกนีไทเซชัน (\vec{M}) หรือความเป็นแม่เหล็กของสารจะขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอก (\vec{H}) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.1

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.1)$$

เมื่อ \vec{M} และ \vec{H} มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) และ χ_m ไม่มีหน่วย จากสมการที่ 2.1 บ่งบอกได้ว่าค่าสภาพยอมรับได้ทางแม่เหล็กที่แตกต่างกันก็จะส่งผลให้มีความเป็นแม่เหล็กหรือคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ต่างกัน ในปัจจุบันสารแม่เหล็กถูกจำแนกออกเป็น 5 ชนิด ซึ่งแบ่งได้จากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่สารแม่เหล็ก

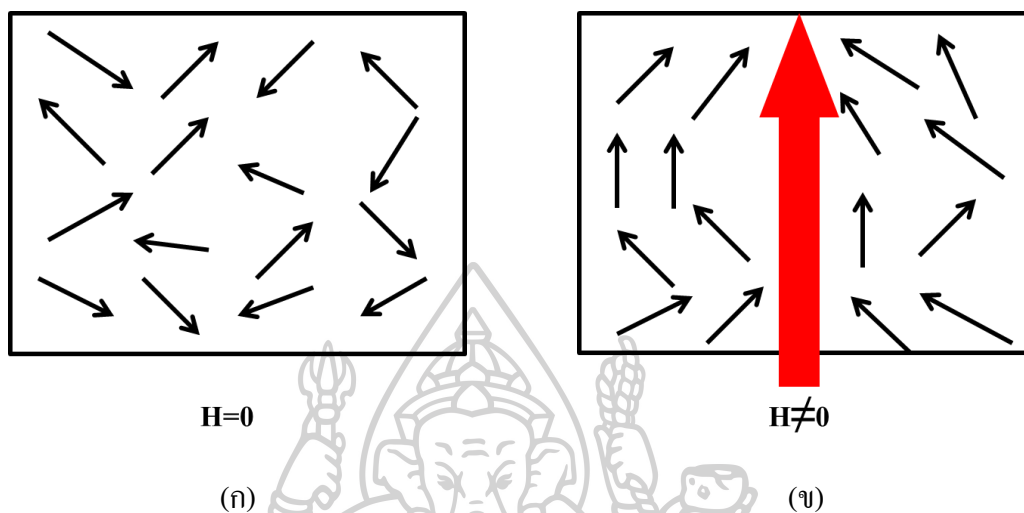
2.2.1 ไดอะแมกเนติก (diamagnetic)

สารไดอะแมกเนติกเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสสารเกือบทุกชนิด เนื่องจากเป็นสารที่มีความเป็นแม่เหล็กน้อยที่สุด และไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กหากไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อนำสารไดอะแมกเนติกไปวางในสนามแม่เหล็กจะพบว่า แมกนีไทเซชันของสารจะถูกเหนี่ยวนำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็ก นั่นเป็นเพราะว่าค่าสภาพยอมรับได้ทางแม่เหล็กของสารไดอะแมกเนติกมีค่าเป็นลบ ($\chi_m \approx -10^{-5}$) หมายความว่าถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับหนึ่ง จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับ -10^{-5} ซึ่งถือว่ามี การเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ดังนั้นสารไดอะแมกเนติกจึงไม่มีการอิมตัวของสารแม่เหล็ก

2.2.2 พาราแมกเนติก (paramagnetic)

สารพาราแมกเนติกมีคุณสมบัติที่คล้ายกันกับสารไดอะแมกเนติก คือไม่สามารถแสดงความเป็นแม่เหล็กได้เมื่อไม่ได้รับการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอก กล่าวคือไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของสารพาราแมกเนติกจะเรียงตัวกันแบบสุ่ม ส่งผลให้แมกนีไทเซชันสุทธิของสารเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามหากนำสารพาราแมกเนติกไปวางในสนามแม่เหล็กจะพบว่า ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของสารจะถูกเหนี่ยวนำให้มีทิศทางไปทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นั่นเป็นเพราะว่าค่าสภาพยอมรับได้ทางแม่เหล็กของสารพาราแมกเนติกมีค่าเป็นบวก ($\chi_m \approx 10^{-5}$) หมายความว่าถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับหนึ่ง จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันมีค่าเท่ากับ 10^{-5} ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ดังนั้นสารพาราแมกเนติกจึงไม่มีการอิมตัวของ

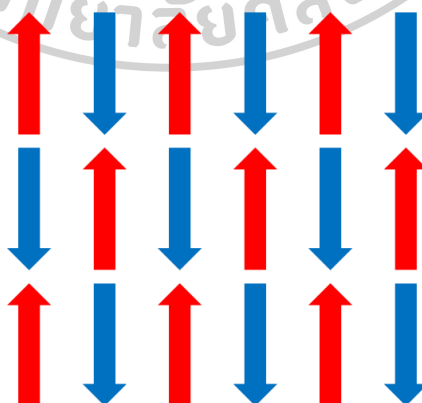
สารแม่เหล็ก นอกจากนี้สารพาราแมกเนติกยังขึ้นกับอุณหภูมิของสารกล่าวคือถ้าสารพาราแมกเนติกมีอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันและค่าสภาพยอมรับได้ทางแม่เหล็กลดลงตามกฎของคูรี (Curie's law) ซึ่งส่งผลให้สูญเสียสภาพการเป็นแม่เหล็ก



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของสารพาราแมกเนติก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กนอก

2.2.3 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic)

สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารที่ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็ก เนื่องจากเป็นสารแม่เหล็กที่เกิดจากแรงระหว่างอะตอมข้างเคียง โดยการจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะอยู่ในทิศทางขนานแบบตรงข้ามกัน ซึ่งส่งผลให้ผลรวมของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กเป็นศูนย์ (แมกนีไทเซชันสุทธิของสารเป็นศูนย์) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

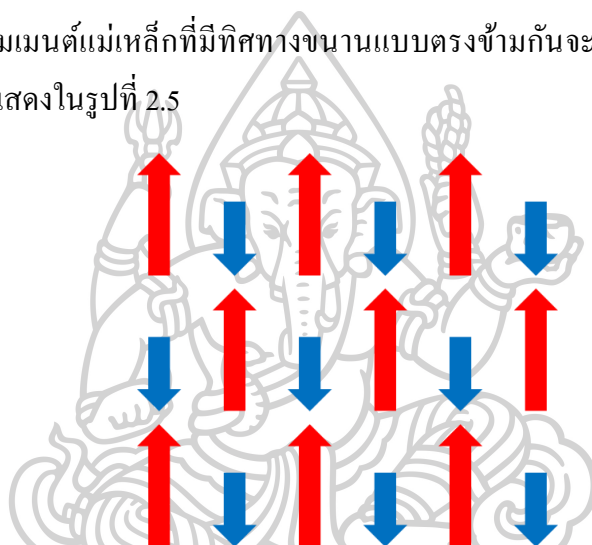


รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

เมื่อนำสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กภายนอกจะพบว่า ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นมีความมากขึ้น ในขณะที่ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศตรงข้ามนั้นลดลง ซึ่งทำให้ค่าแมกนีไทเซชันสุทธิไม่เป็นศูนย์

2.2.4 เฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic)

สารเฟอร์ริแมกเนติกเป็นสารที่มีความคล้ายคลึงกับสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากการเรียงตัวของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กในลักษณะเดียวกัน เพียงแต่สารเฟอร์ริแมกเนติก จะสามารถแสดงความเป็นแม่เหล็กได้ แม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระตุ้น ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่า ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศทางขานแบบตรงข้ามกันจะต้องมีตัวหนึ่งที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

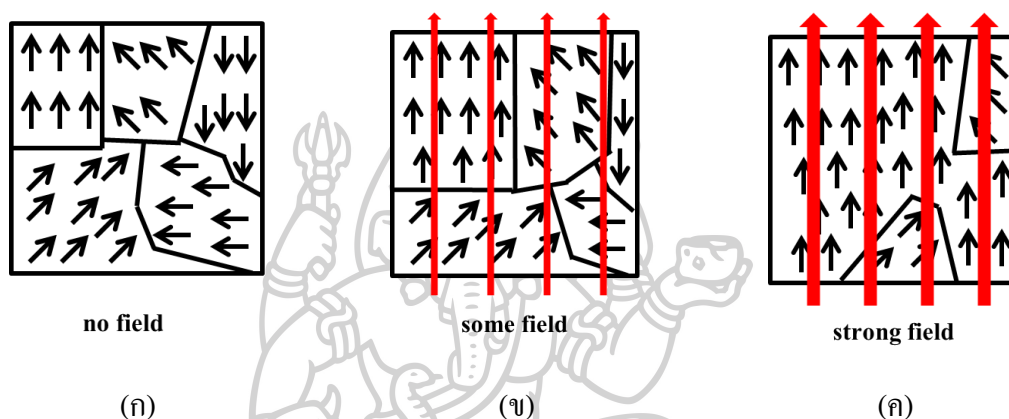


รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กของสารเฟอร์ริแมกเนติก

2.2.5 เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)

สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารที่มีความแตกต่างกับสารแม่เหล็กสองชนิดแรกเป็นอย่างมาก เนื่องจากสารแม่เหล็กสองชนิดแรกนั้นจะไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก แต่สารเฟอร์โรแมกเนติกสามารถรักษาความเป็นแม่เหล็กไว้ได้แม้จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแล้วก็ตาม ดังนั้นสารเฟอร์โรแมกเนติกจึงเป็นสารที่สามารถแสดงความเป็นแม่เหล็กได้มากที่สุด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันของสารเฟอร์โรแมกเนติกมีลักษณะเป็นกลุ่มย่อย ๆ ที่เรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain) ในแต่ละโดเมนจะมีทิศทางของไดโพลโมเมนต์ที่ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน และรอยต่อระหว่างโดเมน (เส้นสีดำ) จะเรียกว่าผนังโดเมน (domain wall) แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยในสภาวะปกติของสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันแบบสุ่มทำให้ผลรวมของแมกนีไทเซชันหรือพลังงานรวมแม่เหล็กเป็นศูนย์ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก (\vec{H}) มากกระทำจะส่งผลให้แมกนีไทเซชัน (\vec{M})

ของแต่ละโดเมนค้อย ๆ เปลี่ยนทิศตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนเข้าไป หากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่สารแม่เหล็กมีค่าที่มากพอจะสามารถทำให้สารแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว (saturation magnetization, \vec{M}_s) เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่สารแม่เหล็กออก แมกนีไทเซชันจะค้อย ๆ เปลี่ยนทิศทาง ซึ่งทำให้พลังงานรวมแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีแมกนีไทเซชันบางส่วนที่ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ทำให้พลังงานรวมไม่เป็นศูนย์ ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่าการคงค้าง (remanence magnetization, \vec{M}_r) ดังนั้นสารเฟอร์โรแมกเนติกจึงคงความเป็นแม่เหล็กอยู่ได้

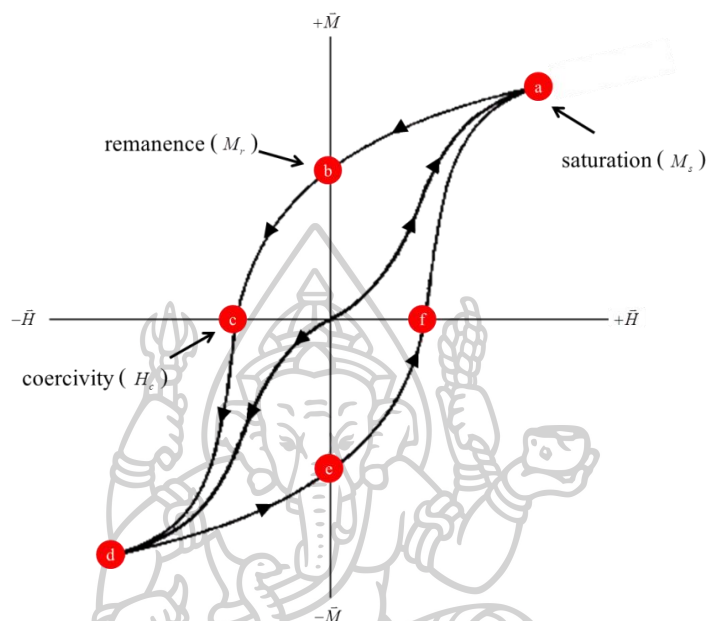


รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันของสารเฟอร์โรแมกเนติก (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มต่ำ และ (ค) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสูง

2.3 ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop)

ฮิสเทอรีซิสลูปเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอก (\vec{H}) กับแมกนีไทเซชัน (\vec{M}) หรือที่เรียกกันในอีกชื่อหนึ่งว่า H and M loop ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 กราฟฮิสเทอรีซิสลูปเป็นกราฟที่เกิดขึ้นกับสารเฟอร์โรแมกเนติกและสารแม่เหล็กเฟอร์ริแมกเนติกเท่านั้น เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกกลับไปกลับมาแก่สารแม่เหล็กก็จะพบการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันและสามารถนำมาพล็อตกราฟฮิสเทอรีซิสลูปได้นับไม่ถ้วน ซึ่งขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่สารแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.7 เป็นฮิสเทอรีซิสลูปที่วงใหญ่ที่สุดเนื่องจากการอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก (M_s) และหากป้อนสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมากขึ้นก็ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันอีก ในขณะที่จุดตัดแกน Y สังเกตว่าไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิดหมายความว่าแมกนีไทเซชันที่ไม่กลับไปอยู่ในทิศเดิม ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กคงค้าง (M_r) สุดท้ายจุดตัดแกน X เป็นจุดที่สนามแม่เหล็กภายนอกสามารถทำให้แมกนีไทเซชันกลับมาอยู่ในลักษณะเริ่มต้นได้ โดยเรียกจุดนี้ว่าค่าโคเออร์ซิวิตี (coercivity, H_c)

ซึ่งสามารถใช้แยกความเป็นแม่เหล็กได้ 2 อย่างคือแม่เหล็กอย่างแข็ง (hard magnetic) ที่มีความกว้างของลูปมากหรือค่าของโคเออร์ซิวิตีมาก และแม่เหล็กอย่างอ่อน (soft magnetic) ที่มีความกว้างของลูปแคบหรือค่าของโคเออร์ซิวิตีน้อย

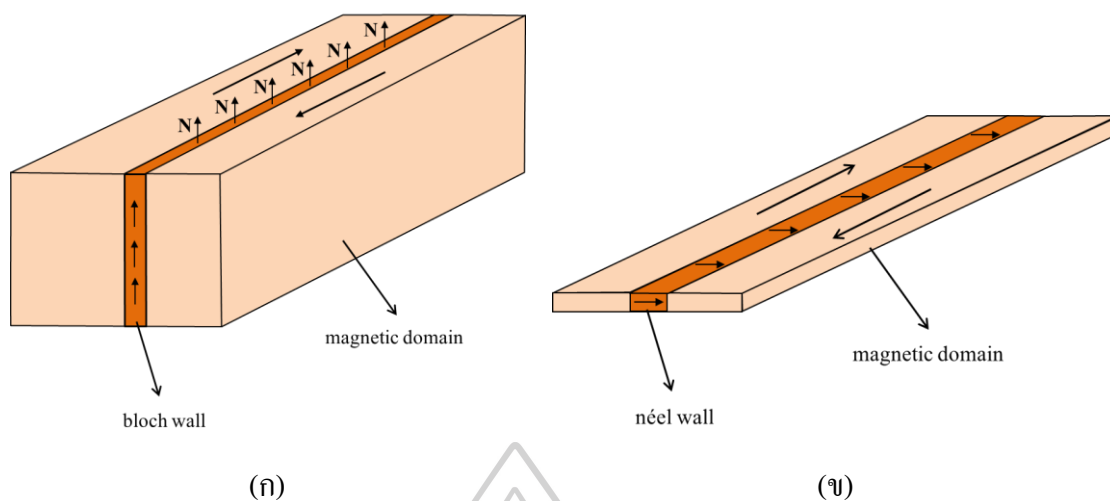


รูปที่ 2.7 กราฟฮิสเทอรีซิสลูป เมื่อกำหนดให้แกน X คือสนามแม่เหล็กภายนอก แกน Y คือแมกนีไทเซชัน M_s คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว M_r คือแมกนีไทเซชันคงค้างหรือรีมานนซ์ และ H_c คือค่าโคเออร์ซิวิตี

2.4 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมน (magnetic domains and magnetic domains wall)

โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นกับสารเฟอร์โรแมกเนติกและสารเฟอร์ริแมกเนติก โดยลักษณะของโดเมนและผนังโดเมนจะแตกต่างกันขึ้นกับรูปร่างของสารแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สังเกตว่ารูปร่างของสารแม่เหล็กที่เป็นปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) จะมีทิศทางของแมกนีไทเซชันบางส่วนที่ตั้งฉากกับพื้นผิวหรือพุ่งออกจากพื้นผิวนอกจากนี้ไดโพลโมเมนต์ที่อยู่ในบริเวณผนังโดเมนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบหมุนรอบแกน ซึ่งถูกเรียกว่าผนังโดเมนแบบบลอช (bloch wall)

ต่อมาหารูปร่างของสารแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นบางคล้ายฟิล์ม ดังรูปที่ 2.8 (ข) จะมีทิศทางของแมกนีไทเซชันอยู่ในแนวระนาบของพื้นผิว (in-plane) และการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ที่อยู่ในบริเวณผนังโดเมนจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบในระนาบของสารแม่เหล็ก ซึ่งถูกเรียกว่าผนังโดเมนแบบนีล (néel wall)



รูปที่ 2.8 ลักษณะโดเมนแม่เหล็ก (ก) ผนังโดเมนแบบบลอช และ (ข) ผนังโดเมนแบบนีล
ที่มา : B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials. Wiley, 2011.

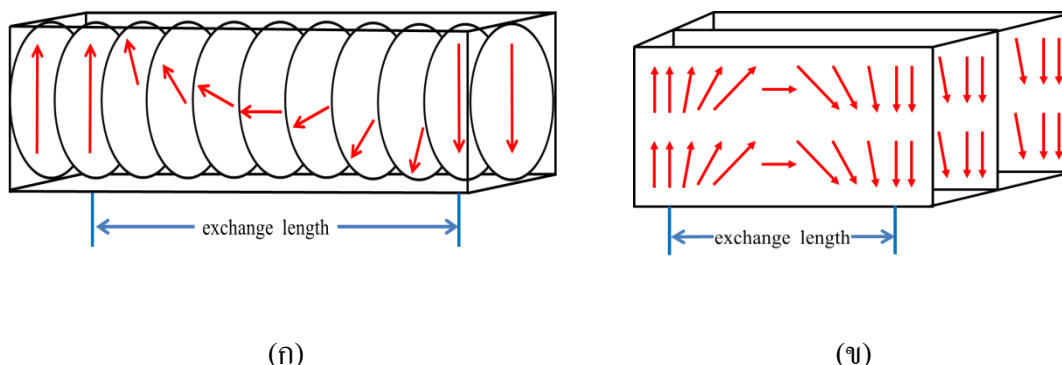
นอกจากนี้การวางตัวหรือการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กที่ทำให้เกิดโดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนสามารถอธิบายได้ด้วยพลังงานรวมของระบบ (total energy, E_{tot}) ดังสมการที่ 2.2

$$E_{tot} = E_{ex} + E_{ani} + E_{demag} + E_{zee} \quad (2.2)$$

พลังงานรวมของระบบแม่เหล็กประกอบไปด้วยพลังงานอิสระ 4 ชนิด ได้แก่ พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy, E_{ex}) พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy, E_{ani}) พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy, E_{demag}) และ พลังงานซีแมน (zeeman energy, E_{zee}) ตามลำดับ โดยพลังงานทั้ง 4 ชนิด จะช่วยในการจัดเรียงแมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กให้มีพลังงานรวมที่น้อยที่สุด

2.4.1 พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy, E_{ex})

พลังงานเอ็กซ์เชนจ์เป็นอันตรกิริยาทางควอนตัมระยะสั้นที่เกิดขึ้นในระดับอะตอม โดยอันตรกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นระหว่างไดโพลโมเมนต์ข้างเคียง วิธีการรักษาระดับพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ให้ต่ำ ไดโพลโมเมนต์ในสารแม่เหล็กจะพยายามจัดเรียงตัวให้มีทิศทางขนานไปในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่รอยต่อระหว่างโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ในลักษณะหมุนรอบแกนง่ายของผลึก (easy axis) ระยะการเปลี่ยนแปลงในผนังโดเมนจะเรียกว่า ความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (exchange length) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์ใน (ก) ผนังโดเมนแบบบลอช และ (ข) ผนังโดเมนแบบน็ล

ที่มา : A. Hubert and R. Schäfer, **Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures**. Springer Berlin Heidelberg New York, 2009.

พลังงานเอ็กซ์เชนจ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$E_{ex} = \int_V \frac{A}{M_s^2} (\nabla \vec{M})^2 dV \quad (2.3)$$

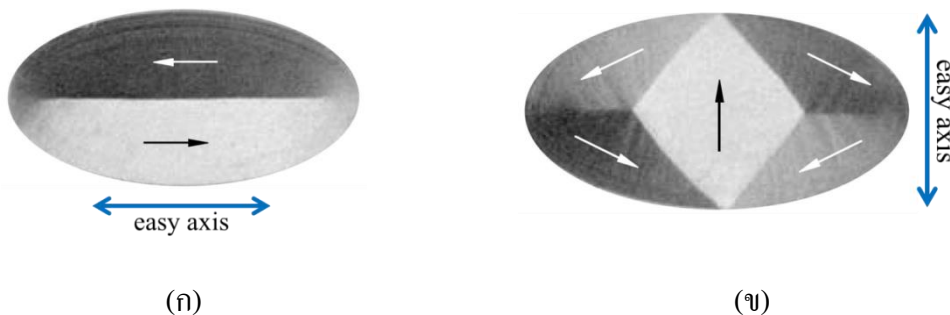
เมื่อกำหนดให้ A คือ ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ มีหน่วยเป็นจูลต่อเมตร (J/m) \vec{M} คือ แมกนีไทเซชัน และ dV คือ ปริมาตรของสารแม่เหล็ก

2.4.2 พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy, E_{ani})

พลังงานแอนไอโซโทรปีเป็นพลังงานที่ขึ้นกับรูปร่างและโครงสร้างผลึกของสารแม่เหล็ก โดยทั่วไปการรักษาพลังงานของระบบให้ต่ำ แมกนีไทเซชันของสารจะพยายามจัดเรียงตัวในแนวแกนง่ายของผลึก หากแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในแนวแกนยากของผลึก (hard axis) จะส่งผลให้มีพลังงานที่สูง การคำนวณพลังงานแอนไอโซโทรปีสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_{ani} = \int_V -\frac{k_u}{M_s^2} (\vec{M} \cdot \hat{u})^2 dV \quad (2.4)$$

เมื่อกำหนดให้ k_u คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี มีหน่วยเป็นจูลต่อลูกบาศก์เมตร (J/m^3) \hat{u} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่บอกทิศทางของง่ายของผลึก และ dV คือ ปริมาตรของสารแม่เหล็ก ตัวอย่างการวางตัวของแมกนีไทเซชันเมื่อกำหนดแกนง่ายของผลึก แสดงดังรูปที่ 2.10

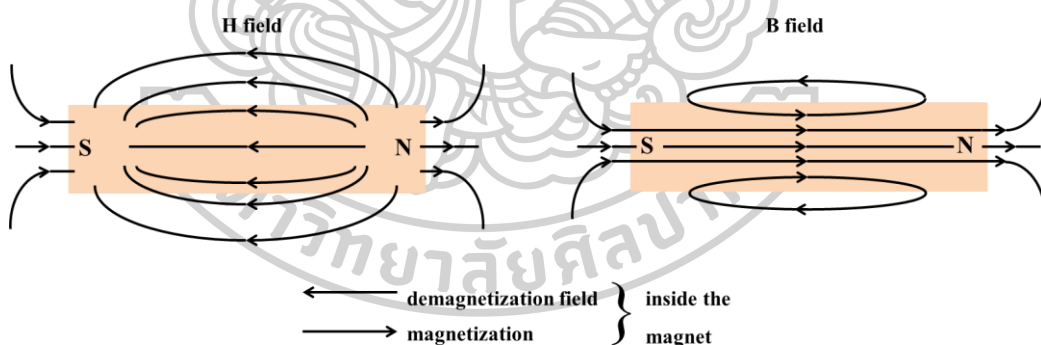


รูปที่ 2.10 การวางตัวของแมกนีไทเซชันเมื่อกำหนดแกนง่ายของผลึกในแนว (ก) แกน X และ (ข) แกน Y

ที่มา : A. Hubert and R. Schäfer, **Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures**. Springer Berlin Heidelberg New York, 2009.

2.4.3 พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy, E_{demag})

พลังงานดีแมกนีไทเซชันเป็นพลังงานที่เกิดจากการสร้างสนามแม่เหล็กภายในของวัสดุให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับแมกนีไทเซชัน เพื่อที่จะลดล้างความเป็นแม่เหล็กหรือลดพลังงานของระบบ ดังรูปที่ 2.11 เมื่อสนาม \vec{H} คือ สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากวัสดุ และสนาม \vec{B} คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ โดยมีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชัน



รูปที่ 2.11 เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

ที่มา : B. D. Cullity and C. D. Graham, **Introduction to Magnetic Materials**. Wiley, 2011.

พลังงานดีแมกนีไทเซชันสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.5

$$E_{demag} = -\frac{1}{2} \int_V (\vec{M} \cdot \vec{H}_{demag}) dV \tag{2.5}$$

เมื่อกำหนดให้ \vec{M} คือ แมกนีไทเซชัน \vec{H}_{demag} คือ สนามดีแมกนีไทเซชัน

สนามดีแมกนีไทเซชันจะขึ้นกับรูปร่างของสารแม่เหล็กดังนั้น \vec{H}_{demag} จึงเขียนได้ดังสมการที่ 2.6

$$\vec{H}_{demag}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int \nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' - \frac{1}{4\pi} \int \vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(\vec{r}') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.6)$$

เมื่อ dV' คือ ปริมาตรของสารแม่เหล็ก dS' คือ พื้นผิวของสารแม่เหล็ก \hat{n} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว (unit normal vector) \vec{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของไดโพลโมเมนต์ที่ได้รับสนามแม่เหล็กจากประจุไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง \vec{r}' ดังนั้นในทอมแรกของสมการจึงเป็นสนามดีแมกนีไทเซชันที่เกิดภายในปริมาตรของสารแม่เหล็ก และทอมที่สองของสมการจะเป็นสนามดีแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของสารแม่เหล็ก โดยในกรณีแมกนีไทเซชันมีค่าคงที่หรือไม่มีสนามภายนอกกระทำทอมแรกของสมการจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนสมการสนามดีแมกนีไทเซชันใหม่ได้ดังสมการที่ 2.7

$$\vec{H}_{demag}(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int \vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(\vec{r}') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.7)$$

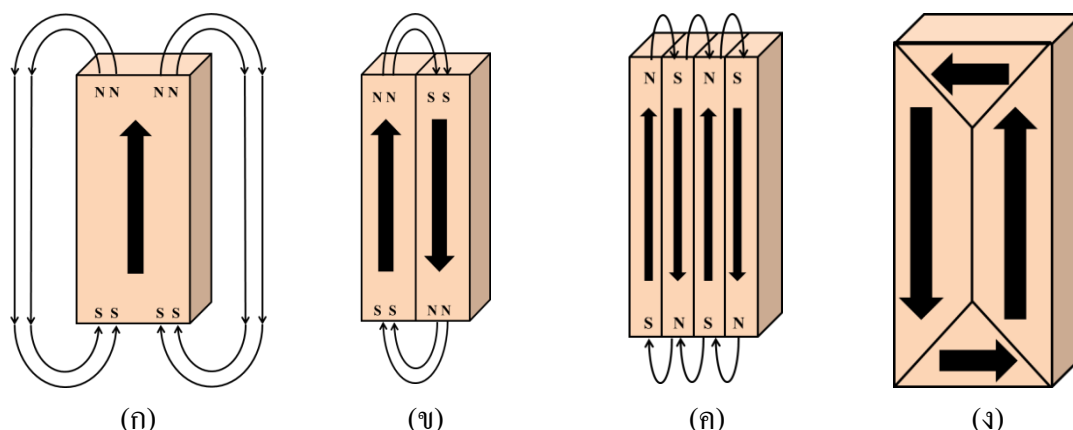
2.4.4 พลังงานซีแมน (zeeman energy, E_{zee})

พลังงานซีแมนเป็นพลังงานที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกดังสมการที่ 2.8

$$E_{zee} = -\int_V (\vec{M} \cdot \vec{H}_{app}) dV \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้ \vec{H}_{app} คือ สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่สารแม่เหล็ก และ dV คือ ปริมาตรของสารแม่เหล็ก โดยทั่วไปสารแม่เหล็กจะมีการเรียงตัวของแมกนีไทเซชันแบบสุ่ม แต่เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่สารแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันภายในจะถูกเหนี่ยวนำให้มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเป็นการรักษาระดับพลังงานของระบบให้มีค่าที่ต่ำ

โดยทั่วไปสารเฟอร์โรแมกเนติกจะพยายามลดพลังงานรวมของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นเมื่อพลังงานแต่ละส่วนทำหน้าที่ร่วมกัน จะส่งผลให้สารแม่เหล็กเกิดการสร้างโดเมนที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะการเพิ่มจะเป็นจำนวนเลขคู่จนกระทั่งอยู่ในรูปแบบของโดเมนแบบปิด (closure domain) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



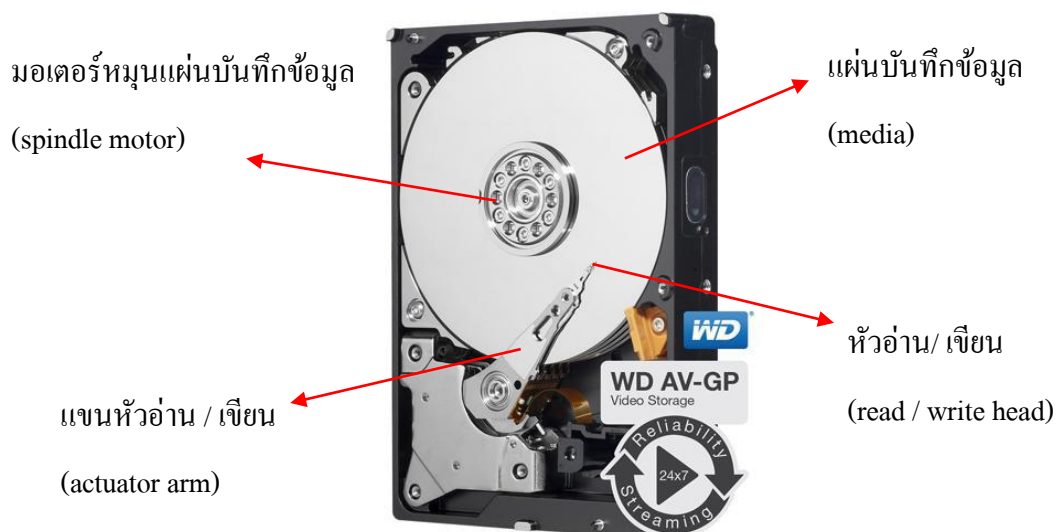
รูปที่ 2.12 การลดพลังงานรวมของสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยเพิ่มจำนวนโดเมนแม่เหล็กเป็น (ก) 1 โดเมน (ข) 2 โดเมน (ค) 4 โดเมน และ (ง) โดเมนแบบปิด

แก้ไขจาก : B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley, 2011.

จากรูปที่ 2.12 (ก) เป็น โครงสร้างของโดเมนที่มีเพียง 1 โดเมนซึ่งจะทำให้มีพลังงานรวมของระบบสูงหรือแสดงความเป็นแม่เหล็กได้ชัดเจน พลังงานแม่เหล็กจะลดลงเมื่อสารแม่เหล็กมีการเพิ่มจำนวนโดเมนเป็นจำนวนคู่ดังรูปที่ 2.12 (ข) และ (ค) และสุดท้าย เมื่อเป็นโดเมนแบบปิด ดังรูปที่ 2.12 (ง) จะส่งผลให้ไม่มีพลังงานในระบบ โดยลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็น โครงสร้างที่สามารถพบได้ทั่วไปของสารแม่เหล็กอย่างอ่อน (soft magnet)

2.5 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นแหล่งเก็บข้อมูลดิจิทัลและในปัจจุบันยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ความจุที่มากขึ้นในขณะที่ใช้พื้นที่เท่าเดิมหรือน้อยกว่าเดิม สังเกตว่าในสมัยก่อนนั้น HDD มีลักษณะที่ใหญ่และมีความจุน้อย ซึ่งแตกต่างกับปัจจุบันเป็นอย่างมากที่ HDD มีขนาดเล็กและมีความจุมากขึ้น อย่างไรก็ตาม HDD ก็ยังคงมีส่วนประกอบหลักซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ที่มา : Hard Disk Drive. Accessed June. 4, 2017. Available from

<https://www.newegg.com/Product/Product.aspx?Item=N82E16822136926>

2.5.1 แผ่นบันทึกข้อมูล (media)

แผ่นบันทึกข้อมูลมีลักษณะเป็นแผ่นกลมวางซ้อนกันเป็นชั้นขึ้นอยู่กับความจุ แผ่นบันทึกแต่ละแผ่นจะมีการเคลือบด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งใช้เป็นที่เก็บข้อมูล โดยข้อมูลดังกล่าวจะอยู่ในลักษณะของดิจิทัลคือ บิต “0” และบิต “1” หรือที่เรียกกันว่า ข้อมูล ไบนารี (binary data)

2.5.2 มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกข้อมูล (spindle motor)

มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกข้อมูลทำหน้าที่ในการหมุนแผ่นบันทึกข้อมูลด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งเพื่อการเข้าถึงข้อมูลของหัวอ่าน กล่าวคือ ยิ่งมอเตอร์มีความเร็วที่มากก็จะส่งผลให้มีการเข้าถึงข้อมูลที่รวดเร็ว โดยความเร็วของมอเตอร์นั้นจะวัดเป็นรอบต่อนาที (revolution per minute, RPM) ตัวอย่าง เช่น HDD รุ่นเก่าจะมีความเร็วอยู่ที่ 3,600 RPM ต่อมาจึงมีการพัฒนาจนมีความเร็วอยู่ที่ 7,200 RPM และในปัจจุบันมีการพัฒนาจนกระทั่งมีความเร็วถึง 10,000 RPM

2.5.3 แขนหัวเขียน / อ่าน (actuator Arm)

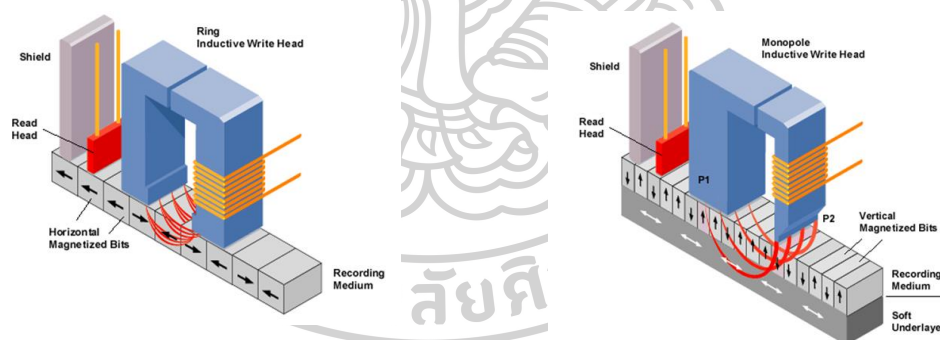
เนื่องจากข้อมูลที่ต้องการอ่านหรือเขียนจะอยู่บนพื้นที่ต่าง ๆ บนแผ่นบันทึก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการอ่าน / เขียน ซึ่งทำหน้าที่กวาดไปบนแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อการเขียน / อ่านข้อมูลที่รวดเร็ว โดยในส่วนของอุปกรณ์นี้จะทำงานสอดคล้องไปกับมอเตอร์หมุนแผ่นบันทึก

2.5.4 หัวอ่าน / เขียน (read / write head)

หัวอ่าน / เขียน ทำหน้าที่ในการอ่าน / เขียน ข้อมูลที่อยู่บนแผ่นบันทึก ภายในของหัวอ่านจะมีขดลวด ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกเป็นแรงดันไฟฟ้า และนำไปประมวลผลออกมาในรูปแบบตัวอักษร หรือรูปภาพตามข้อมูลที่อ่านได้ และภายในของหัวเขียนจะมีขดลวด ซึ่งทำหน้าที่ในการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่หัวเขียน ในขณะที่เขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึก

2.6 เทคโนโลยีหัวเขียน

ในสมัยก่อนนั้น การเขียนข้อมูลจะเป็นแบบแนวอน (longitudinal magnetic recording, LMR) กล่าวคือ สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียนนั้นจะอยู่ในแนวอนกับแผ่นบันทึก ทิศของข้อมูลจะมีทิศชี้ไปทางซ้ายและขวา ซึ่งใช้กำหนดเป็นข้อมูลดิจิทัลบิต “0” และบิต “1” สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 (ก) แต่อย่างไรก็ตามการเขียนแบบแนวอนจำเป็นต้องใช้พื้นที่บนแผ่นบันทึกมากจึงไม่เป็นที่นิยม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาหัวเขียนให้เป็นแบบแนวตั้ง (PMR) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 (ข) เพื่อลดการใช้พื้นที่ในแต่ละข้อมูล ทำให้ได้ความจุที่มากขึ้น โดยใช้แผ่นบันทึกเท่าเดิม



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.14 หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (ก) แบบแนวอน และ (ข) แบบแนวตั้ง

ที่มา : Computer Desktop Encyclopedia. (1981). Accessed June. 4, 2017. Available from

<http://www.yourdictionary.com/perpendicular-recording#JEDotBlvOmRtjIT3.99>

ในปัจจุบันมีการพัฒนาหัวเขียน PMR ให้มีขนาดที่เล็กลง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบพลังงานที่ออกมาจากหัวเขียน โดยการตรวจสอบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น (1) การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (2) การใช้ฮอลล์เซนเซอร์ (hall sensor) ในการตรวจสอบ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจสอบนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของเซนเซอร์ ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความละเอียดที่ต่ำ [7] (3) การใช้วิธีการที่ได้มาตรฐานในอุตสาหกรรมคือ เทคนิคสปินสแตนดาร์ด (spin stand technique) โดยมีวิธีการตรวจสอบดังนี้คือนำหัวเขียนไปติดที่แขนหัวอ่าน / เขียน และนำไปเขียนบนแผ่นบันทึกข้อมูล ลักษณะจะเหมือนการจำลองการทำงานจริง แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ สามารถทำได้ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนประกอบชิ้นส่วนเป็น HDD นอกจากนี้หากหัวเขียนมีอนุภาคหรือสิ่งเจือปนจะส่งผลให้แผ่นบันทึกเกิดความเสียหายได้ และ (4) การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก โดยเฉพาะ ในปัจจุบันเริ่มมีการนำ MFM มาใช้งานในอุตสาหกรรม HDD เนื่องจากสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้รวดเร็วกว่าเทคนิคสปินสแตนดาร์ด นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำเที่ยงตรงที่ใกล้เคียงกันมาก

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การลบหรือเขียนทับข้อมูลเดิม (EAW) และสนามแม่เหล็กคงค้างดังกล่าวยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเจือปนของอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลเสียต่อแผ่นบันทึกได้โดยตรง

2.7 ความเป็นมาของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (scanning probe microscopes, SPM) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานทางด้านการวิเคราะห์พื้นผิวและคุณสมบัติของวัสดุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งในการวิเคราะห์สิ่งที่มีขนาดเล็ก ๆ นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้หัววัด (tip) ที่มีปลายเล็กและแหลมพิเศษระดับนาโนเมตร (ประมาณ 0.1 - 10 nm) เพื่อให้ได้ความละเอียดสูง

กล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนที่ถูกสร้างขึ้นมาเป็นชนิดแรกคือ กล้องจุลทรรศน์ส่องกราดแบบลอดผ่าน (scanning tunneling microscope, STM) ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี 1981 โดย Gerd Binnig and Heinrich Rohrer [8] หลักการทำงานของ STM จะอาศัยหลักการอุโมงค์ควอนตัมหรือกระบวนการลอดผ่านของอิเล็กตรอน ดังนั้นความต้องการของเครื่องมือชนิดนี้คือ วัสดุที่จะนำมาตรวจสอบต้องเป็นวัสดุตัวนำเท่านั้น เนื่องจากมีการป้อนกระแสไฟฟ้าในขณะที่ทำการตรวจสอบเพื่อให้เกิดการลอดผ่านของอิเล็กตรอน ต่อมาในปี 1986 จึงมีการสร้างกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถตรวจสอบได้ทุกพื้นผิวโดยใช้หลักการของแรงดึงดูด (attractive) และแรงผลัก (repulsive)

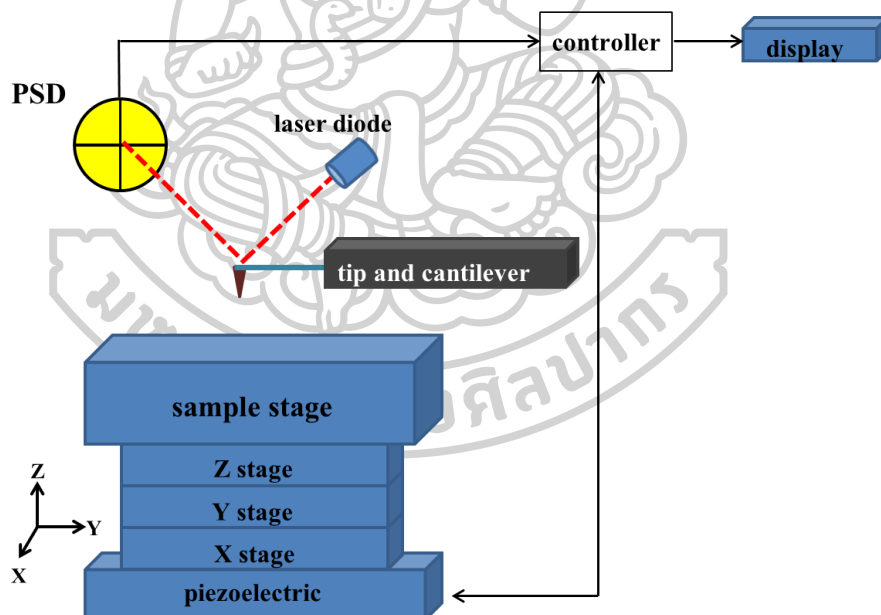
ระหว่างอะตอม หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) หลังจากนั้นไม่นานจึงมีการสร้างกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กขึ้นในปี 1987 โดย Y. Martin and H.K.Wickramasinghe [9] เพื่อใช้สำหรับการศึกษาหรือตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่ออกจากวัสดุ โดยอาศัยหลักการของแรงดูดและแรงผลักของสนามแม่เหล็กระหว่างวัสดุกับหัววัด

2.8 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy, MFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากวัสดุ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการศึกษาสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็ก โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก และรูปแบบการทำงาน

2.8.1 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะมีลักษณะเหมือนกันกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

2.8.1.1 ตัวสแกนเปียโซ (piezo-scanner หรือเรียกกันว่า piezoelectric)

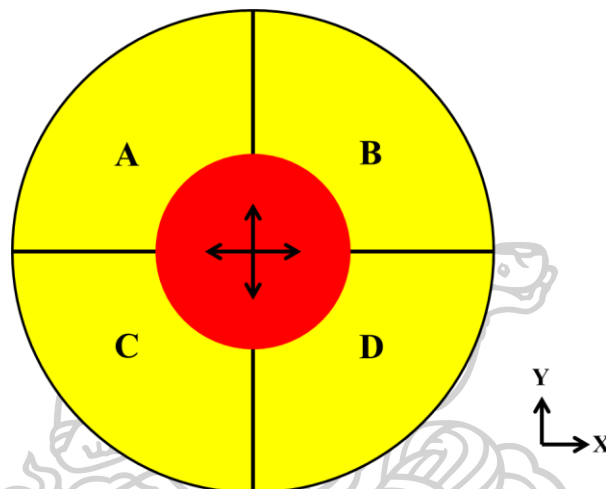
ตัวสแกนเปียโซเป็นส่วนที่ใช้ในการวางวัสดุตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการเลื่อนตำแหน่งหรือเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการตรวจวัดวัสดุ โดยการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์คอนโทรลเลอร์ (controller) ซึ่งควบคุมในทิศทาง X Y และ Z ตามลำดับ

2.8.1.2 เลเซอร์ไดโอด (laser diode)

เลเซอร์ไดโอดทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อใช้ในการส่องแสงไปยังคานเพื่อให้เกิดการสะท้อนไปยังโฟโตไดโอด (photodiode)

2.8.1.3 โฟโตไดโอด (photodiode sensitivity detector, PSD)

โฟโตไดโอดทำหน้าที่ในการวัดแสงที่ตกกระทบบนรูปที่ 2.16 และทำการส่งค่าที่ได้ไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลและแสดงผลออกมาในรูปแบบที่ต้องการ



รูปที่ 2.16 โฟโตไดโอด

วิธีการคำนวณค่าที่แสงตกกระทบนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

$X_{position}$ ซึ่งเกิดจากการบิดเอียงของคาน โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$X_{position} = \frac{(A+C) - (B+D)}{A+C+B+D} \quad (2.9)$$

และ $Y_{position}$ ซึ่งเกิดจากการตื้นขึ้นลงของคาน โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

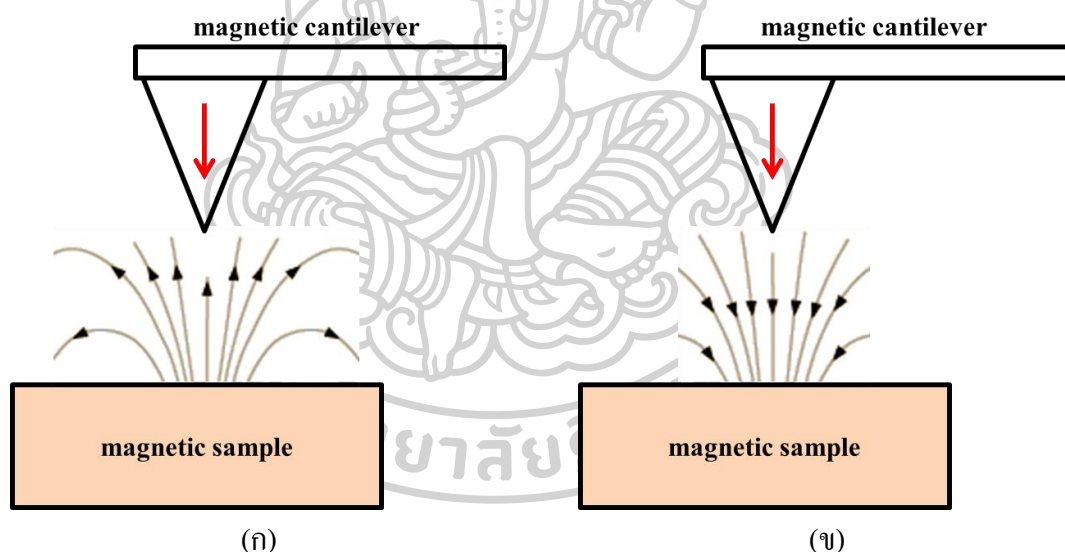
$$Y_{position} = \frac{(A+B) - (C+D)}{A+C+B+D} \quad (2.10)$$

โดยในงานวิจัยนี้ค่าที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปแบบของเฟส (phase) กล่าวคือ เมื่อไม่มีการตรวจสอบวัสดุให้ถือว่าเป็นเฟสเริ่มต้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ และในขณะที่มีการตรวจสอบวัสดุจะส่งผลให้เกิดเฟสใหม่ ค่าเฟสใหม่ที่ได้นี้จะถูกส่งไปยังคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณเป็นเฟสที่เปลี่ยนแปลง (phase difference) และรวมถึงการนำค่าเฟสที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมาประมวลผลซึ่งออกมาในลักษณะรูปภาพของสนามแม่เหล็กที่ออกจากวัสดุ

2.8.1.4 คานและหัววัด (cantilever and tip)

คานใช้ทำหน้าที่ในการติดตั้งหัววัดและยังทำหน้าที่เหมือนกับสปริง ดังนั้นคานจึงสามารถยืดหยุ่นได้ตามแรงที่กระทำต่อหัววัด กล่าวคือ มีการโค้งงอตามแรงที่มากระทำ หัววัดจะมีลักษณะปลายแหลมระดับนาโนเมตร เพื่อความละเอียดในการตรวจสอบ หัววัดที่ไม่มีการเคลือบสารแม่เหล็กจะถูกใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะใช้หัววัดที่มีการเคลือบสารแม่เหล็ก โดยสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบหัววัดมีสองประเภทด้วยกันคือ สารแม่เหล็กอย่างแข็ง (hard magnet) และสารแม่เหล็กอย่างอ่อน ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน

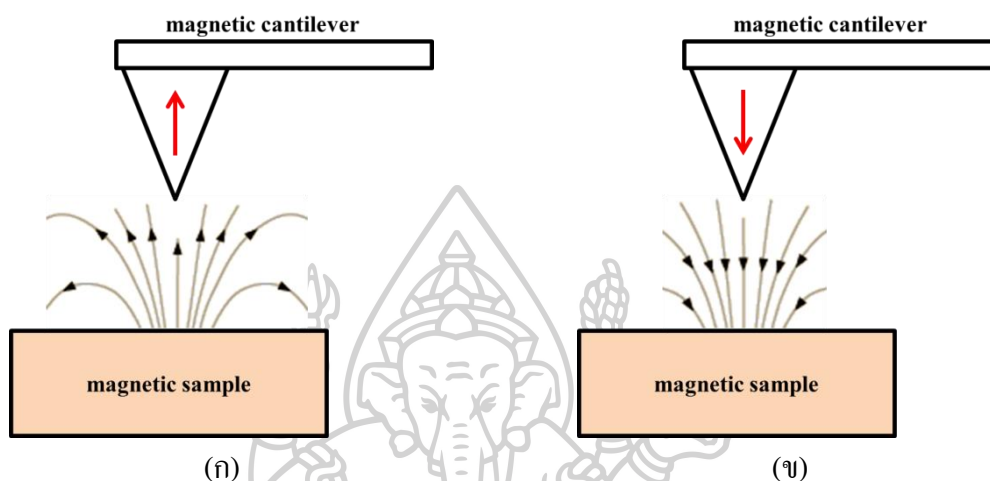
สารแม่เหล็กอย่างแข็งเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันยาก ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เคลือบหัววัดโดยกำหนดแมกนีไทเซชันให้มีทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ก็จะทำให้หัววัดนั้นมีทิศทางของแมกนีไทเซชันคงที่ตามที่กำหนดไว้ และเมื่อนำหัววัดดังกล่าวไปใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากชิ้นงานก็จะสามารถทราบได้ถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กของชิ้นงาน โดยที่แมกนีไทเซชันของหัววัดไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การตอบสนองของหัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กอย่างแข็ง โดยกำหนดทิศทางชี้ลง (ก) เมื่อทำการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งขึ้นออกจากพื้นผิวจะส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างหัววัดกับชิ้นงาน และ (ข) เมื่อทำการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งลงเข้าพื้นผิวจะส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหัววัดกับชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามการใช้สารแม่เหล็กอย่างแข็งก็ยังมีข้อเสีย ซึ่งเกิดจากความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัววัดนั้นอาจจะไปรบกวนสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากชิ้นงาน โดยส่งผลให้การตรวจสอบสนามแม่เหล็กมีการคาดเคลื่อน

สารแม่เหล็กอย่างอ่อนเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันได้ง่าย ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เคลือบหัววัดและนำไปใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กของชิ้นงานจะพบว่า แมกนีไทเซชันของหัววัดจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.18



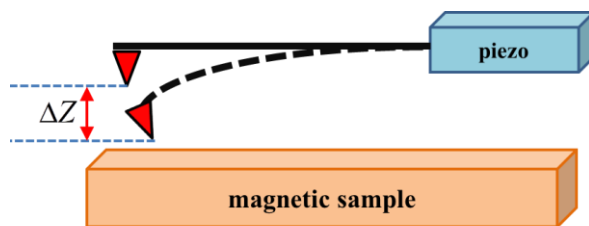
รูปที่ 2.18 การตอบสนองของหัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กอย่างอ่อน (ก) เมื่อทำการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งขึ้นออกจากพื้นผิวจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันของหัววัดเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันและเกิดแรงดึงดูดระหว่างหัววัดกับชิ้นงาน และ (ข) เมื่อทำการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งลงเข้าพื้นผิวจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันของหัววัดเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันและเกิดแรงดึงดูดระหว่างหัววัดกับชิ้นงาน

2.8.2 รูปแบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

รูปแบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถแบ่งได้สองประเภทคือ การวัดแบบโหมดคงที่ (static mode, DC) และ โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode, AC) โดยโหมดการทำงานทั้งสองนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.8.2.1 โหมดคงที่ (static mode, DC)

การวัดแบบโหมดคงที่จะเป็นโหมดการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก โดยการเลื่อนคานเข้าหาสนามแม่เหล็กของวัสดุ (ชิ้นงานตัวอย่าง) ด้วยตัวสแกนเปียโซ และไม่มีการกระตุ้นที่ทำให้คานสั่น เนื่องจากคานมีการประพฤติตัวเหมือนสปริง ดังนั้นเมื่อมีแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กมากระทำระหว่างหัววัดกับสนามแม่เหล็กของวัสดุในขณะที่ทำการตรวจสอบ จะส่งผลให้เกิดการโค้งงอของคาน ดังรูปที่ 2.19 โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฮุก (Hook's Law) ดังสมการที่ 2.11



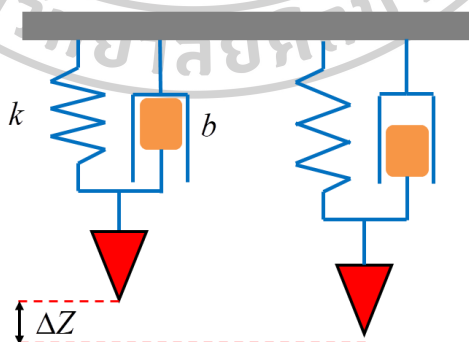
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของก่อดึงจลทรรศน์แรงแม่เหล็กใน โหมดคงที่

$$F = -k\Delta Z \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้ ΔZ คือ ระยะทางการเปลี่ยนแปลงของคาน (สปริง) และ k คือ ค่าคงที่ของสปริง (spring constant) โดยในที่นี้ค่าคงที่ของสปริงที่เหมาะสมกับการใช้งานควรมีค่าน้อยเพื่อให้คานมีการตอบสนองที่ดีหรือไวต่อสนามแม่เหล็ก เนื่องจากถ้าค่าคงที่สปริงมีค่าที่มากจะส่งผลให้คานนั้นมีความแข็งแกร่งจนอาจจะไม่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ แต่อย่างไรก็ตามการตรวจสอบวัสดุในโหมดนี้จะใช้เมื่อสนามแม่เหล็กของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หากสนามแม่เหล็กของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะใช้โหมดไดนามิกส์ในการตรวจสอบ

2.8.2.2 โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode, AC)

โหมดการวัดแบบไดนามิกส์เป็นโหมดการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะเหมือนกันกับการวัดแบบโหมดคงที่ เพียงแต่ในโหมดการวัดแบบไดนามิกส์จะมีการป้อนแรงกระตุ้นให้แก่คาน เพื่อให้คานมีการสั่นที่มีความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) หรือใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด ในขณะที่การตรวจสอบสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคานจะเปรียบเสมือนสปริงที่มีการติดมวลและมีการลดทอน (damped) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของก่อดึงจลทรรศน์แรงแม่เหล็กใน โหมดไดนามิกส์

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.20 สามารถอธิบายโดยการใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law of motion) ดังสมการที่ 2.12

$$\Sigma F = ma = m\ddot{Z} \quad (2.12)$$

จากที่กล่าวไปแล้วว่าในโหมดไดนามิกส์จะต้องป้อนแรงให้แก่คัน ซึ่งจะทำให้คันเกิดการสั่นในรูปแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ (simple harmonics) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบจะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\Sigma F = F_{drive}(t) - b\dot{Z}(t) - kZ(t) = m\ddot{Z} \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้ b คือ ค่าการลดทอน k คือ ค่าคงที่สปริง F_{drive} คือ แรงกระตุ้นที่ป้อนให้แก่คัน และ Z คือ ระยะการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคัน โดยแรงที่ป้อนให้แก่คันและระยะทางของคันที่ตำแหน่งใด ๆ สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

$$F_{drive}(t) = F_0 \cos(\omega t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

$$Z(t) = A_0 \cos(\omega t - \theta) = A_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (2.15)$$

เมื่อ F_0 คือ แอมพลิจูดของแรงที่ป้อนให้แก่คัน A_0 คือ แอมพลิจูด (amplitude) การสั่นของคัน จากนั้นนำสมการ 2.14 และ 2.15 แทนลงในสมการ 2.13 จะได้สมการที่ 2.16

$$F_0 e^{i\omega t} - b \frac{d(A_0 e^{i(\omega t - \phi)})}{dt} - k A_0 e^{i(\omega t - \phi)} = m \frac{d^2(A_0 e^{i(\omega t - \phi)})}{dt^2} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 จัดรูปสมการใหม่และทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาจะได้ดังสมการที่ 2.17 จากนั้นจึงหารด้วย m ตลอดและจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$F_0 e^{i\omega t} = -m\omega^2 A_0 e^{i(\omega t - \phi)} + ib\omega A_0 e^{i(\omega t - \phi)} + k A_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (2.17)$$

$$\frac{F_0 e^{i\omega t}}{m} = \left(-\omega^2 A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} + \frac{k A_0}{m} \right) e^{i\omega t} e^{-i\phi} \quad (2.18)$$

$$\frac{F_0 e^{i\phi}}{m} = \left(-\omega^2 A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} + \frac{k A_0}{m} \right) \quad (2.19)$$

เมื่อกำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์ของคันเป็น $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{F_0 e^{i\phi}}{m} = \left(-\omega^2 A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} + \omega_0^2 A_0 \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{F_0 e^{i\phi}}{m} = (\omega_0^2 - \omega^2) A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} \quad (2.21)$$

และจาก $e^{\pm i\phi} = \cos \phi \pm i \sin \phi$ จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{F_0 (\cos \phi + i \sin \phi)}{m} = (\omega_0^2 - \omega^2) A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 สามารถแบ่งออกได้สองส่วนคือ ส่วนที่เป็นจำนวนจริง (real part) และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ (imaginary part) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ

$$\frac{F_0 \cos \phi}{m} = (\omega_0^2 - \omega^2) A_0 \quad (2.23)$$

$$\frac{F_0 \sin \phi}{m} = \frac{b\omega A_0}{m} \quad (2.24)$$

การหาค่าแอมพลิจูดของคานสามารถทำได้โดยการยกกำลังสองของสมการที่ 2.23 และ 2.24 ซึ่งจะเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ

$$\left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \cos^2 \phi = [(\omega_0^2 - \omega^2) A_0]^2 \quad (2.25)$$

$$\left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \sin^2 \phi = \left(\frac{b\omega A_0}{m}\right)^2 \quad (2.26)$$

จากนั้นนำสมการที่ 2.25 บวกกับสมการที่ 2.26 แล้วทำการจัดรูปสมการใหม่จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.28

$$\left(\frac{F_0}{m}\right)^2 (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2 \right] A_0^2 \quad (2.27)$$

$$A_0 = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}} \quad (2.28)$$

เมื่อกำหนดให้แฟกเตอร์คุณภาพ (Q-factor) คือ $Q = \frac{\sqrt{mk}}{b}$ ดังนั้นจะเขียนสมการแอมพลิจูดของคานได้ใหม่ดังนี้

$$A_0 = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega_0 \omega}{Q}\right)^2}} \quad (2.29)$$

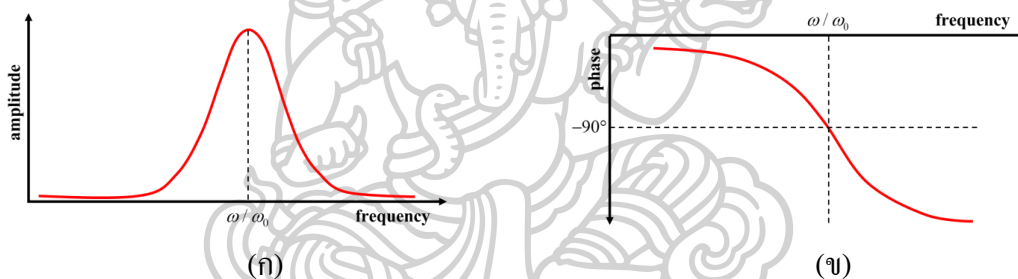
สำหรับการหาเฟสของคานสามารถทำได้โดยการนำสมการที่ 2.24 หารด้วยสมการ 2.23 จากนั้นจึงทำการจัดรูปใหม่ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.32

$$\frac{\left(\frac{F_0 \sin \phi}{m}\right)}{\left(\frac{F_0 \cos \phi}{m}\right)} = \frac{\left(\frac{b\omega A_0}{m}\right)}{(\omega_0^2 - \omega^2) A_0} \quad (2.30)$$

$$\tan \phi = -\frac{b\omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.31)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(-\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.29 และ 2.32 เมื่อกระตุ้นคานที่มีความถี่ใด ๆ จะเกิดแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างกัน แต่เมื่อกระตุ้นคานที่มีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ $\omega = \omega_0$ โดยไม่มีแรงภายนอกอื่นมากระทำต่อคาน จะส่งผลให้คานเกิดการสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุดและมีการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ที่ $\phi = -90^\circ$ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของคานเมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำ (ก) แอมพลิจูด และ (ข) เฟส

จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.20 หากมีแรงจากสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อหัววัด แรงทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสามารถอธิบายด้วยสมการการสั่นแบบมีการลดทอน (damped harmonic oscillator) นอกจากนี้คานยังสามารถใช้วัดเกรเดียนต์ของแรง (force gradient) ได้ดังสมการที่ 2.33

$$F_{drive}(t) + F_{ts}(Z(t)) = m\ddot{Z}(t) + b\dot{Z}(t) + k(Z(t)) \quad (2.33)$$

เมื่อ m คือ มวลของหัววัด b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน $Z(t)$ คือ ตำแหน่งของคานที่เวลา t ใด ๆ $F_{drive}(t) = F_0 e^{i\omega t}$ คือ แรงที่ให้แก่คาน และ $F_{ts}(Z(t))$ คือ แรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับวัสดุตัวอย่าง ซึ่งสามารถเขียนแรงที่เกิดขึ้นได้ดังสมการ

$$F_{ts} = \mu_0 \int \vec{\nabla} (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} \quad (2.34)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (permeability of vacuum) \vec{M}_{tip} คือ แมกนีไทเซชันของหัววัด \vec{H}_{sample} คือ สนามแม่เหล็กที่ออกจากวัสดุตัวอย่าง และ dV_{tip} คือ ปริมาตรหัววัด

โดยแรงดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตทั้งปริมาตรของหัววัด แต่อย่างไรก็ตามแรงที่เกิดขึ้นในการขมวดนั้นจะเกิดขึ้นแค่บริเวณเล็ก ๆ ของปลายคานหรือหัววัด ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดสัญญาณและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคานที่มีค่าน้อย ดังนั้นการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถที่จะใช้ การกระจายเทเลอร์ (Taylor expansion) ซึ่งจะเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.35

$$F_0 e^{i\omega t} + F_{ts}(Z=0) + \left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0} (Z) = m\ddot{Z} + b\dot{Z} + kZ \quad (2.35)$$

จากนั้นจึงทำการจัดรูปสมการที่ 2.35 โดยกำหนดให้ค่าคงที่ประสิทธิภาพสปริง (effective spring constant, k_{eff}) มีค่าดังนี้ $k_{eff} = k - \left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0}$ จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.37

$$F_0 e^{i\omega t} + F_{ts}(Z=0) = m\ddot{Z} + b\dot{Z} \left(k - \left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0} \right) (Z) \quad (2.36)$$

$$F_0 e^{i\omega t} + F_{ts}(Z=0) = m\ddot{Z} + b\dot{Z} + k_{eff} Z \quad (2.37)$$

จากการกำหนดให้ $k_{eff} = k - \left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0}$ ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ของคานสามารถที่จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.38

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} \quad (2.38)$$

โดยเทอมขวาของสมการที่ 2.38 สามารถที่จะใช้การกระจายเทเลอร์ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคานมีค่าน้อย โดยกำหนดให้ $\left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0} \ll k$ และความถี่ของคานที่เลื่อนคือ $\Delta\omega_0 = \omega'_0 - \omega_0$ กำหนดให้ ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของคาน ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ 2.39

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \approx -\frac{1}{2k} \left. \frac{dF_{ts}}{dz} \right|_{Z=0} \quad (2.39)$$

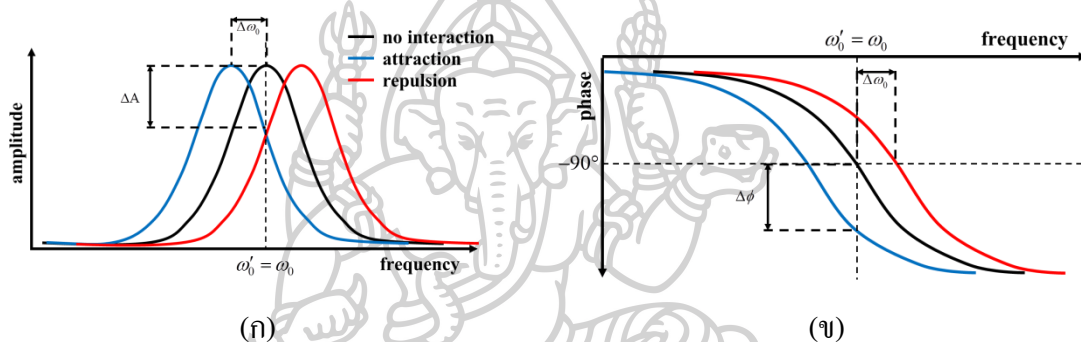
แต่อย่างไรก็ตามเกรเดียนต์ของแรงนอกจากจะวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ยังสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดเกรเดียนต์ของแรงที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดหรือเฟสของคาน โดยกำหนดแรงที่ป้อนให้แก่คานมีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ จากนั้นเมื่อทำการตรวจสอบวัสดุจะมีแรงมากระทำต่อหัววัด ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนต์ของแรงไปเล็กน้อย และยังส่งผลให้แอมพลิจูดกับเฟสของคานมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

โดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสของคาน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.40 และ 2.41 ตามลำดับ

$$\Delta A \approx \left(\frac{2A_0 Q}{3\sqrt{3}k} \right) \frac{dF_{ts}}{dz} \quad (2.40)$$

$$\Delta \phi \approx -\frac{Q}{k} \frac{dF_{ts}}{dz} \quad (2.41)$$

เมื่อ A_0 คือ แอมพลิจูดการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ของคาน Q คือ แฟกเตอร์คุณภาพของคาน โดยรูปที่ 2.22 ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟส เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อคานหรือหัววัด



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของคานเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ (ก) แอมพลิจูด และ (ข) เฟส

จากรูปที่ 2.22 สังเกตว่าเมื่อมีแรงดูดหรือแรงผลักกระทำต่อคานหรือหัววัด จะเกิดการเลื่อน (shift) ของเส้นกราฟไปทางซ้ายและขวาตามลำดับ การเลื่อนของเส้นกราฟดังกล่าวเกิดจากความถี่ของคานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 2.39 ในกรณีที่เกรเดียนต์ของแรงกระทำต่อหัววัดมีค่าเป็นบวกหรือเป็นแรงดึงดูด ($\frac{dF_{ts}}{dz} > 0$) จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ใหม่เลื่อนไปด้านลบหรือทางซ้าย ($\Delta\omega < 0$) ในทางตรงกันข้ามเกรเดียนต์ของแรงที่มากกระทำต่อหัววัดมีค่าเป็นลบหรือแรงผลัก ($\frac{dF_{ts}}{dz} < 0$) จะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ใหม่เลื่อนไปทางบวกหรือทางขวา ($\Delta\omega > 0$)

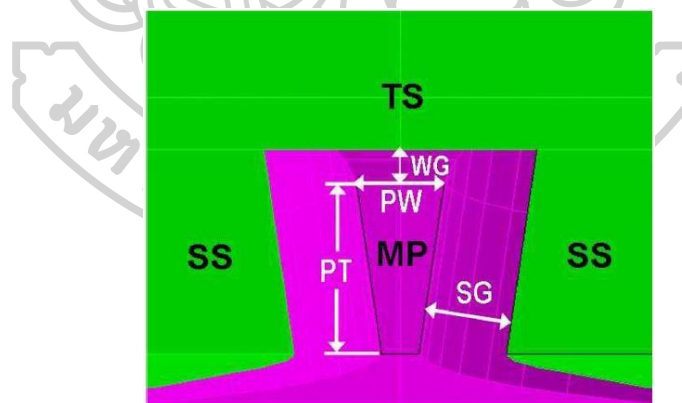
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำหลักการของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมาใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียน สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนนั้นมีความเข้มที่ต่ำ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคานน้อย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดอาจจะเห็นความแตกต่างได้ไม่ชัดเจนเท่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน ที่สามารถแยกประเภทของแรงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสสำหรับการศึกษาด้านแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและการศึกษาสนามแม่เหล็ก

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดและการศึกษาสนามแม่เหล็ก พบว่าในปี ค.ศ. 2009 ผู้วิจัยชื่อ Suping Song และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การลบข้อมูลด้านข้าง (adjacent track erasure, ATE) ของหัวเขียนรูปแบบ PMR ที่มีชิลด์ล้อมรอบ (wrapped-around shielded, WAS) ด้วยวิธีการไมโครแมกเนติก (micromagnetic) ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองหัวเขียนดังรูปที่ 2.23 โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้คือ main pole track width (PW) main pole thickness (PT) write gap (WG) side gap (SG) ให้มีขนาดเท่ากับ 80 100 35 และ 80 nm ตามลำดับ

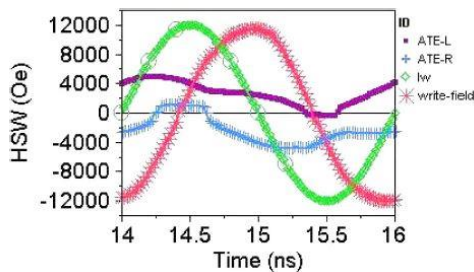
ผู้วิจัยได้กระตุ้นแบบจำลองหัวเขียนด้วยการกำหนดกระแสขนาด 40 mA ที่มีความถี่ 500 MHz เป็นระยะเวลา 16 ns หรือ 8 คาบ และในการคำนวณผลจะใช้คาบสุดท้ายเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.24 พบว่าการเกิดสนามที่ลบข้อมูลด้านข้างจะเกิดในลักษณะที่ไม่สมมาตร กล่าวคือ จะเกิดที่ฝั่งใดฝั่งหนึ่งของ SS และอยู่ที่มุมหรือขอบของ SS เท่านั้น โดย ATE จะมีความเข้มมากเมื่อสนามที่ใช้ในการเขียนมีการเปลี่ยนแปลง

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทดลองกำหนดแมกนีโทเซชันเริ่มต้นให้แก่แบบจำลองหัวเขียน ซึ่งพบว่า ATE ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสนามที่ใช้เขียนเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับแมกนีโทเซชันเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 2.25

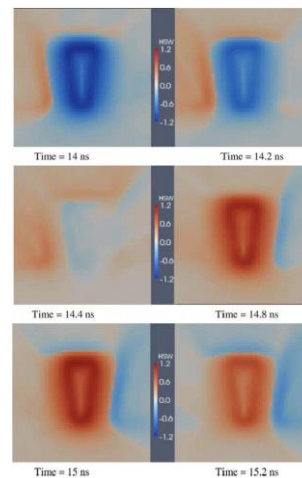


รูปที่ 2.23 รูปแบบจำลองหัวเขียน กำหนดให้ main pole (MP) trailing shield (TS) side shield (SS) main pole track width (PW) main pole thickness (PT) write gap (WG) side gap (SG)

ที่มา : S. Suping, G. Lijie, L. Shaoping, and M. Sining, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของแบบจำลองหัวเขียน (ก) กราฟการจ่ายกระแสที่ขึ้นกับเวลา และ (ข) การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในช่วงเวลา 14-16 ns

ที่มา : S. Suping, G. Lijie, L. Shaoping, and M. Sining, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.

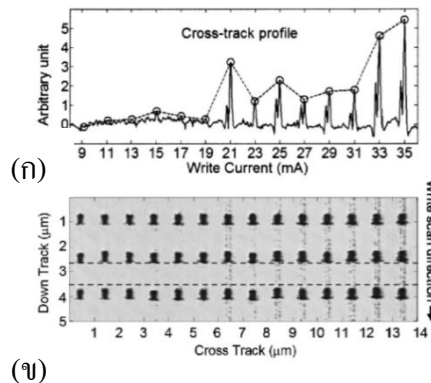


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.25 การเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อแมกนีไทเซชันเริ่มต้น (M_o) ต่างกัน (ก) สนามแม่เหล็กที่ MP มีทิศพุ่งออก และ (ข) สนามแม่เหล็กที่ MP มีทิศพุ่งเข้า

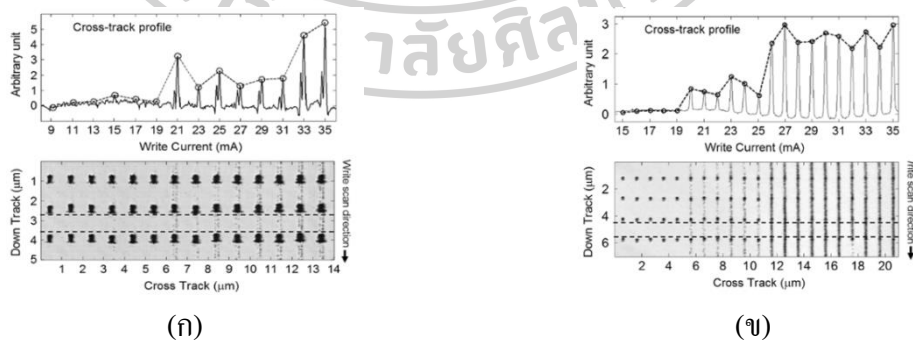
ที่มา : S. Suping, G. Lijie, L. Shaoping, and M. Sining, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.



รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบการคงค้างที่กระแสต่างกัน (ก) กราฟแสดงแอมพลิจูดสูงสุดของสนามแม่เหล็กคงค้าง และ (ข) สนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้าง (เส้นประ)

ที่มา : Z. Yuchen and Z. Jian-Gang, "Perpendicular write head remanence characterization using a contact scanning recording tester," APPLIED PHYSICS, 2005.

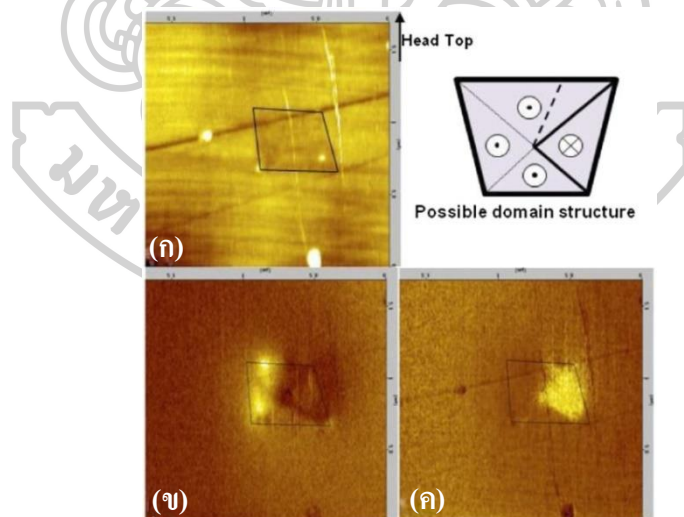
ในปี ค.ศ. 2005 ผู้วิจัยชื่อ Yuchen Zhou และ Jian-Gang Zhu [2] ได้ใช้เทคนิค contact scanning recording ในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียน เมื่อขนาดของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 – 35 mA ซึ่งผลการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กคงค้างจะเกิดขึ้นได้หลังจากได้รับกระแสด้าน 21 mA และขนาดของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้สนามแม่เหล็กคงค้างเพิ่มขึ้นตาม แสดงดังรูปที่ 2.26 และในปีเดียวกันผู้วิจัยยังได้ศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนขนาดใหญ่และเล็ก [11] โดยผลที่ได้พบว่าขนาดหัวเขียนที่มีขนาดเล็กจะเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างได้ที่กระแสต่ำกว่าหัวเขียนขนาดใหญ่ และจะสังเกตเห็นสนามแม่เหล็กคงค้างที่ชัดเจนเมื่อขนาดกระแสมีค่าอยู่ที่ 27 mA ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการคงค้างเมื่อหัวเขียนมีขนาดต่างกัน (ก) หัวเขียนขนาดใหญ่ และ (ข) หัวเขียนขนาดเล็ก

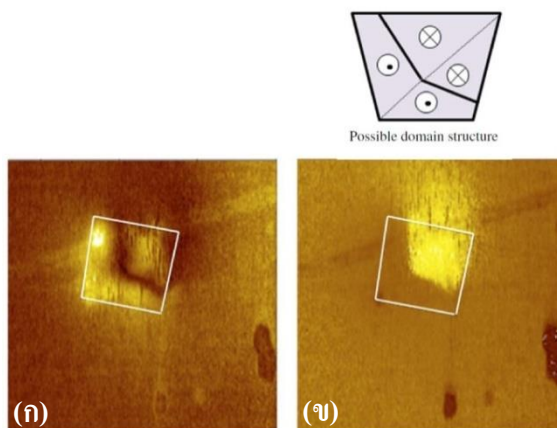
ที่มา : Z. Yuchen and Z. Jian-Gang, "Effect of pole-tip size on perpendicular recording head remanence," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 12, pp. 4449-4453, 2005.

ในปี ค.ศ. 2014 ผู้วิจัยชื่อ Keiji Takata [12] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยเทคนิคการวัดภาพแม่เหล็กจากความเครียด (magnetic strain imaging) พบว่า การเกิดโดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การลบข้อมูลหลังการเขียน (EAW) สิ่งที่ทำให้เกิดโดเมนแม่เหล็กคือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำในหัวเขียน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองจ่ายกระแสสลับให้แก่หัวเขียน $I = 10 \text{ mA}$ ด้วยความถี่ 50 kHz และทำการตรวจสอบ โดเมนที่เกิดขึ้นผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.28 พบว่า ภาพพื้นผิวที่ตรวจสอบไม่สามารถบ่งบอกโดเมนที่เกิดขึ้นได้ ในขณะที่ภาพการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสสามารถสังเกตเห็นโดเมนขนาดใหญ่ได้ 2 บริเวณดังรูปที่ 2.28 (ข) และ (ค) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ภาพทั้งสองถึงความเป็นไปได้ของโครงสร้างโดเมน และพบว่า 1 ใน 4 ของโดเมนมีแมกนีไทเซชันในทิศตรงข้ามเกิดขึ้นที่บริเวณฝั่งขวา นอกจากนี้ โดเมนที่บริเวณมุมขวาบน (เส้นประ) ยังไม่สามารถบอกได้ว่าแมกนีไทเซชันมีทิศทางไปทางไหน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัวเขียนเป็น $I = 17 \text{ mA}$ ด้วยความถี่ 50 kHz เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแม่เหล็กแสดงรูปที่ 2.29 พบว่ากระแสที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ของโดเมนและการขยายตัวของโดเมน ทำให้บริเวณของโดเมนที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ามีทิศทางของแมกนีไทเซชันไปทางไหนในรูปที่ 2.28 มีการเปลี่ยนแปลง โดยมีทิศพุ่งออกมาจากพื้นผิว



รูปที่ 2.28 ภาพโครงสร้างโดเมนเมื่อจ่ายกระแส 10 mA (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพจากผลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด และ (ค) ภาพจากผลการเปลี่ยนแปลงเฟส

ที่มา : K. Takata, "Domain structures of a main pole tip in a hard disk drive observed by magnetic strain imaging," *Surface and Interface Analysis*, vol. 46, no. 12-13, pp. 1257-1261, 2014.



รูปที่ 2.29 ภาพโครงสร้างโดเมนเมื่อจ่ายกระแส 17 mA (ก) ภาพจากผลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด และ (ข) ภาพจากผลการเปลี่ยนแปลงเฟส

ที่มา : K. Takata, "Domain structures of a main pole tip in a hard disk drive observed by magnetic strain imaging," *Surface and Interface Analysis*, vol. 46, no. 12-13, pp. 1257-1261, 2014.

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณหัวเขียน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การลบข้อมูลหลังการเขียน และการดึงคูดอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กมาปนเปื้อน ซึ่งทำให้หัวเขียนไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ โดยสนามแม่เหล็กคงค้างจะมีทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งออกจากหัวเขียนแม่เหล็กในแนวแกน Z ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมาใช้ในการตรวจสอบและศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นกับหัวเขียน ซึ่งหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในงานวิจัยจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้าง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก สำหรับการศึกษายุติกรรมของสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นกับหัวเขียนแม่เหล็ก อันเนื่องมาจากกระบวนการการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียน หรือแม่แต่การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียน ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบของรูปภาพแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงเฟส

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย ซึ่งจะอธิบายถึงลักษณะ โครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ขั้นตอนการจัดตั้งอุปกรณ์และการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กคงค้าง การสร้างรูปภาพแม่เหล็ก และสุดท้ายการนำรูปภาพแม่เหล็กมาวิเคราะห์

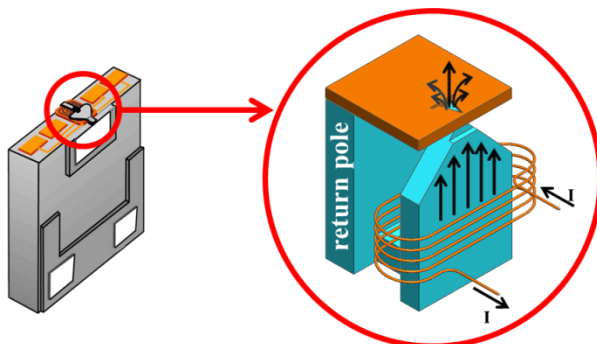
3.1 ลักษณะโครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยมีลักษณะโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 [3, 13-15] เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดของหัวเขียนจะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้มีฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) พุ่งผ่านออกจากพื้นที่บริเวณปลายโพลหลักแล้วย้อนกลับเข้าไปยังส่วนของโพลย้อนกลับ (return pole) โดยสนามแม่เหล็กที่ออกจากโพลหลักเป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$\vec{B} = \frac{\Phi}{A} \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้ \vec{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ที่ออกจากโพลหลัก Φ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก และ A คือ พื้นที่บริเวณโพลหลัก

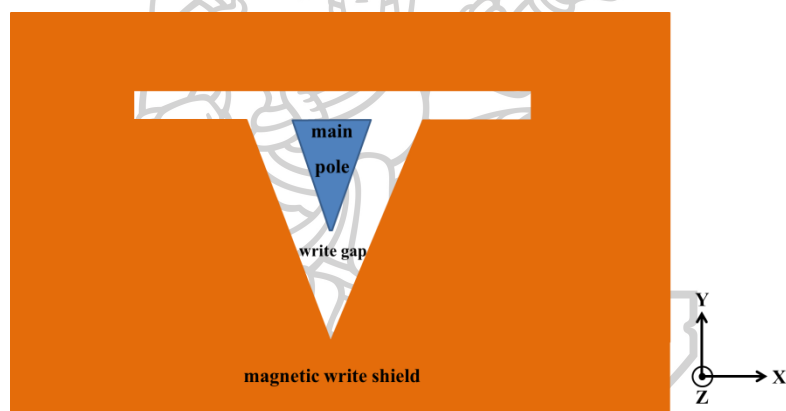
ในการทดลองนี้ส่วนที่ผู้วิจัยสนใจคือ สนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบริเวณหัวเขียน ซึ่งอยู่ทางด้าน ABS บริเวณดังกล่าวประกอบไปด้วย (1) โพลหลัก (main pole, MP) ทำหน้าที่ในการเขียนข้อมูล (2) ช่องว่างหัวเขียน (write gap, WG) และ (3) ชิลด์แม่เหล็กของหัวเขียน (magnetic write shield) ทำหน้าที่ในการควบคุมสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ที่มา : E. A. Dobisz, Z. Z. Bandic, W. Tsai-Wei, and T. Albrecht, "Patterned Media: Nanofabrication Challenges of Future Disk Drives," Proceedings of the IEEE, vol. 96, no. 11, pp. 1836-1846, 2008.

แก้ไขจาก : K. Takano, "Magnetization dynamics of perpendicular writers," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 287, pp. 346-351, 2005.



รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้างของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้าน ABS

3.2 การตรวจวัดสนามแม่เหล็กบนหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

3.2.1 ขั้นตอนการจัดตั้งอุปกรณ์และการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

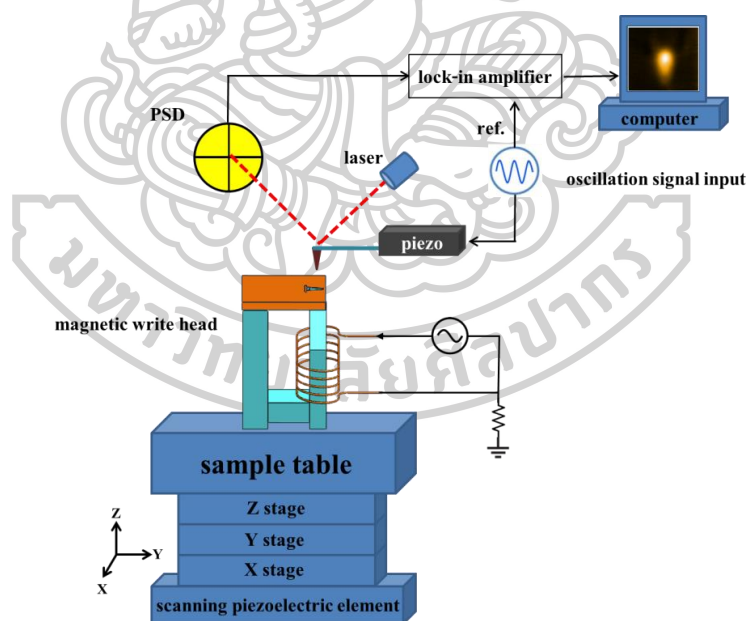
การจัดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็กสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.3 การทำงานของอุปกรณ์จะเริ่มจากการป้อนแรงกระตุ้นให้แก่คาน จนกระทั่งคานสั้นที่ ความถี่เรโซแนนซ์ของคาน จากนั้นจึงใช้เลเซอร์ส่องไปยังปลายคาน ซึ่งจะเกิดการสะท้อนไปยัง PSD เพื่อทำการบันทึกค่าสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ของแอมพลิจูดและเฟสของคานใน ขณะที่ไม่มีความถี่ภายนอกมาเกี่ยวข้อง ต่อมาเมื่อมีแรงแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อคานที่ใช้ในการ ตรวจวัดจะส่งผลให้แอมพลิจูดและเฟสของคานมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

ในงานนี้ผู้วิจัยได้ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสในการศึกษาสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสมการที่ 2.34 แทนลงในสมการที่ 2.41 จะสามารถเขียนสมการของการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ได้จากการตรวจวัดดังสมการที่ 3.2

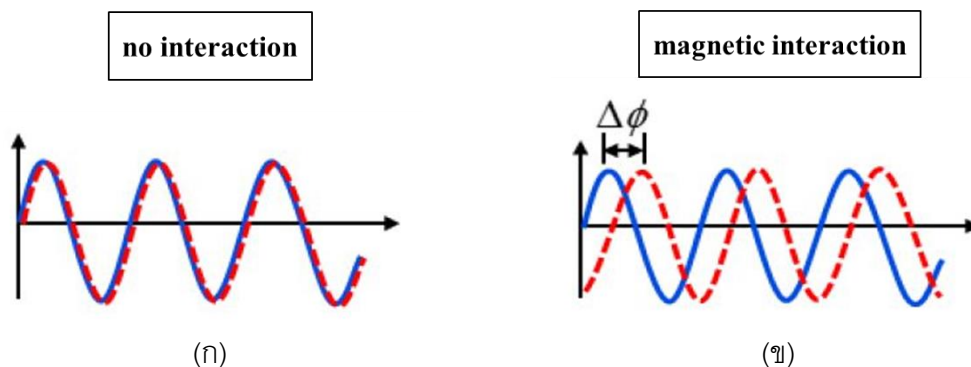
$$\Delta\phi \approx -\frac{Q}{k} \vec{M}_{tip} \frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ $\Delta\phi$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส Q คือ แฟกเตอร์คุณภาพของคาน k คือ ค่าคงที่ของคาน (สปริง) \vec{M}_{tip} คือ แมกนีไทเซชันของหัววัด และ $\frac{\partial^2 \vec{H}_z}{\partial z^2}$ คือ สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนที่มากระทำต่อหัววัดในแนวแกน Z

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสจะขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนในแนวแกน Z ดังนั้นการตรวจวัดจำเป็นที่จะต้องกำหนดความสูงในการสแกนให้คงที่ (scan height, SH) เพื่อทำการตรวจสอบสนามแม่เหล็กแต่ละบริเวณของหัวเขียนโดยไม่มีแรงของอะตอมมาเกี่ยวข้อง ซึ่งขั้นตอนการตรวจวัดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



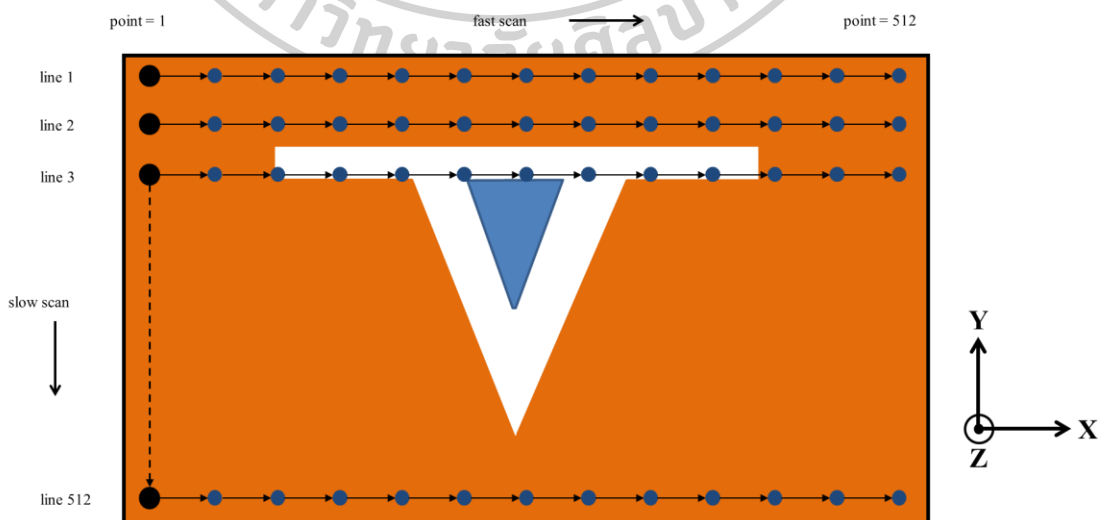
รูปที่ 3.3 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 กราฟการเปลี่ยนแปลงของคาน (ก) เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำ และ (ข) เมื่อมีแรงแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

3.2.2 ขั้นตอนการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก

การตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในงานวิจัยนี้จะใช้โหมดการตรวจวัดแบบควบคู่ (duo scan) ซึ่งประกอบไปด้วยการสแกนแบบกึ่งสัมผัสสำหรับการตรวจสอบพื้นผิวเพื่อใช้เป็นระดับอ้างอิง และไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (จากระดับอ้างอิง) สำหรับการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก วิธีการสแกนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 เริ่มต้นจากหัววัดทำการสแกนพื้นผิวที่ตำแหน่งแรก (จุดสีดำ) และสแกนจากซ้ายไปขวาตลอดเส้นทาง เมื่อทำการสแกนครบหนึ่งเส้น หัววัดจะถูกเลื่อนตำแหน่งแล้วทำซ้ำจนกว่าจะครบจำนวนเส้นที่กำหนดไว้ เพื่อทำการบันทึกค่าระดับความสูงแต่ละตำแหน่งของพื้นผิว จากนั้นหัววัดจะถูกยกขึ้นตามความสูงที่กำหนด และทำการสแกนซ้ำอีกหนึ่งรอบสำหรับการตรวจสอบสนามแม่เหล็ก การสแกนดังกล่าวจะถูกทำทั้งหมด 3 ครั้ง ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ลักษณะการสแกนของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.1 วิธีการสแกนในแต่ละครั้ง

การวัดครั้งที่	ขนาดพื้นที่ (nm)	ความละเอียด (X,Y)	ความสูง (nm)
1	4000 x 4000	32 x 32	25
2	2000 x 2000	64 x 64	25
3	800 x 800	512 x 512	10

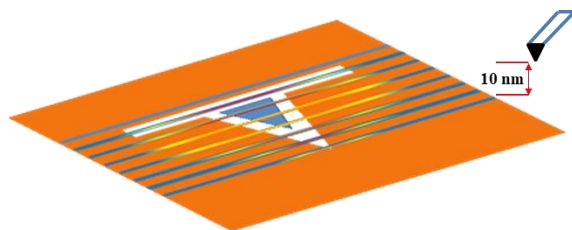
จากตารางที่ 3.1 การสแกนในแต่ละครั้งจะมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เริ่มจากการสแกนครั้งที่ 1 เป็นการสแกนพื้นที่อย่างกว้างเพื่อหาตำแหน่งของหัวเขียน ครั้งที่ 2 จะเป็นการลดขนาดพื้นที่และเพิ่มความละเอียดในการสแกนเพื่อความแม่นยำในการหาหัวเขียนในครั้งที่ 3 สุดท้ายครั้งที่ 3 เป็นการสแกนหัวเขียนในขนาดและความละเอียดที่ต้องการ โดยมีระยะห่างระหว่างหัววัดกับหัวเขียนที่ 10 nm ซึ่งระยะห่างนี้จะสามารถวัดแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนได้โดยไม่มีแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) มาเกี่ยวข้อง [16] นอกจากนี้ยังเป็นระยะที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อหัววัด กล่าวคือ หากความสูงน้อยกว่า 10 nm อาจส่งผลให้หัววัดมีโอกาสที่จะชนอนุภาคที่เจือปนมากับหัวเขียนได้หรือแม้แต่การชนของหัววัดกับพื้นผิวของหัวเขียน [17] ในทางตรงข้ามหากความสูงมากกว่า 10 nm อาจส่งผลต่อความคมชัดของพลังงาน นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์สำคัญอื่น ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก

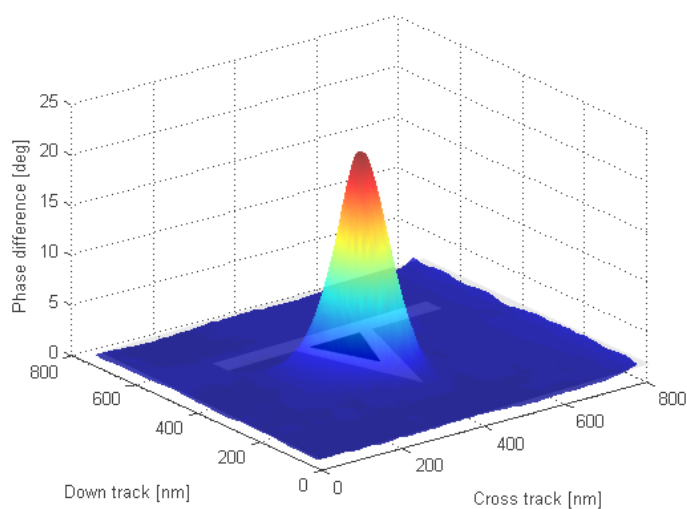
Parameters	value
resonance frequency (kHz)	65.223
MFM oscillation amplitude (mV)	200 ± 1%
scan size X (nm)	1.5625
scan size Y (nm)	1.5625
current (mA)	30

3.2.3 การสร้างรูปภาพสนามแม่เหล็ก

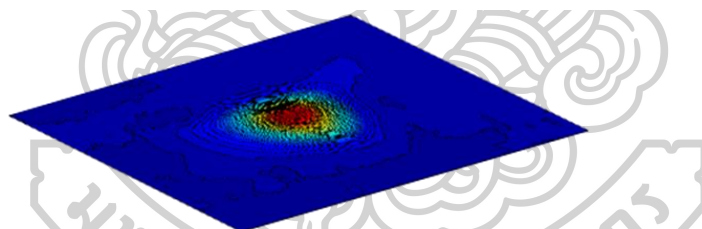
ในขณะที่หัววัดสแกนไปบนหัวเขียนนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ณ จุดที่ถูกสแกน ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสจะมีทั่วพื้นที่ของหัวเขียนดังรูปที่ 3.6 (ข) สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสจะมีค่ามาก ณ บริเวณ โพลหลักของหัวเขียนเมื่อได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสทั้งหมดจะถูกบันทึกในรูปแบบของไฟล์ Excel (.csv, .xlsx, .xls) เพื่อใช้ในการประมวลผลและสร้างเป็นภาพแม่เหล็กดังรูปที่ 3.6 (ค) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ



(ก)



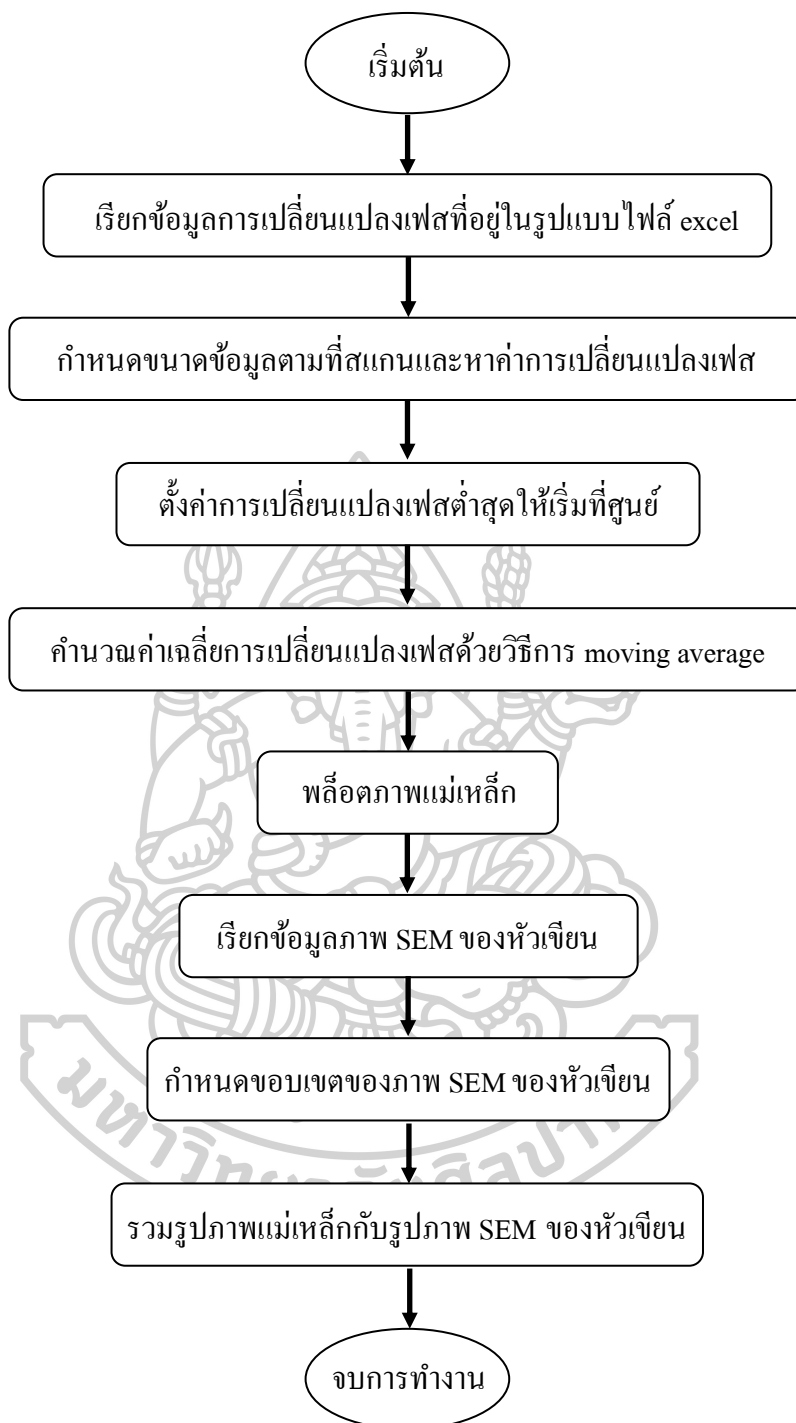
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.6 การสร้างรูปภาพสนามแม่เหล็ก (ก) ลักษณะการสแกนหัวเขียนในแนวครอสแทร็ค (cross track) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างหัววัดกับหัวเขียนที่ 10 nm (ข) ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของหัวเขียนในแต่ละตำแหน่งที่ถูกสแกน (ค) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

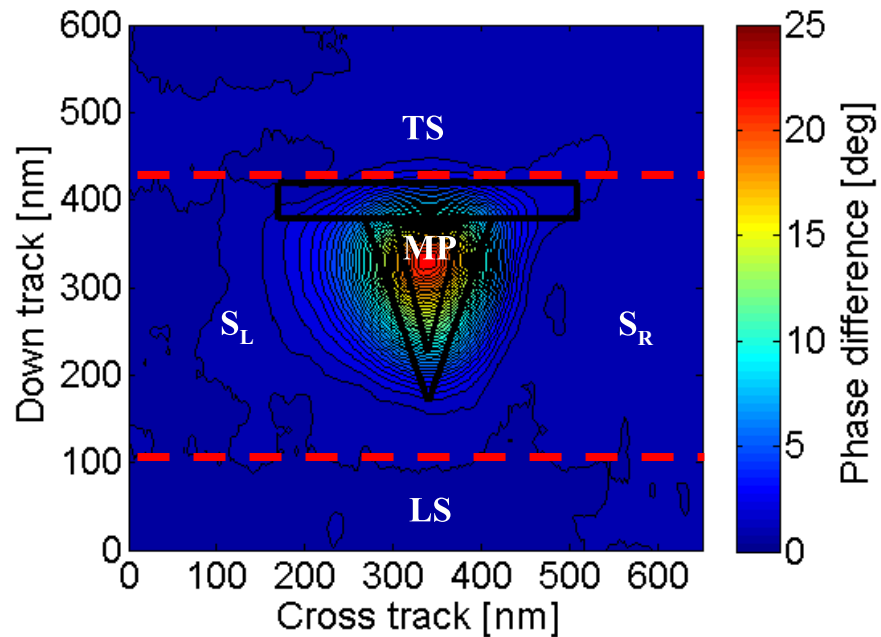
จากรูปที่ 3.6 (ค) เป็นรูปภาพแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมแมทแล็บ โดยวิธีการสร้างภาพแม่เหล็กจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 แผนผังโปรแกรมการสร้างรูปภาพแม่เหล็ก รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก (ก)



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมในการสร้างภาพแม่เหล็ก

3.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปภาพแม่เหล็ก

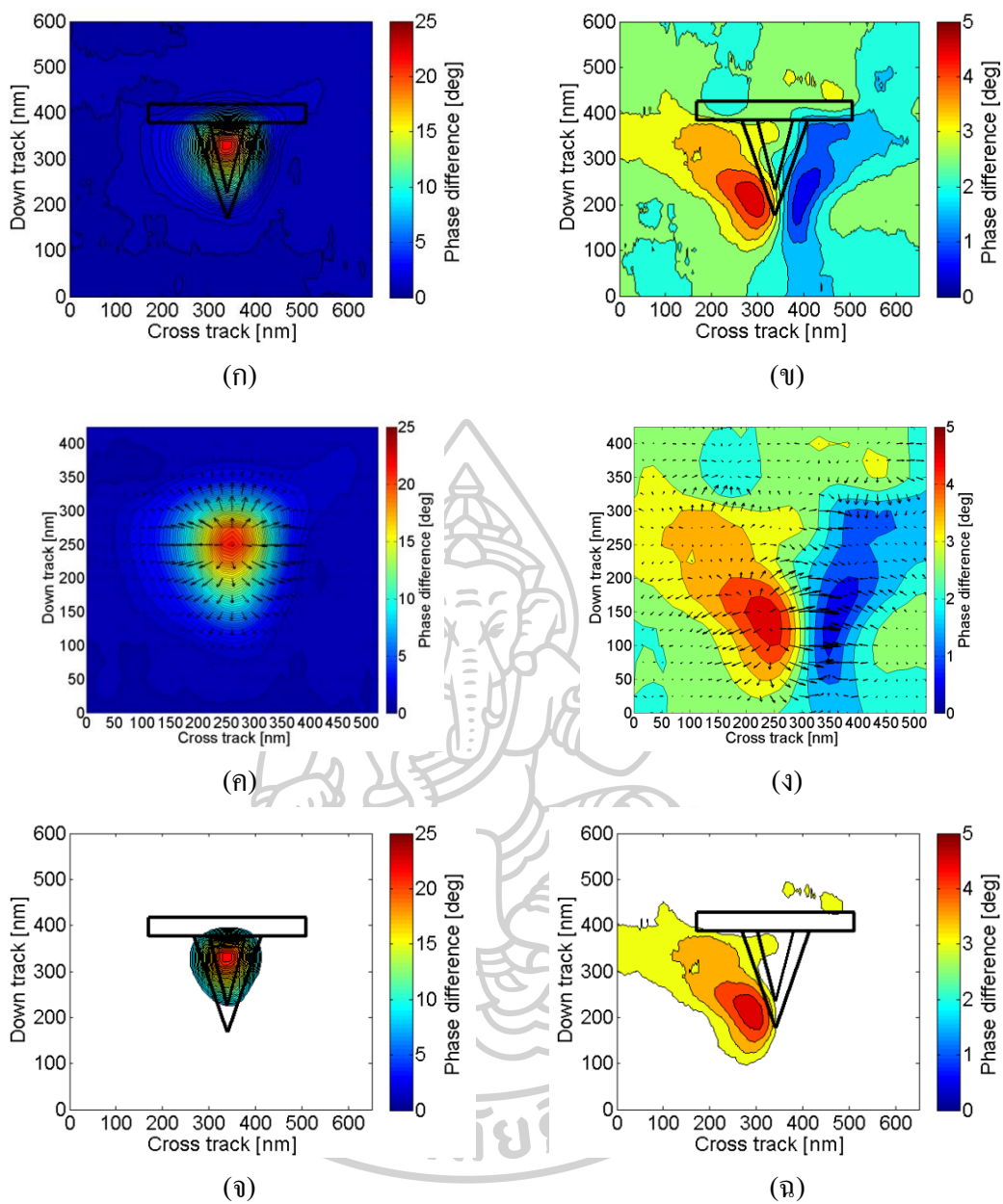
การพิจารณาข้อมูลจากรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ โพลหลัก (MP) ชิลด์ส่วนบน (trailing shield, TS) ชิลด์ฝั่งขวา (right shield, S_R) ชิลด์ฝั่งซ้าย (left shield, S_L) และ ชิลด์ส่วนล่าง (leading shield, LS) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเทียบกับภาพของหัวเขียน

จากรูปที่ 3.8 เป็นการนำค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสมาสร้างเป็นรูปภาพแม่เหล็กด้วยโปรแกรมแมทแลบ ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสแต่ละตำแหน่งจะมีค่าที่แตกต่างกัน หากค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับเฟสอ้างอิงจะหมายถึง บริเวณนั้นมีแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดน้อย (แรงดึงดูดน้อย) ซึ่งแสดงได้ด้วยพื้นที่สีน้ำเงิน ในทางตรงกันข้ามหากค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสมีค่าที่แตกต่างกับเฟสอ้างอิงมากจะหมายถึง บริเวณนั้นมีแรงแม่เหล็กที่มากกระทำต่อหัววัดมาก (แรงดึงดูดมาก) ซึ่งแสดงได้ด้วยพื้นที่สีแดง

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียน จะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงที่บริเวณ MP แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จากรูปภาพอาจจะไม่สามารถแยกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสไปประมวลผลเป็นเวกเตอร์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก สำหรับใช้ในการกำหนดขอบเขตของพื้นที่สนามแม่เหล็กที่สนใจ แสดงดังรูปที่ 3.9 (รูปภาพเฉลี่ยของข้อมูลเพื่อแสดงให้เห็นเวกเตอร์เท่านั้น) สังเกตว่าสนามแม่เหล็กมีการกระจายตัวโดยพุ่งออกจากพื้นที่สีแดงเข้าสู่พื้นที่สีน้ำเงิน



รูปที่ 3.9 รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (ก) กรณีที่มีการจ่ายกระแส (ข) หลังการจ่ายกระแสหรือหลังป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (ค) และ (ง) เส้นเวกเตอร์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (ฉ) และ (ฉ) แสดงพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กที่สนใจ

ในการวิเคราะห์ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเข็ญ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์จากความกว้างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็กจากการคำนวณค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส ณ บริเวณที่สนใจ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ (1) ในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเข็ญ และ (2) หลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าหรือหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเข็ญ รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาพผนวก (ก)

ในกรณีจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเข็ญดังรูปที่ 3.9 (ก) ผู้วิจัยได้ทำการเลือกพื้นที่สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางของเส้นแวนเตอร์พุ่งออกดังรูปที่ 3.9 (ค) และความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ครอบคลุมบริเวณ MP พอดีแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 (จ) ซึ่งสังเกตได้ว่าพื้นที่ที่สนใจจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วง 8 – 25 องศา

และในกรณีสนามแม่เหล็กคงค้ำดังรูปที่ 3.9 (ข) ผู้วิจัยจะทำการเลือกพื้นที่ของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางของเส้นแวนเตอร์พุ่งออกเพียงอย่างเดียวซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9 (ง) สังเกตว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วง 3 – 5 องศา หรือมีพื้นที่สีเหลืองไปจนถึงสีแดงเท่านั้นแสดงดังรูปที่ 3.9 (ฉ) โดยผู้วิจัยกำหนดให้เรียกพื้นที่บริเวณนี้ว่าสนามแม่เหล็กคงค้ำ

ดังนั้นในการศึกษาสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้ำที่เกิดขึ้นบนหัวเข็ญ อันเนื่องมาจากปัจจัยการกระตุ้น (1) การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1 Tesla และ (2) การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดภายในหัวเข็ญ โดยผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์จากภาพแม่เหล็กซึ่งใช้สำหรับการตรวจสอบบริเวณที่เกิดสนามแม่เหล็กคงค้ำ นอกจากนี้บางส่วนของการศึกษา หากพบว่าไม่มีความแตกต่างของภาพแม่เหล็กกันอย่างชัดเจน ผู้วิจัยจะนำเทคนิคการหาความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส) ดังกล่าวมาใช้ในการพล็อตกราฟสำหรับศึกษาความแตกต่าง

บทที่ 4

การศึกษาสนามแม่เหล็กค้ำงที่บริเวณโพลของหัวเขียนโดยการใช้

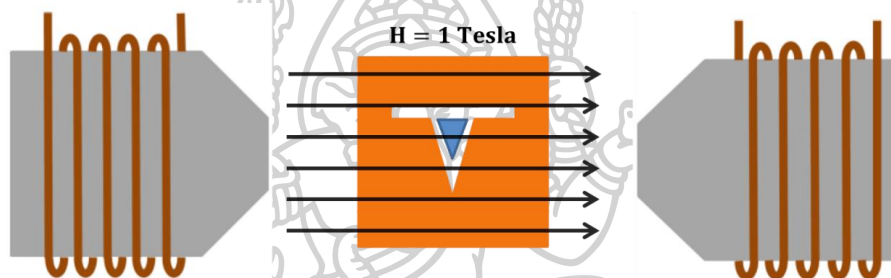
กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การเกิดสนามแม่เหล็กค้ำงบนหัวเขียนแม่เหล็กเป็นหนึ่งในปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม HDD เนื่องจากในกระบวนการผลิตหากมีสนามแม่เหล็กค้ำงเกิดขึ้นที่หัวเขียนจะทำให้เกิดการดึงดูดอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กมาปนเปื้อน หากนำไปใช้งานอาจจะส่งผลให้เกิดการทำลายผิวหน้าของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ หรือในกรณีที่ไม่มีอนุภาคแม่เหล็กมาเจือปนในขั้นตอนของการผลิต แต่เมื่อนำไปใช้งานกลับพบว่ามีสนามแม่เหล็กค้ำงเกิดขึ้น จะส่งผลให้เกิดการปรากฏการณ์เขียนทับของข้อมูลก่อนหน้า (EAW) จากปัญหาดังกล่าวพบว่าสาเหตุหรือปัจจัยที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กค้ำงประกอบไปด้วย 2 ปัจจัยคือ (1) การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกแก่หัวเขียน (2) การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียน นอกจากนี้อาจมีรูปทรงและขนาดทางกายภาพของหัวเขียนมาเกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวารสารที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน ได้แก่ การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการให้กระแสต่างกัน [12] และการสร้างแบบจำลองไมโครแมกเนติกในการศึกษาสนามแม่เหล็กค้ำงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอก หรือการค้ำงที่เกิดจากรูปทรงและขนาดทางกายภาพของหัวเขียน [1, 18-21] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กค้ำงที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของ (1) สนามแม่เหล็กภายนอก และ (2) ขนาดและชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขดลวดภายในหัวเขียน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการเกิดสนามแม่เหล็กค้ำงของหัวเขียนที่มีรูปแบบต่างกัน หัวเขียนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สต่างชนิดและสุดท้ายหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ความหนาต่างกันตามลำดับ

4.1 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก

ปัจจัยหนึ่งของการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็กคือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตหัวเขียนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ สนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสูง (ประมาณ 1 Tesla) ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (electromagnetic coil) เพื่อใช้ในการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในหัวอ่าน [22] แต่เนื่องจากหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีขนาดเล็กจึงเปรียบเสมือนการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนโดยตรง แสดงดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นหัวเขียนจึงได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอกและสามารถเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างได้



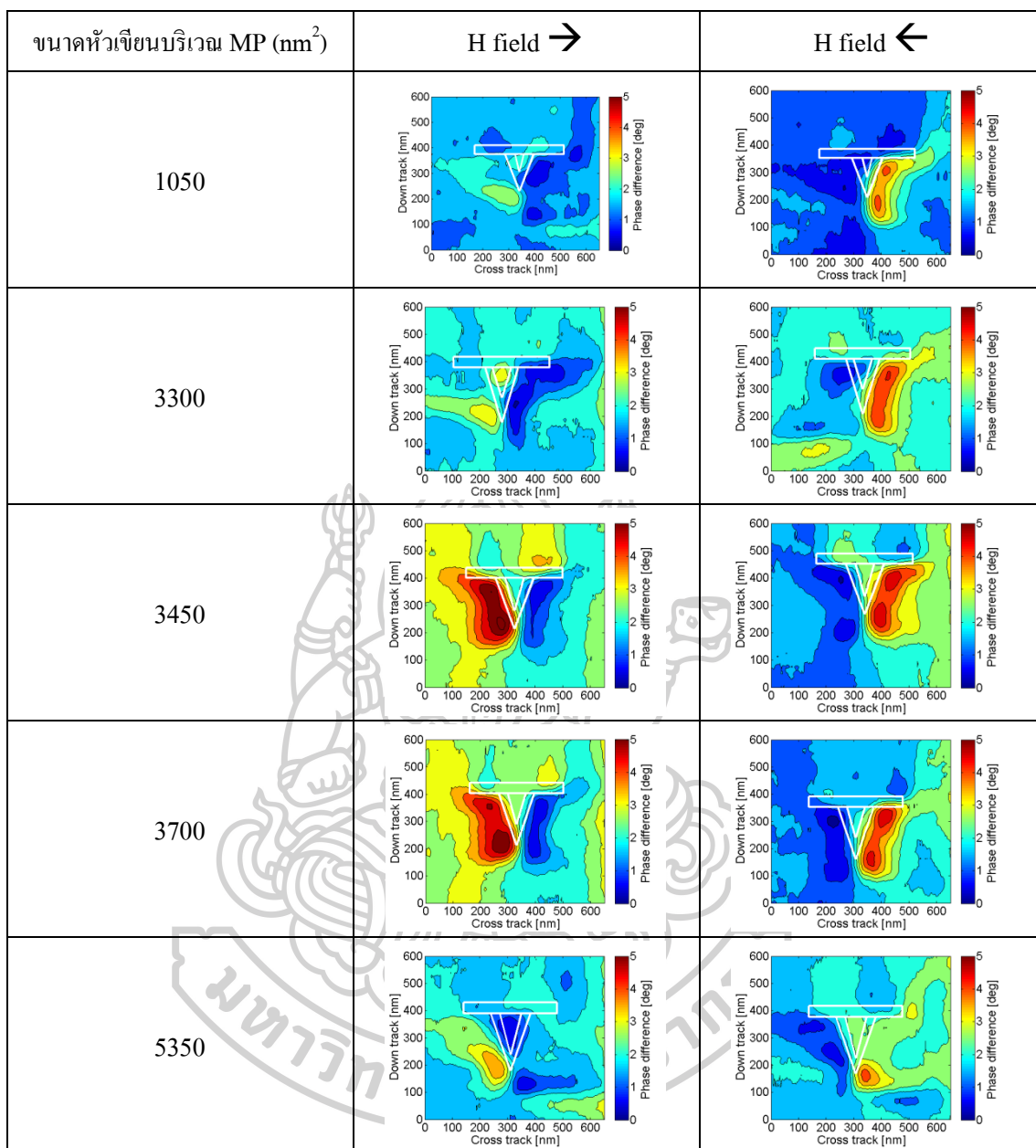
รูปที่ 4.1 การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก

การเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างในขั้นตอนของกระบวนการผลิตจะนำมาซึ่งปัญหาการปนเปื้อนอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือในอากาศ จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลกระทบของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อหัวเขียนถูกป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1 Tesla ในทิศทางตรงข้ามกันดังรูปที่ 4.2



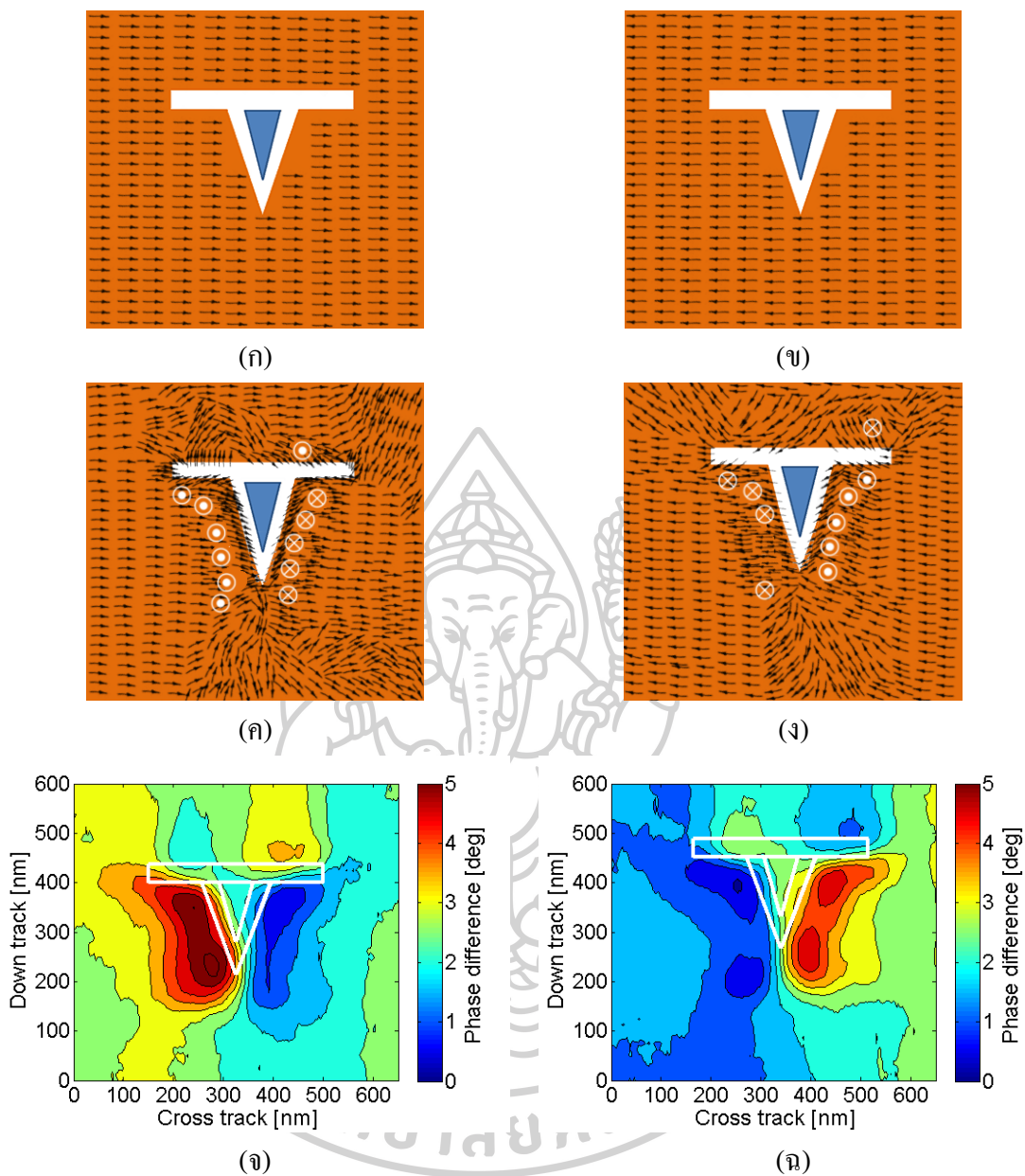
รูปที่ 4.2 การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางต่างกัน (ก) ซ้ายไปขวา และ (ข) ขวาไปซ้าย

การตรวจวัดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะทำการหลังจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก หัวเขียนที่นำมาศึกษามีขนาดพื้นที่บริเวณ MP ต่างกันคือ 1050 3300 3450 3700 และ 5350 mm² ตามลำดับ โดยผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สนามแม่เหล็กค้ำบนหัวเขียนหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก

จากการพิจารณารูปที่ 4.3 พบว่าหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนในทิศทางจากซ้ายไปขวาจะเกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่ซิดด์ฝั่งซ้าย (S_L) และเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากขวาไปซ้ายจะเกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่ซิดด์ฝั่งขวา (S_R) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนแม่เหล็ก ส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนมีการจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ซึ่งอธิบายได้ด้วยพลังงานซีแมนดิ่งที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2



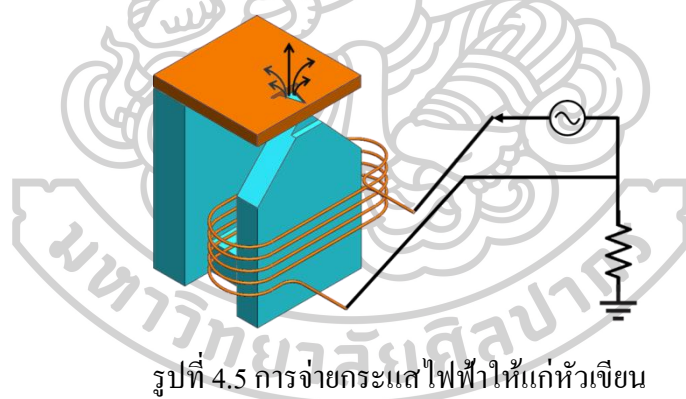
รูปที่ 4.4 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันบนหัวเข็ม (ก) และ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก (ค) และ (ง) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (จ) และ (ฉ) ภาพสนามแม่เหล็กคงค้าง

ต่อมาเมื่อนำหัวเข็มออกจากสนามแม่เหล็กภายนอกจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเข็มมีการจัดเรียงตัวใหม่ เพื่อรักษาระดับพลังงานให้มีค่าที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) ดังนั้นเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กตรวจสอบจึงพบสนามแม่เหล็กคงค้างดังรูปที่ 4.4 (จ) และ (ฉ) จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเข็มมีความสัมพันธ์กับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่หัวเข็มแม่เหล็ก

นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างหัวเขียนบางตัวสามารถที่จะเกิดการคงค้างได้ที่กึ่งกลางโพล (MP) ดังรูปการคงค้างของหัวเขียนขนาด 3300 nm^2 และการคงค้างบริเวณซิดส์ส่วนบน (TS) ดังรูปการคงค้างของหัวเขียนขนาด 3450 และ 3700 nm^2 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกแอนไอโซโทรปีของหัวเขียนและซิดส์ของวัสดุ [2] ตลอดจนขนาดของ MP ต่อความยาวปลายโพลอยู่ในระดับที่เหมาะสม [1]

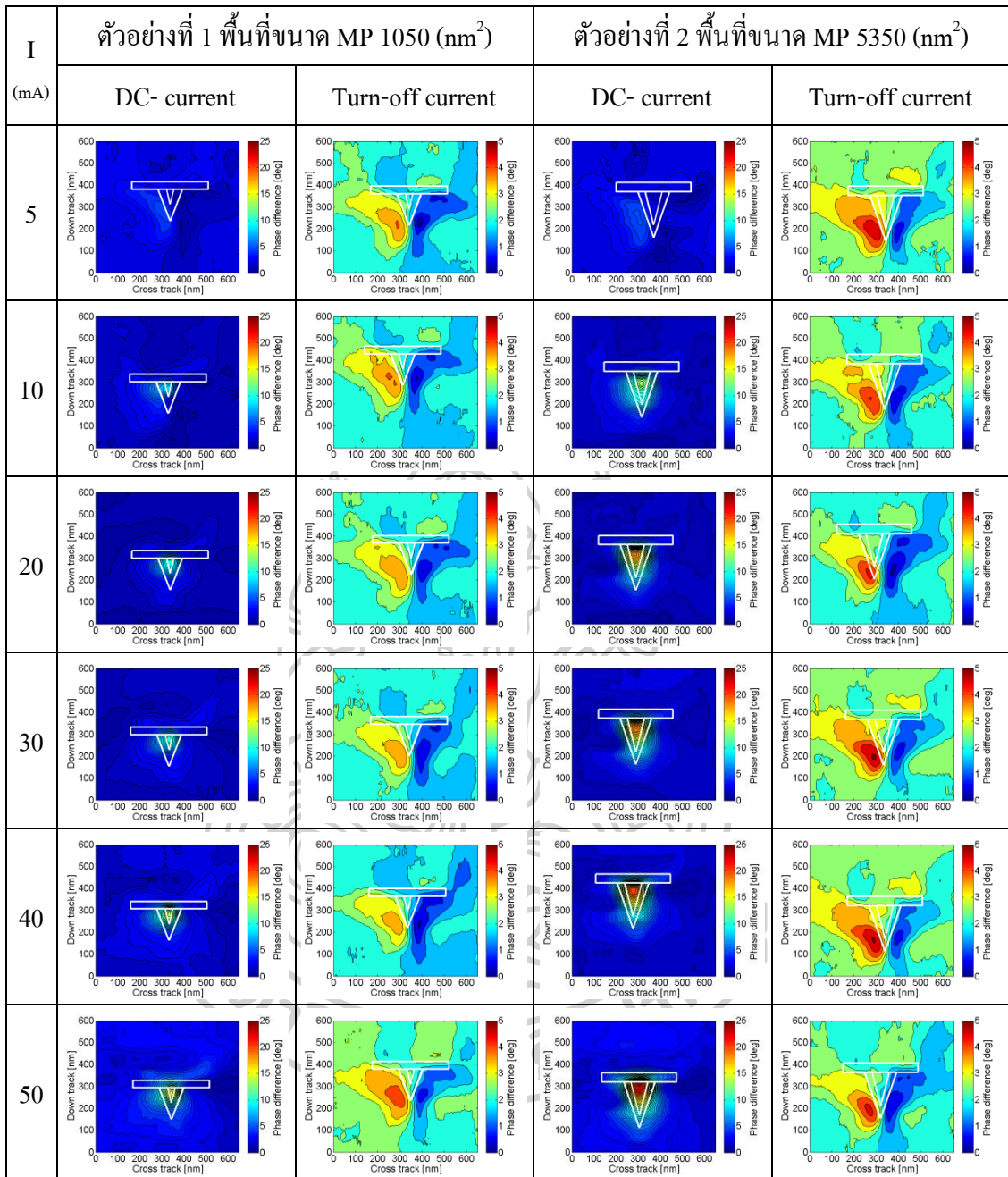
4.2 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากอิทธิพลของขนาดและชนิดของกระแสไฟฟ้า

กระบวนการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียนแม่เหล็กทั้งในระหว่างการใช้งานจริงและระหว่างการทดสอบการทำงานของหัวเขียนในขั้นตอนการผลิตเป็นอีกหนึ่งสาเหตุในการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้าง โดยการคงค้างที่เกิดจากกระบวนการใช้งานจริงจะส่งผลให้เกิดการเขียนทับข้อมูลการหน้า [1, 23] และในกระบวนการผลิตจะส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนเช่นเดียวกันกับการศึกษาก่อนหน้าได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลของขนาดและชนิดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัวเขียนแสดงดังรูปที่ 4.5

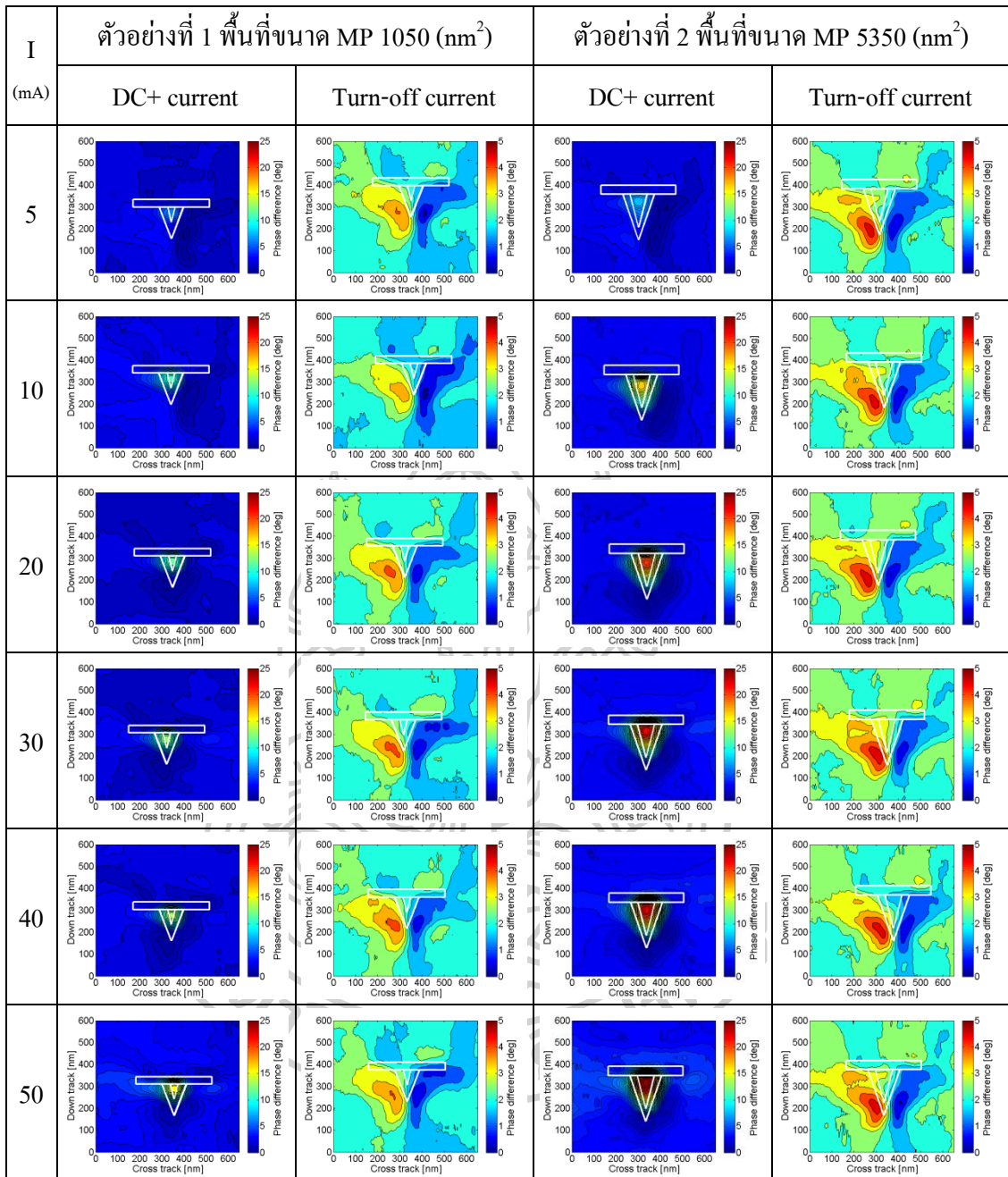


รูปที่ 4.5 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน

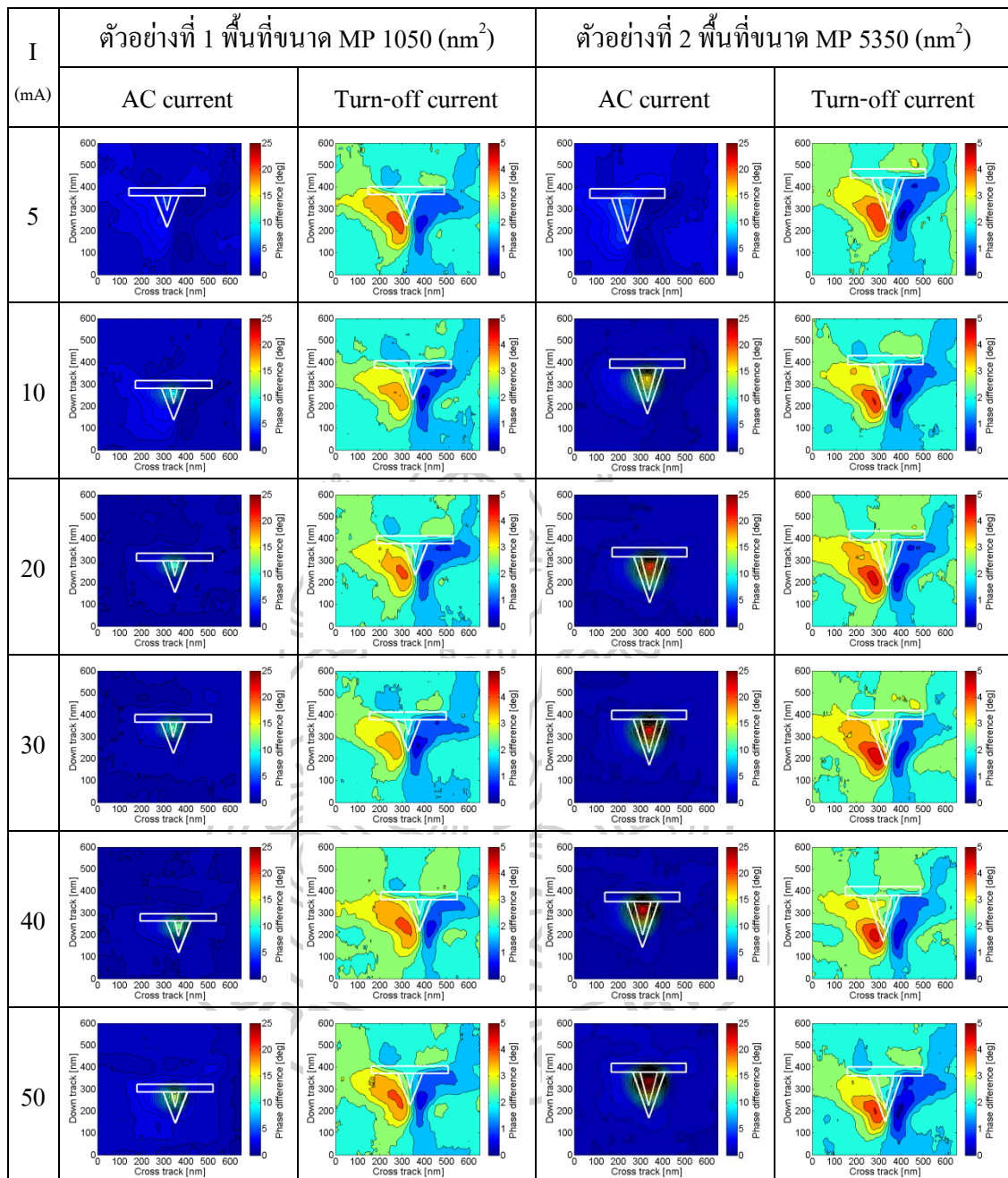
การศึกษาในหัวข้อนี้กำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ได้แก่ 5 10 20 30 40 และ 50 mA ตามลำดับ รวมทั้งชนิดของกระแส ได้แก่ ไฟฟ้ากระแสตรงทางลบ (negative DC current) ไฟฟ้ากระแสตรงทางบวก (positive DC current) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC current) ตามลำดับ สำหรับการตรวจวัดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะทำหลังจากจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนโดยผลการตรวจวัดเขียนตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสตรงทางลบ



รูปที่ 4.7 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสตรงทางบวก



รูปที่ 4.8 ภาพสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการจ่ายกระแสสลับ

จากรูปที่ 4.6 สังเกตว่าในขณะที่จ่ายกระแสตรงทางลบขนาด -5 ถึง -50 mA เมื่อทำการตรวจวัดจะพบว่าสนามแม่เหล็กมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบของสนามแม่เหล็กมีลักษณะที่เว้าได้ปกคล้ายกับสนามแม่เหล็กจากซิลด์พยายามพุ่งเข้าสู่ MP ของหัวเขียนแม่เหล็ก ในทางตรงกันข้ามเมื่อจ่ายกระแสตรงทางบวกขนาด 5 ถึง 50 mA ดังรูปที่ 4.7 พบว่ารูปแบบของสนามแม่เหล็กมีลักษณะการกระจายตัวพุ่งออกจาก MP เข้าสู่ซิลด์

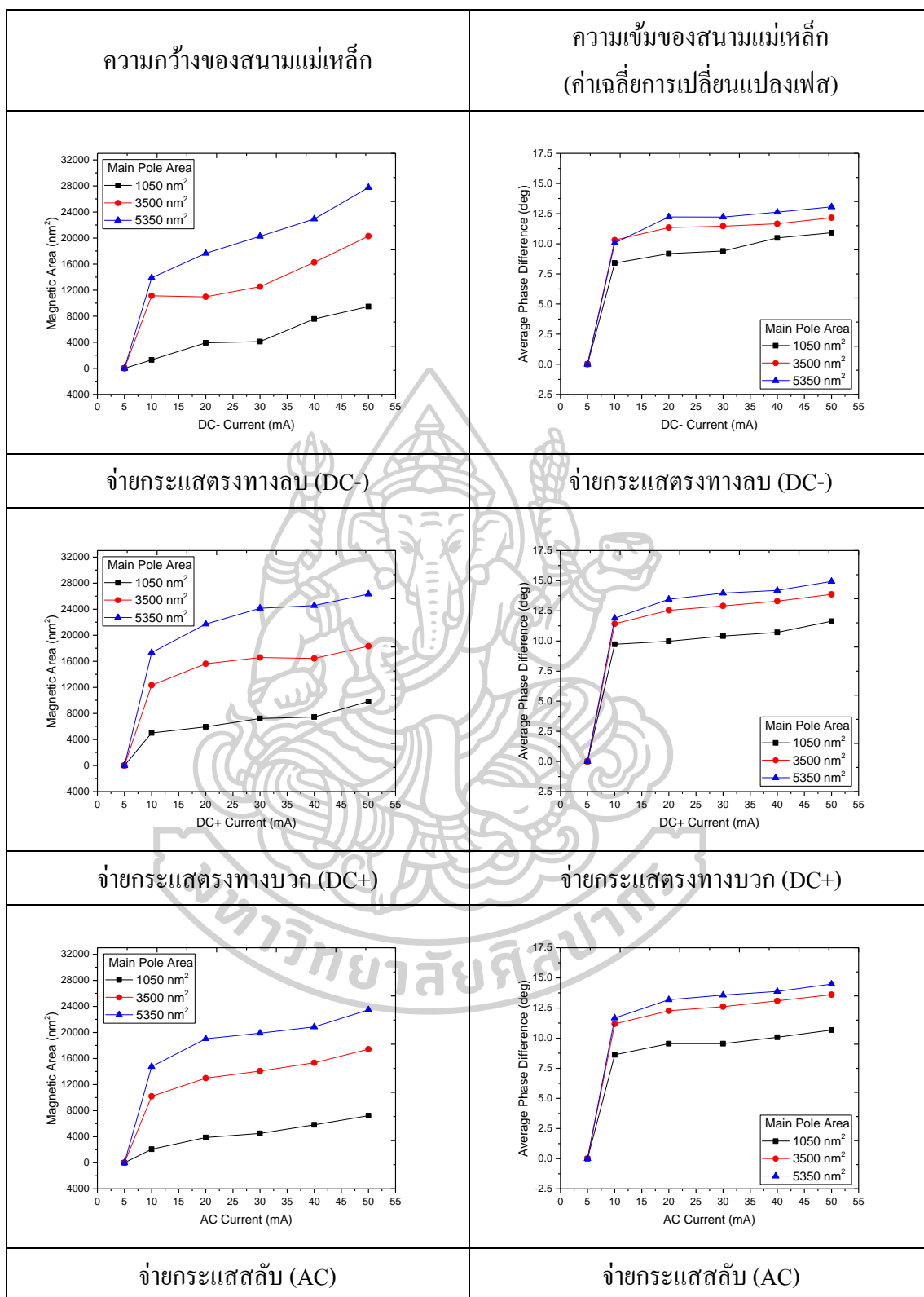
เนื่องจากบริเวณซิลด์ใกล้กับ MP มีลักษณะของพื้นที่สีน้ำเงินที่เข้ม ดังนั้นกระแสตรงทางลบและทางบวกจึงเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและพุ่งออกตามลำดับ

ต่อมาเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 ในขณะที่จ่ายกระแสสลับขนาด 5 ถึง 50 mA สังเกตว่าไม่มีส่วนเว้าหรือพื้นที่สีน้ำเงินเข้มที่บริเวณใกล้กับ MP ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการจ่ายกระแสสลับเปรียบเสมือนการจ่ายกระแสตรงทางลบและทางบวกสลับไปมาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้รูปแบบของสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นวงกลมรี

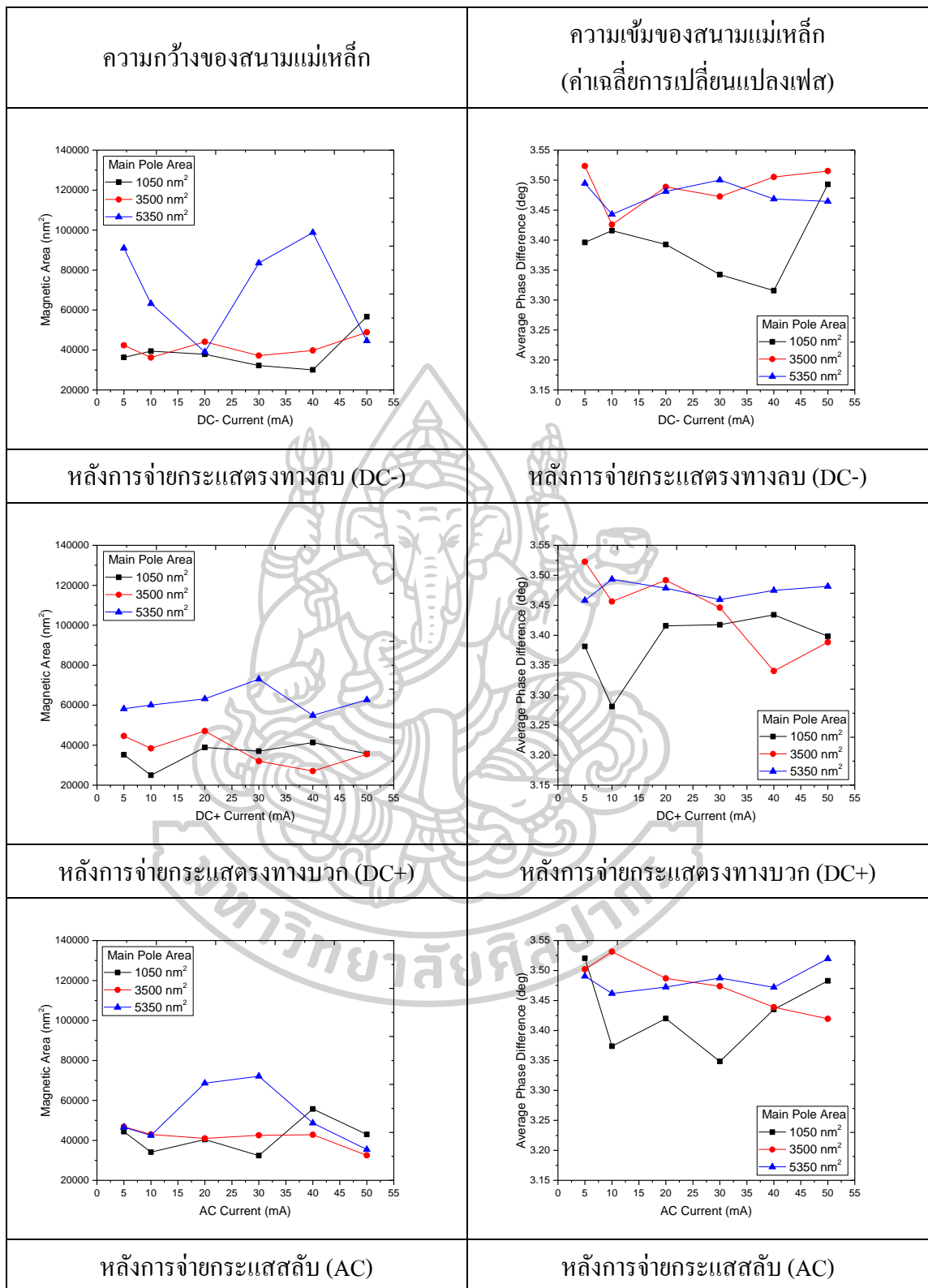
สุดท้ายเมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนจากการจ่ายกระแสขนาดต่างกันทั้ง 3 กรณี ดังรูปที่ 4.6 – 4.8 ตามลำดับ จะพบว่ารูปแบบการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนตัวอย่างเดียวกันจะมีลักษณะใกล้เคียงกันเสมอ และหากเป็นหัวเขียนที่ต่างกันพบว่าจะมีสนามแม่เหล็กคงค้างเกิดขึ้นที่ซิลด์ฝั่งซ้ายเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จากภาพสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ไม่สามารถที่จะแยกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการคำนวณความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กในพื้นที่ดังกล่าว (ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์) ในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าและภายหลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 ตามลำดับ

จากการพิจารณารูปความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ขนาดและชนิดของกระแสต่างกันดังรูปที่ 4.9 พบว่า ที่กระแสขนาด 5 mA ความกว้างของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ความกว้างของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาความเข้มของสนามแม่เหล็กพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับกราฟความกว้างของสนามแม่เหล็กในช่วงแรกเท่านั้น โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ 20 mA ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการทดสอบการทำงานของหัวเขียนที่ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA สำหรับการทำให้แมกนีไทเซชันของหัวเขียนอิมตัวเพื่อใช้ในการเขียนข้อมูล

เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กคงค้างหลังการจ่ายกระแสที่ขนาดและชนิดต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 พบว่ากราฟความกว้างของสนามแม่เหล็กคงค้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กคงค้างมีลักษณะที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ เนื่องจากการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีผลมาจากปัจจัยหลายส่วนเช่น รูปทรงของหัวเขียน ชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ในการสร้างหัวเขียน โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานของ Yuchen Zhou และ Jian-Gang Zhu [2]

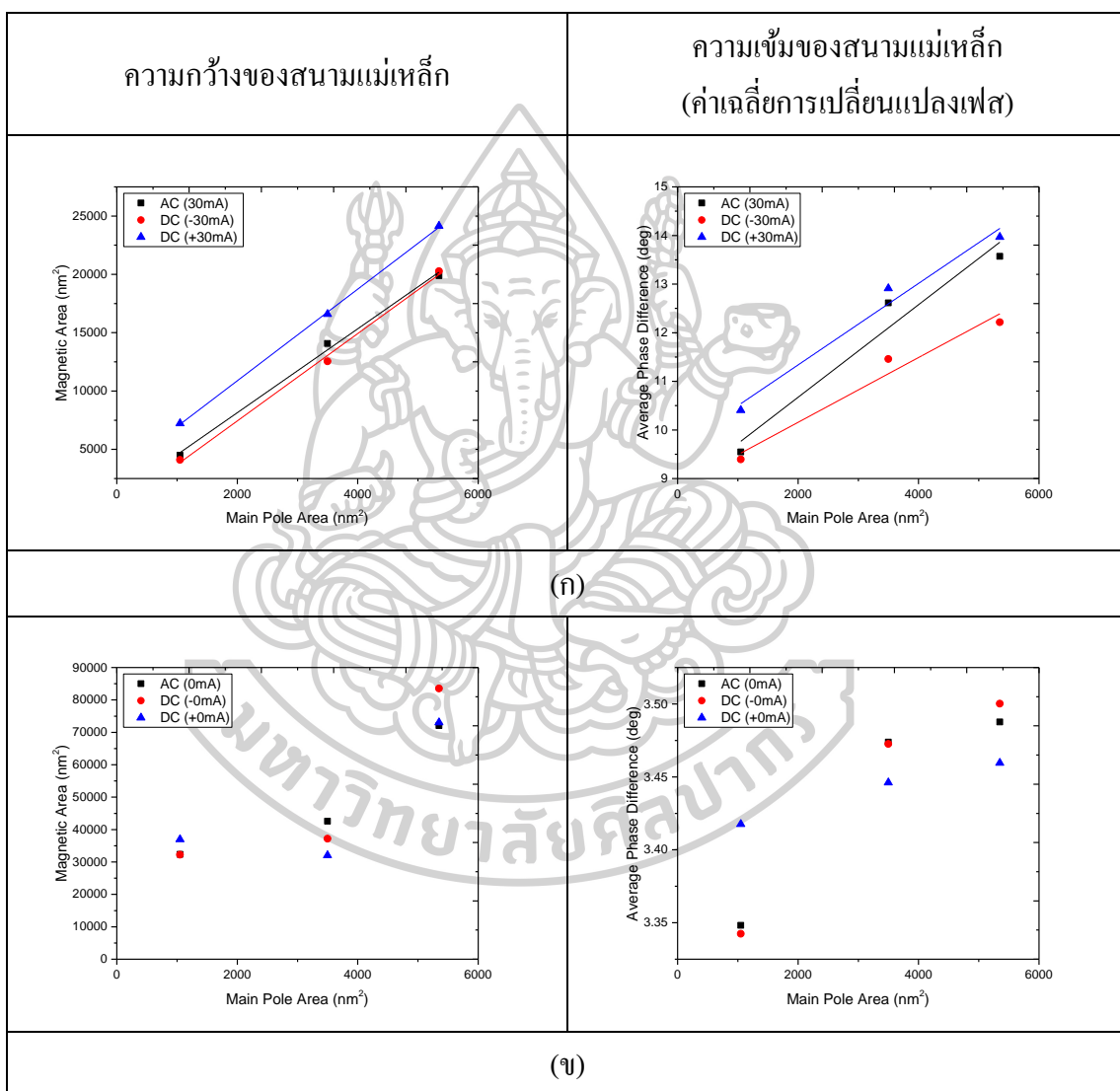


รูปที่ 4.9 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กขณะจ่ายกระแสตรงและสลับ



รูปที่ 4.10 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กหลังการจ่ายกระแสตรงและสลับ

จากที่กล่าวไปแล้วว่าการเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันของหัวเขียนในระหว่างการทดสอบการทำงาน สามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA เพื่อให้หัวเขียนเกิดการอิ่มตัว ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA ในการเปรียบเทียบขนาดของหัวเขียนต่อความกว้างของสนามแม่เหล็ก และเปรียบเทียบขนาดของหัวเขียนต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและสลับดังรูปที่ 4.11



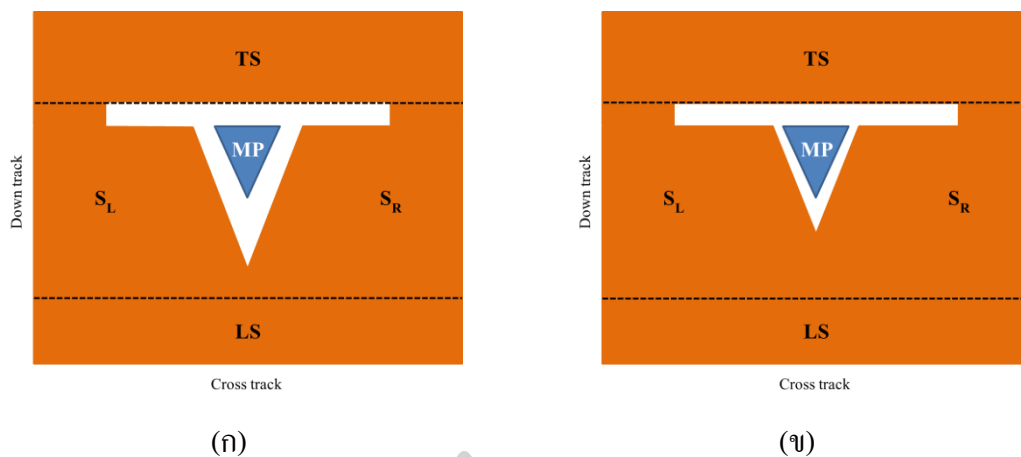
รูปที่ 4.11 กราฟความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อ (ก) จ่ายกระแส และ (ข) หลังการจ่ายกระแส

จากรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) พบว่า เมื่อขนาด MP ของหัวเขียนเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาขณะที่มีการจ่ายกระแสพบว่า กระแสตรงทางบวกส่งผลให้ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่ากระแสตรงทางลบและกระแสสลับ โดยกระแสสลับจะมีค่าอยู่ระหว่างกระแสตรงทั้งสอง ซึ่งเกิดจากการจ่ายกระแสตรงทางลบและทางบวกสลับไปมาอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กคงค้างหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กพบว่า ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อหัวเขียนมีขนาด MP เพิ่มขึ้น

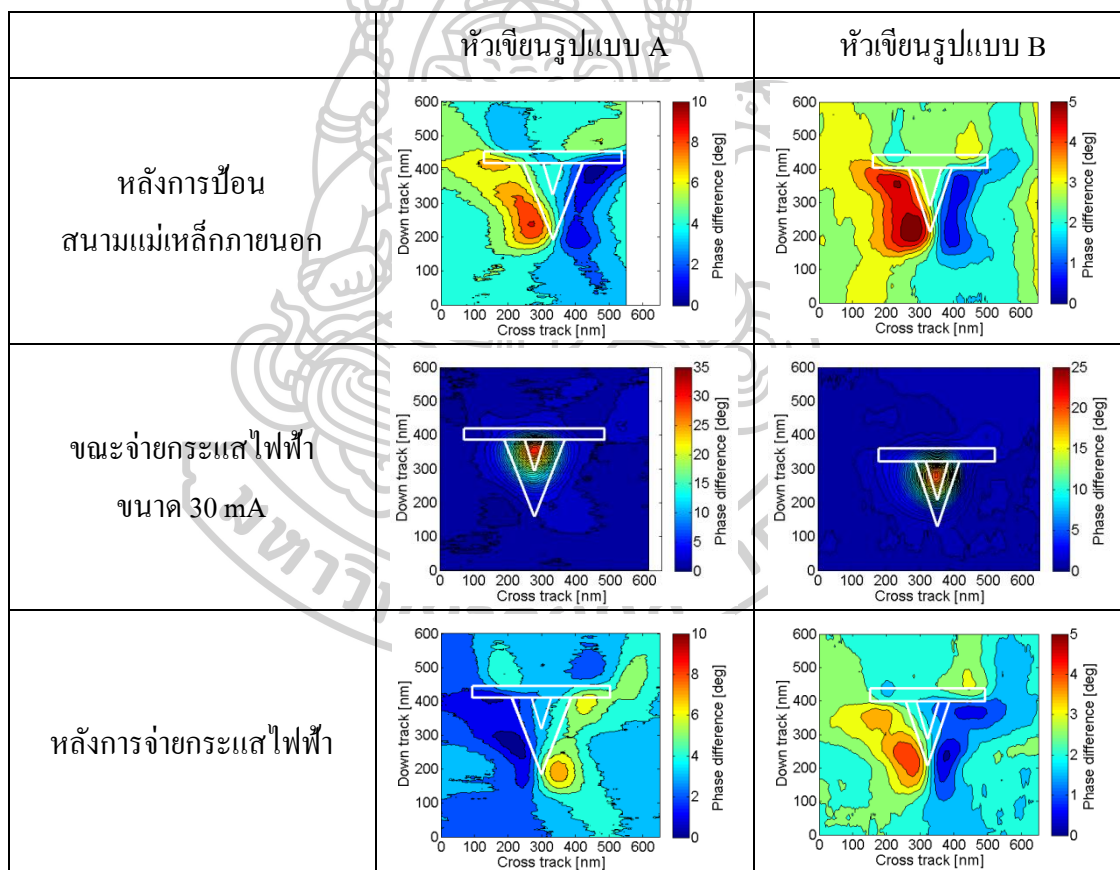
4.3 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียน

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีการพัฒนาหัวเขียนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน เพื่อให้สนามแม่เหล็กมีขนาดเล็กหรือใช้พื้นที่ในการบันทึกน้อยลง โดยการพัฒนาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของหัวเขียน [24, 25] เช่นการลดขนาดของ MP หรือแม้แต่การลดช่องว่างระหว่าง MP กับชิลด์ล้อมรอบ สำหรับการทำให้สนามแม่เหล็กออกจาก MP น้อยลง หรือสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าสู่ชิลด์มากกว่าที่จะพุ่งเข้าสู่แผ่นบันทึก ตามลำดับ ซึ่งการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของหัวเขียนอาจส่งผลต่อการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้าง ดังนั้นในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาหัวเขียนที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ หัวเขียนที่มีช่องว่างระหว่าง MP กว้างและแคบ (พื้นที่สีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 4.12

การศึกษานสนามแม่เหล็กคงค้างในหัวข้อนี้จะศึกษาเฉพาะการคงค้างที่เกิดขึ้นจากกระบวนการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากซ้ายไปขวาขนาด 1 Tesla สำหรับการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันของหัวอ่าน และการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 30 mA ซึ่งเป็นกระแสที่สามารถทำให้หัวเขียนเกิดการอิ่มตัว ดังผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยผลการตรวจวัดหัวเขียนตัวอย่างทั้ง 2 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 4.13



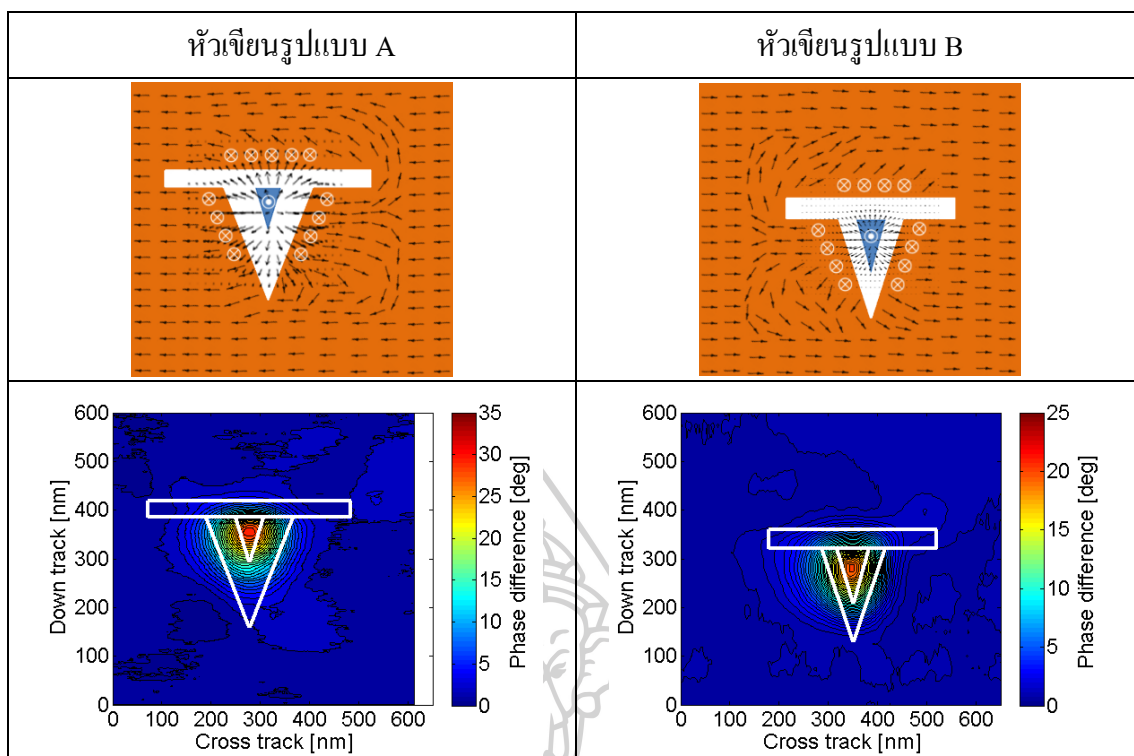
รูปที่ 4.12 ลักษณะ โครงสร้างหัวเขียนกำหนดให้ (ก) รูปแบบ A และ (ข) รูปแบบ B



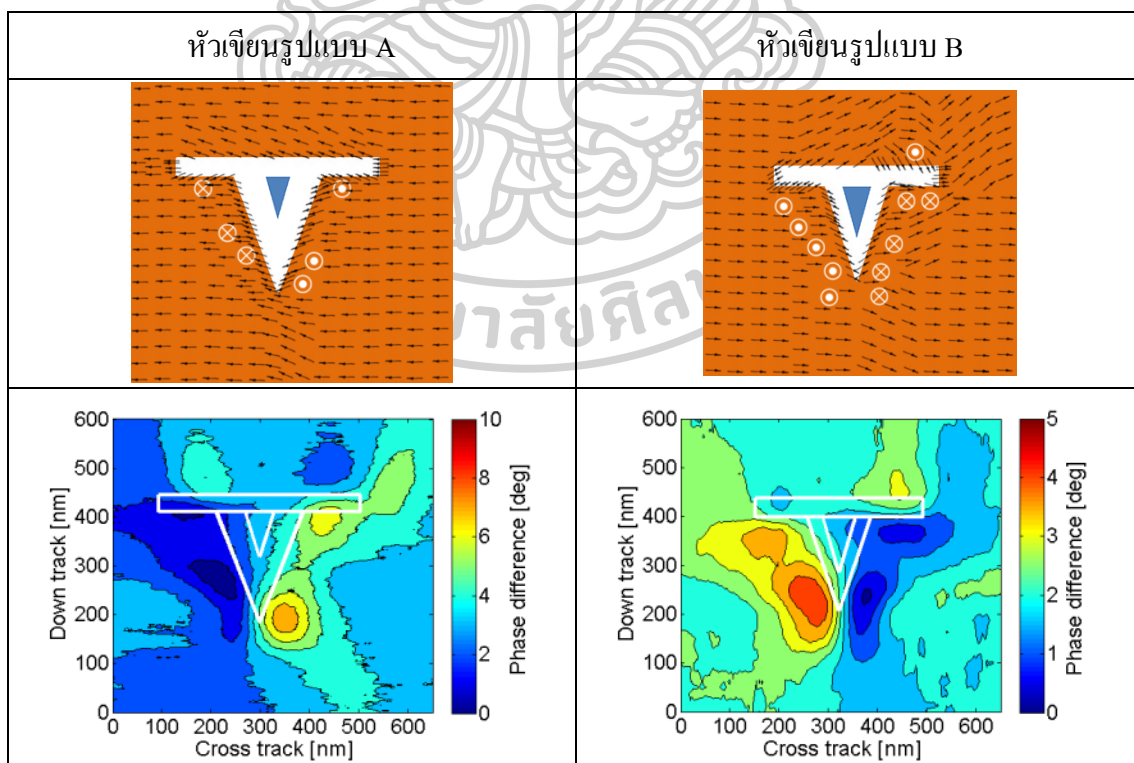
รูปที่ 4.13 ภาพแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนรูปแบบ A และ B

จากรูปที่ 4.13 พบว่า หัวเขียนรูปแบบ A มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามแม่เหล็ก อยู่ในช่วง 0 – 35 องศา ในกรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน และ 0 – 10 องศา ในกรณีที่เกิดสนามแม่เหล็กคงค้าง ซึ่งช่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสทั้งสองกรณีมีค่าที่มากกว่าหัวเขียนรูปแบบ B เสมอ สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงเฟสของหัวเขียนรูปแบบ B ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 – 25 องศา เมื่อหัวเขียนได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้า และ 0 – 5 องศา ในกรณีที่เกิดสนามแม่เหล็กคงค้าง ซึ่งพิจารณาได้ว่าหัวเขียนรูปแบบ A มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหัวเขียนรูปแบบ B โดยคาดว่าเป็นผลมาจากช่องว่างระหว่าง MP กับซิลด์ล้อมรอบ ที่ส่งผลให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางการกระจายตัวหรือแม่แต่การรักษาพลังงานรวมภายในของระบบที่ต่างกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาพสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากซ้ายไปขวา ดังเกิดว่าสนามแม่เหล็กคงค้างเกิดขึ้นที่บริเวณซิลด์ฝั่งซ้ายของหัวเขียนเช่นเดียวกันทั้งสองรูปแบบ ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวัดสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าในหัวข้อที่ 4.1 และจากการพิจารณาภาพสนามแม่เหล็กในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนพบว่า มีรูปแบบความกว้างของสนามแม่เหล็กที่คล้ายกัน โดยมีลักษณะที่พุ่งออกมาจาก MP และพุ่งเข้าสู่ซิลด์ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนแม่เหล็ก กลับพบว่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบริเวณซิลด์จะอยู่ในฝั่งตรงข้ามกัน ซึ่งพิจารณาได้ว่าในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กนั้น แมกนีไทเซชันภายในซิลด์ของหัวเขียนอาจจะถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าและส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวหรือการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันเมื่อหัวเขียนแม่เหล็กมีรูปแบบต่างกัน เนื่องจาก โครงสร้างที่ต่างกันจะส่งผลต่อการรักษาระดับพลังงานรวมภายในระบบให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งขึ้นกับพลังงานแม่เหล็กทั้ง 4 ชนิด ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันสามารถแสดงดังรูปที่ 4.14 (เมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้น) ดังนั้นเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนจึงส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่ตำแหน่งแตกต่างกันดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเมื่อมีการจ่ายกระแส 30 mA

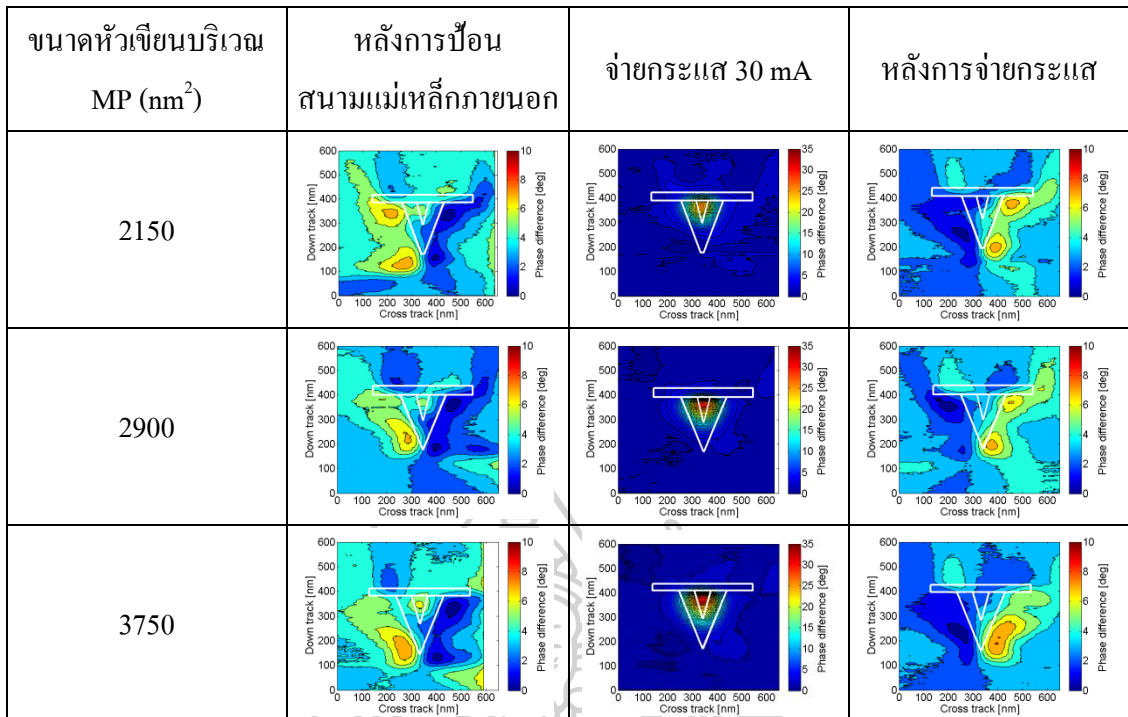


รูปที่ 4.15 การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันหลังหยุดจ่ายกระแส 30 mA

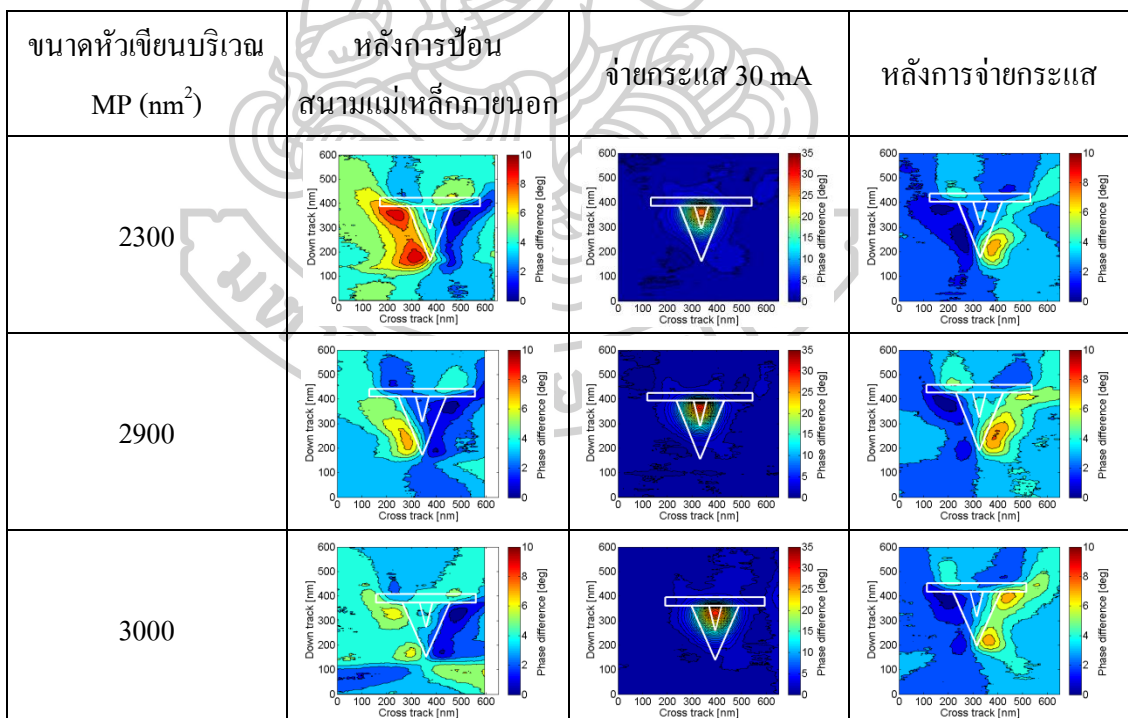
4.4 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สต่างชนิด

ในปัจจุบันการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการทำความสะอาดผิวงานได้อีกด้วย [26] แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สยังคงส่งผลต่อพื้นผิวโดยตรง [27-30] ซึ่งอาจส่งผลต่อสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่แตกต่างกัน โดยในภาคอุตสาหกรรมการผลิต HDD ได้มีการศึกษาผลของแก๊สที่ใช้ในการปรับสภาพผิวหน้าของหัวเขียนต่อประสิทธิภาพการทำงานของหัวเขียนแม่เหล็ก เนื่องจากการปรับสภาพผิวหน้าของหัวเขียนแม่เหล็กที่ไม่ได้คุณภาพ เช่น ความเรียบ ความลึก รวมถึงมุมที่เกิดขึ้น จะส่งผลโดยตรงต่อการบินของหัวเขียนแม่เหล็กในขณะใช้งาน [31] นอกจากนี้ปริมาณหรือพารามิเตอร์ที่ได้รับความสนใจคือ การคงค้างของสนามแม่เหล็ก

จากการศึกษาพบว่า แก๊สที่มีส่วนผสมของซิโนอนจะส่งผลให้มีอัตราการปรับสภาพผิวที่ดี [28] ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สสูตร A ที่ไม่มีส่วนผสมของซิโนอน และแก๊สสูตร B ที่มีส่วนผสมของซิโนอน โดยหัวเขียนตัวอย่างที่นำมาศึกษาเป็นหัวเขียนที่ได้จากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ซึ่งหัวเขียนดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 จะใช้แก๊สสูตร A ในการปรับสภาพพื้นผิวของหัวเขียนที่มีขนาด MP เฉลี่ยอยู่ที่ 2150 2900 และ 3750 nm^2 ตามลำดับ และกลุ่มที่ 2 จะใช้แก๊สสูตร B ในการปรับสภาพพื้นผิวของหัวเขียนที่มีขนาด MP เฉลี่ยอยู่ที่ 2300 2900 และ 3000 nm^2 ตามลำดับ โดยการศึกษาในหัวข้อนี้หัวเขียนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากขั้วไปขวขนาด 1 Tesla และการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA ผลการตรวจวัดสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กที่ได้รับการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สสูตร A และ B แสดงดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนเมื่อใช้แก๊สสูตร A



รูปที่ 4.17 ภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนเมื่อใช้แก๊สสูตร B

จากการพิจารณารูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าอิทธิพลของแก๊สที่ใช้ในการปรับสภาพผิวหน้าหัวเขียนทั้งสองชนิดไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่เมื่อพิจารณาภาพแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นหลังจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกพบว่า หัวเขียนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแก๊สสูตร A จะเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ MP และจะชัดเจนขึ้นเมื่อขนาดของ MP เพิ่มขึ้น ในขณะที่หัวเขียนได้รับแก๊สสูตร B ไม่พบสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ MP แต่จะเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างความเข้มสูงที่บริเวณ ซิลด์ฝั่งซ้าย (ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วง 7 – 10 องศา) ในกรณีที่หัวเขียนมีขนาด MP 2300 nm² และเมื่อหัวเขียนมีขนาด MP ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มลดลง แต่อย่างไรก็ตามความเข้มของสนามแม่เหล็กคงค้างส่วนใหญ่ที่ตรวจวัดได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วง 5 – 7 องศา)

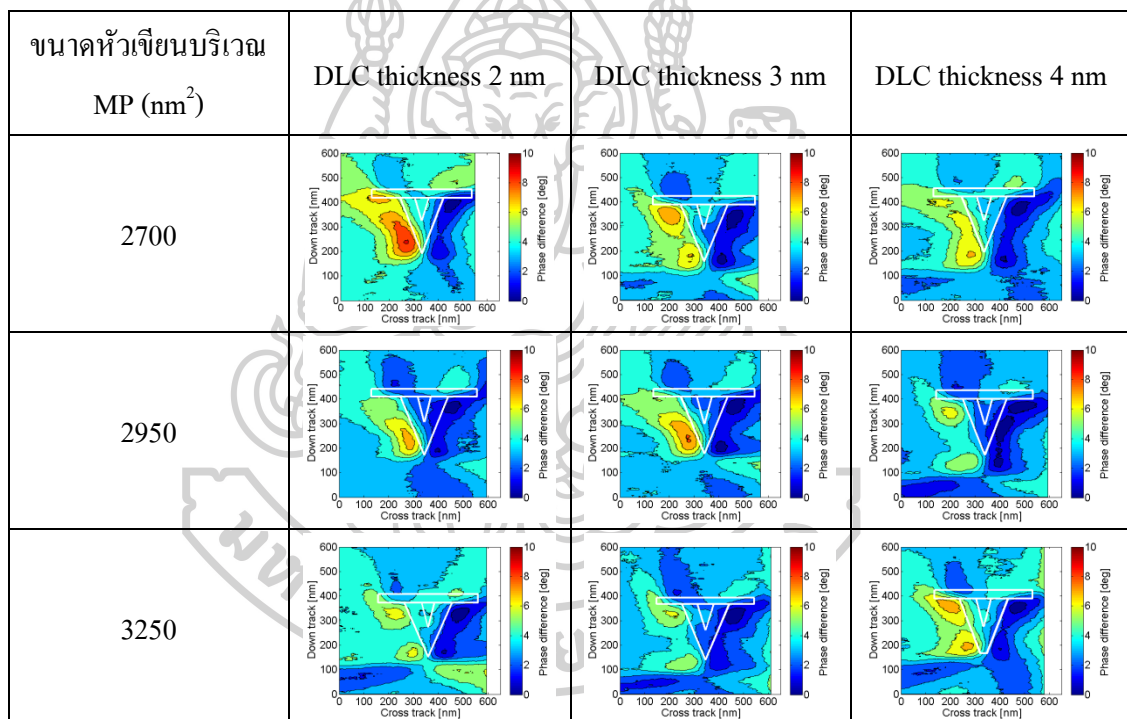
จากการพิจารณาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเลือกใช้แก๊สที่มีส่วนผสมของซิโนนหรือแก๊สสูตร B มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้แก๊สสูตร A เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ สำหรับการปรับสภาพความเป็นแม่เหล็กของหัวอ่านดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1 ดังนั้นการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่ MP จึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้อนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กละมาปนเปื้อนบนหัวเขียนแม่เหล็กได้ ในขณะที่หัวเขียนที่ถูกปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สสูตร B จะเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่มีความเข้มสูงในบริเวณซิลด์แคบข้างตัวอย่างของหัวเขียนเท่านั้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กคงค้างส่วนใหญ่มีความเข้มที่น้อยและไม่พบที่ MP

4.5 การศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ำยเพชร

ในอุตสาหกรรม HDD ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของหัวเขียนที่ผ่านกระบวนการเคลือบคาร์บอนคล้ำยเพชร (DLC) ที่ความหนาต่างกัน จากการศึกษพบว่า DLC คือสารคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบแกรไฟต์และเพชรรวมกัน [32] โดยหากนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบาง (thin film) ก็จะได้ฟิล์มบางที่มีความเรียบสูง (superior smoothness) และมีความแข็งแรง (hardness) [33] ซึ่งเหมาะแก่การใช้เคลือบป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุของการกัดกร่อน (corrosion) [33-35] นอกจากนี้ยังสามารถที่จะใช้ในการ

ป้องกันการปนเปื้อนอนุภาคขนาดเล็กบนหัวเขียนแม่เหล็กได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบ DLC อาจส่งผลกระทบต่อการเกิดสนามแม่เหล็กหรือการคงค้างได้ [34] ดังนั้นสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นจึงเป็นปริมาณหรือพารามิเตอร์ที่ได้รับความสนใจ

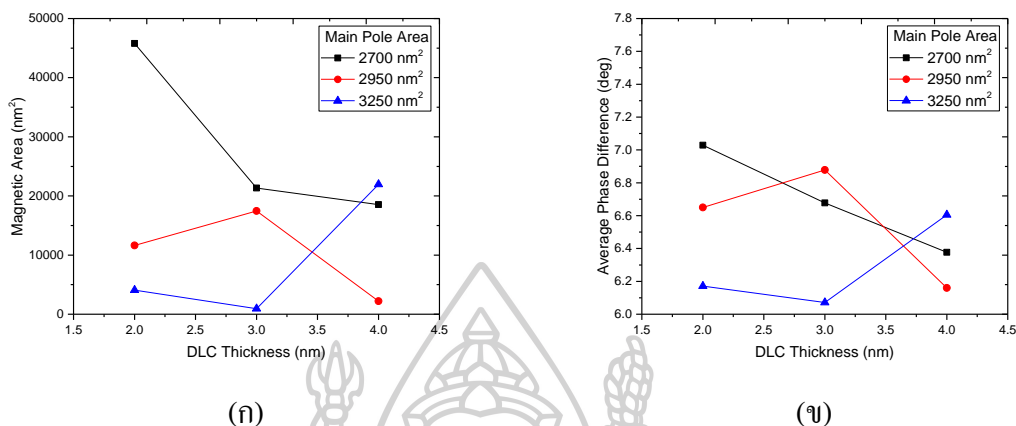
โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนเมื่อมีการเคลือบชั้น DLC ที่ความหนาต่างกันคือ 2 3 และ 4 nm ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้รับตัวอย่างหัวเขียนจากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ซึ่งหัวเขียนดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ในแต่ละกลุ่มจะมีหัวเขียน 3 ขนาดคือ 2700 2950 และ 3250 nm^2 ตามลำดับ โดยผลการตรวจวัดสนามแม่เหล็กคงค้างในกรณีหลังป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากซ้ายไปขวาแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ภาพแม่เหล็กคงค้างหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกของหัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน

จากการพิจารณารูปที่ 4.18 พบว่า หลังกระบวนการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากซ้ายไปขวาขนาด 1 Tesla ให้แก่หัวเขียน ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณซิลด์ฝั่งซ้าย เช่นเดียวกันกับการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 นอกจากนี้ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส) ที่ตรวจวัดได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการคำนวณพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กและหาค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟสเพื่อใช้ในการ

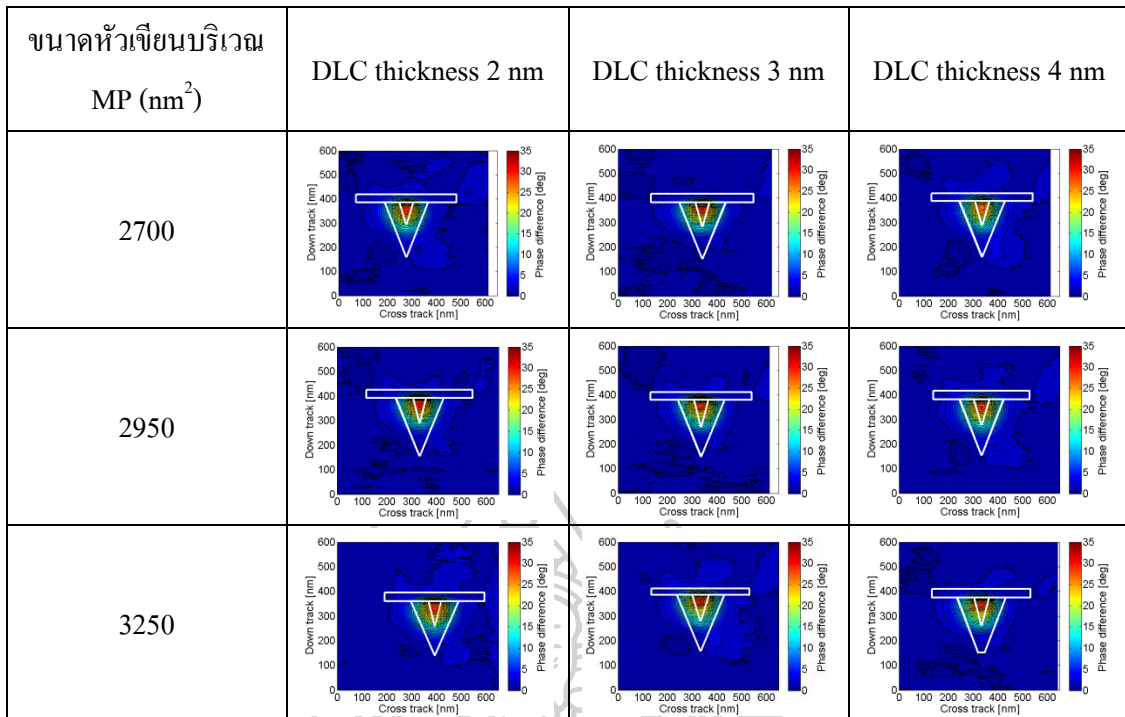
พล็อตกราฟ สำหรับตรวจสอบความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อสาร DLC ที่เคลือบให้แก่หัวเขียนมีความหนาที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.19



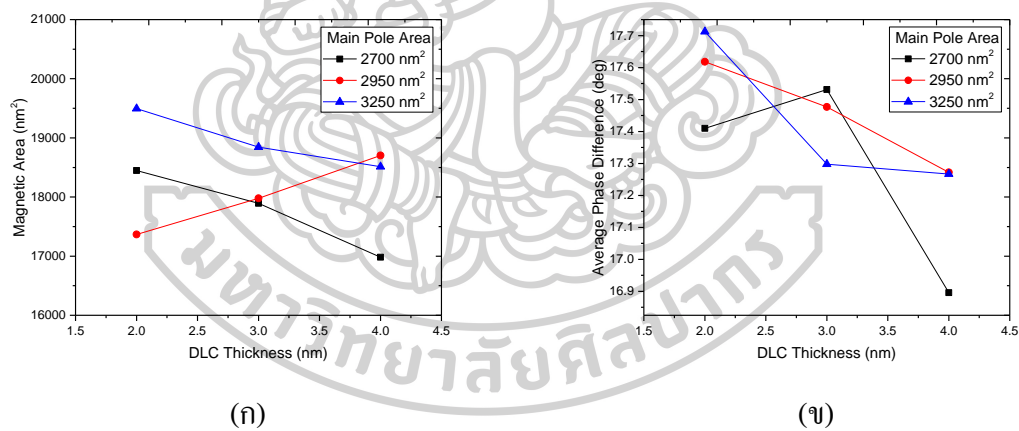
รูปที่ 4.19 กราฟหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน (ก) ความกว้างของสนามแม่เหล็ก และ (ข) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากกราฟในรูปที่ 4.19 สามารถพิจารณาได้ว่าการเพิ่มความหนาของชั้น DLC เปรียบเสมือนการเพิ่มระดับความสูงในการสแกน ซึ่งส่งผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส) และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าไม่มากพอก็จะส่งผลให้ความกว้างของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าหัวเขียนที่มีขนาด 3250 nm² มีแนวโน้มของความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากหัวเขียนมีโครงสร้างที่เหมาะสมและตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี

ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.20 สังเกตว่าในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนที่มีขนาด MP เท่ากันแต่ความหนา DLC ต่างกัน หรือความหนา DLC เท่ากันแต่ขนาด MP ต่างกัน พบว่า ความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจาก MP ไม่มีความแตกต่างกัน แต่หากสังเกตที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (สี) จะพบว่ามีความเข้มที่ลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการคำนวณพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.21



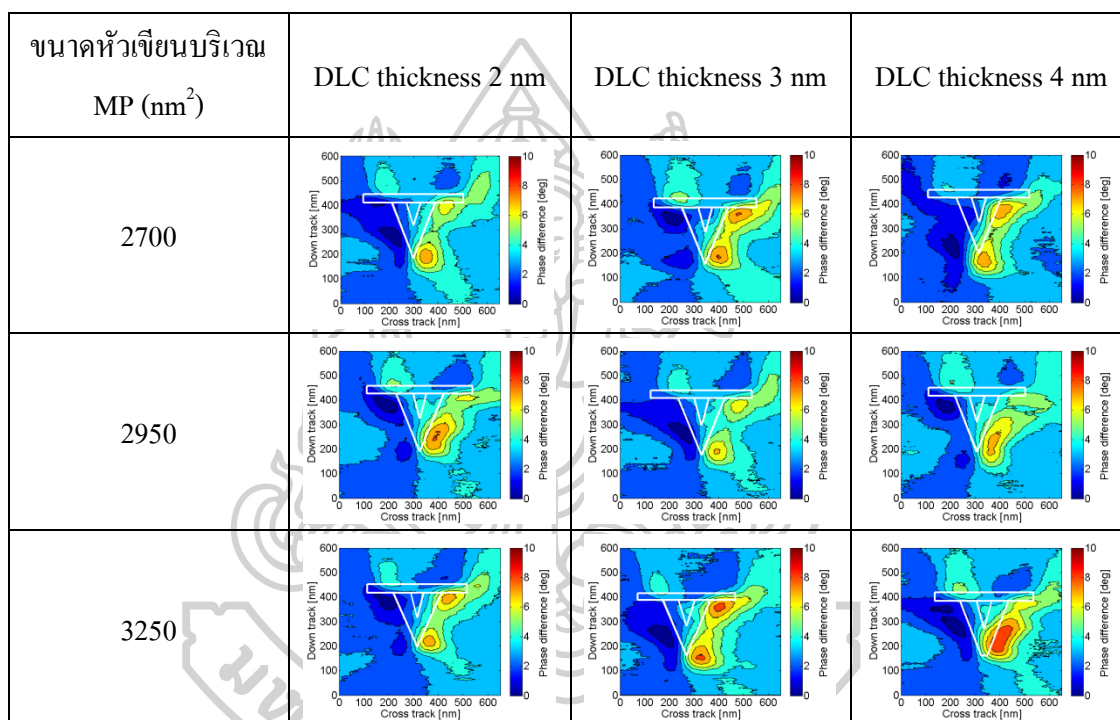
รูปที่ 4.20 ภาพแม่เหล็กขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน



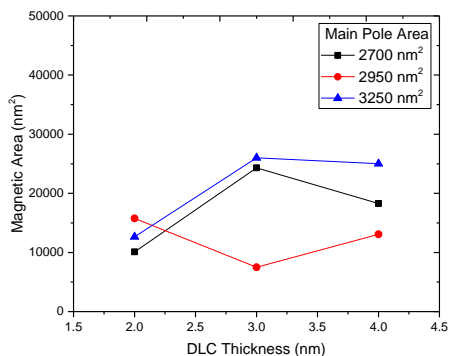
รูปที่ 4.21 กราฟขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน (ก) พื้นที่การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และ (ข) ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส

จากการพิจารณารูปในรูปที่ 4.21 พบว่า พื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า หัวเขียนแม่เหล็กที่มีขนาด MP 2950 nm² มีความกว้างของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มมากขึ้น แต่ความเข้มที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของหัวเขียนที่ความเหมาะสมรวมถึงความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าที่มากเพียงพอ

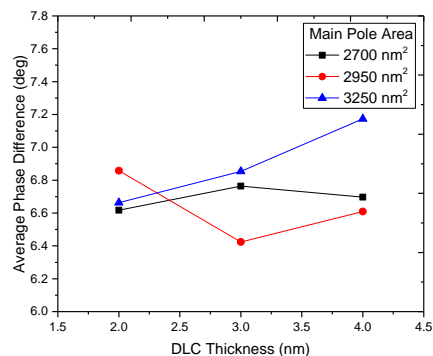
สุดท้ายเมื่อหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 4.22 สังเกตว่าบริเวณที่เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างสามารถพบได้ที่บริเวณซิลด์ฝั่งขวา ซึ่งอาจเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดภายในหัวเขียนดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3 นอกจากนี้สังเกตว่าลักษณะของสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์จากรูปภาพแม่เหล็กเป็นไปได้ยาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการคำนวณพื้นที่ความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกัน โดยผลแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ภาพแม่เหล็กคงค้างหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 กราฟหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าของหัวเขียนที่เคลือบความหนา DLC ต่างกัน (ก) พื้นที่การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (ข) ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส

จากการพิจารณารูปที่ 4.23 พบว่า ความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้หัวเขียนที่มีขนาด MP 2950 nm² พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลง โดยกราฟที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะตรงกันข้ามกับกราฟในรูปที่ 4.19 ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างของหัวเขียนมีการตอบสนองต่อการเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่หัวเขียนมีทิศทางขนานไปในแนวครอสเทิร์ก แต่การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนเป็นการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z นอกจากนี้อาจรวมถึงสาร DLC ที่ใช้ในการเคลือบหัวเขียนแม่เหล็ก ที่อาจส่งผลต่อโครงสร้างผลึกแอนไอโซโทรปีของหัวเขียนและชนิดของวัสดุ [34] ดังนั้นจึงทำให้เกิดลักษณะการคงค้างที่แตกต่างกัน [2]

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กในด้านของ ABS โดยการใช้อุปกรณ์จูลทรสแนร์แรงแม่เหล็ก เนื่องจากสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กในขั้นตอนของการผลิต และการเกิดปรากฏการณ์ลบลข้อมูลที่ถูกเขียนก่อนหน้า (EAW) ในการใช้งานจริงได้ ปัจจัยการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่ผู้วิจัยทำการศึกษาได้แก่ (1) การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่หัวเขียนในขั้นตอนของกระบวนการปรับสภาพความเป็นแม่เหล็กของหัวอ่าน และ (2) การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียนในระหว่างการทดสอบการทำงานจริงหรือการใช้งานจริง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นเมื่อ (1) หัวเขียนแม่เหล็กมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน (2) หัวเขียนแม่เหล็กที่ถูกปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สต่างชนิด และ (3) หัวเขียนแม่เหล็กที่มีการเคลือบชั้น DLC ที่ความหนาต่างกัน โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะอยู่ในรูปแบบข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ สำหรับการสร้างภาพแม่เหล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงเฟส) ในบางส่วนของการศึกษาอีกด้วย

การศึกษาผลการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างหลังจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1 Tesla ให้แก่หัวเขียนแม่เหล็ก พบว่าตำแหน่งการคงค้างของสนามแม่เหล็กขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งหมายความว่าเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางจากซ้ายไปขวา ตำแหน่งการคงค้างจะเกิดขึ้นที่ซิดด์ฝั่งซ้ายของหัวเขียน ในทางกลับกันหากทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากขวาไปซ้ายจะพบการคงค้างที่ซิดด์ฝั่งขวา นอกจากนี้ยังพบการคงค้างที่ตำแหน่งบริเวณ MP และ TS ในตัวอย่างหัวเขียนบางตัว ซึ่งเป็นผลที่อาจเกิดขึ้นจากโครงสร้างผลึกแอนไอโซโทรปีของหัวเขียนและซิดด์ของวัสดุ [2] ตลอดจนขนาดของ MP ต่อความยาวปลายโพลอยในระดับที่เหมาะสม [1]

ต่อมาเมื่อศึกษาการคงค้างที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดและชนิดต่างกัน ให้แก่หัวเขียนแม่เหล็ก พบว่าในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า หัวเขียนแม่เหล็กจะเริ่มอึดตัวเมื่อกระแสมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 20 mA โดยชนิดของกระแสตรงทางบวก กระแสสลับ และกระแสตรงทางลบ ส่งผลต่อความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากมากไปน้อยตามลำดับ เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนพบว่ามีลักษณะการเกิดแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งไม่สามารถที่จะคาดเดาได้ เนื่องจากการคงค้างสามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายส่วน เช่น รูปทรงของหัวเขียนหรือแม่เต้สารแม่เหล็กที่ใช้ในการสร้างหัวเขียน นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบผลของขนาดหัวเขียนต่อการคงค้างโดยเลือกเฉพาะการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA พบว่าความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดพื้นที่ MP เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีที่มีการจ่ายกระแสและหลังการจ่ายกระแสให้หัวเขียน

จากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กมีผลต่อตำแหน่งการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างกันให้หัวเขียนส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างแบบไม่เป็นเชิงเส้น แม้ว่าหัวเขียนจะเริ่มอึดตัวที่กระแส 20 mA แล้วก็ตาม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากซ้ายไปขวา และการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 30 mA สำหรับเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบนหัวเขียนที่มีรูปแบบต่างกัน เนื่องจากในปัจจุบันหัวเขียนแม่เหล็กมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความกว้างของสนามแม่เหล็กสำหรับการเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูล โดยหัวเขียนที่ผู้วิจัยนำมาศึกษาได้แก่ หัวเขียนรูปแบบ A และหัวเขียนรูปแบบ B ที่มีช่องว่างระหว่าง MP กว้างและแคบ ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าหัวเขียนรูปแบบ B มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต่ำกว่าหัวเขียนรูปแบบ A เสมอ ซึ่งสังเกตได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของหัวเขียนรูปแบบ B เมื่อได้รับการป้อนกระแสไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 25 องศา และในกรณีการคงค้างจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 5 องศา แต่หัวเขียนรูปแบบ A จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสอยู่ในช่วง 0 – 35 องศา เมื่อได้รับการจ่ายกระแส และกรณีคงค้างจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 10 องศา นอกจากนี้ยังพบว่า สนามแม่เหล็กภายนอกส่งผลให้หัวเขียนทั้งสองรูปแบบมีการคงค้างที่ตำแหน่งซิลด์ฝั่งซ้ายเหมือนกัน แต่ในกรณีหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าตำแหน่งการคงค้างของสนามแม่เหล็ก

สามารถพบได้ที่ซิลด์ในฝั่งตรงข้ามกัน ซึ่งอาจเกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันภายในซิลด์มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันเมื่อหัวเขียนมีรูปแบบที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาผลการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนแม่เหล็กที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้าด้วยแก๊สสูตร A (ไม่มีส่วนผสมของซิโนน) และ แก๊สสูตร B (ที่มีส่วนผสมของซิโนน) ซึ่งแก๊สที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันอาจจะส่งผลให้เกิดการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างกัน โดยผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าในกรณีจ่ายกระแสไฟฟ้าสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนมีลักษณะที่คล้ายกัน และเมื่อหยุดการจ่ายกระแสพบว่าตำแหน่งการคงค้างของสนามแม่เหล็กสามารถพบได้ที่ตำแหน่งเดียวกันคือ ซิลด์ฝั่งขวา แต่ในกรณีการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกพบว่าหัวเขียนแม่เหล็กที่ถูกปรับสภาพด้วยแก๊สสูตร A มีการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางโพลและมีแนวโน้มชัดเจนขึ้นเมื่อขนาด MP เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อใช้แก๊สสูตร B และไม่พบสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ MP ดังนั้นแก๊สสูตร B จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งานมากกว่าแก๊สสูตร A

สุดท้ายเมื่อทำการศึกษาผลการเกิดสนามแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนที่มีการเคลือบสาร DLC ที่ความหนาต่างกัน พบว่าความกว้างของสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กมีแนวโน้มน้อยลง เมื่อความหนาของ DLC เพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีหลังการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกหรือแม้แต่กรณีจ่ายกระแสให้แก่หัวเขียน ซึ่งสังเกตได้จากสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กลดลงประมาณ 20000 nm^2 และความเข้ม (ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส) ลดลงประมาณ 0.6 องศา ในขณะที่หัวเขียนที่ได้รับการป้อนกระแสไฟฟ้าจะมีพื้นที่ความกว้างของสนามแม่เหล็กลดลงประมาณ 1500 nm^2 และความเข้ม (ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส) ลดลงประมาณ 0.5 องศา ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากความหนาของ DLC ทำให้ระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับหัววัดเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อแรงทางแม่เหล็ก แต่ในกรณีหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าพบว่าความกว้างของสนามแม่เหล็กคงค้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กคงค้างมีแนวโน้มน้อยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าที่ตรงข้ามกับแนวโน้มน้อยความกว้างและความเข้มของสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นหลังจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก

การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ สามารถที่จะใช้ในการศึกษา
สนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนในด้าน ABS ได้ โดยในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษา
สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากปัจจัย (1) การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก และ (2) การจ่าย
กระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียน ซึ่งในอนาคตเราสามารถที่จะใช้ในการศึกษานสนามแม่เหล็กที่รั่วไหลที่
บริเวณอื่น ๆ บนหัวเขียนที่เป็นสาเหตุของปัญหาการรบกวนข้อมูลข้างเคียงได้ นอกจากนี้การศึกษาน
สนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้นบนหัวเขียนที่มีรูปแบบต่างกัน ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวหน้า
ต่างกัน หรือแม้แต่ผ่านกระบวนการเคลือบชั้นป้องกันต่างกัน สามารถที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการ
พัฒนาหัวเขียนในอนาคตได้ และอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวบน
หัวเขียนด้วยเทคนิคอื่น สำหรับการเปรียบเทียบลักษณะของสนามแม่เหล็กคงค้างที่เกิดขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] S. P. Mohammed and R. H. Victora, "Simulation of Erase After Write on 2.4 T FeCo Solid Pole Writer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 5, pp. 1212-1219, 2010.
- [2] Z. Yuchen and Z. Jian-Gang, "Perpendicular write head remanence characterization using a contact scanning recording tester," *APPLIED PHYSICS*, 2005.
- [3] E. A. Dobisz, Z. Z. Bandic, W. Tsai-Wei, and T. Albrecht, "Patterned Media: Nanofabrication Challenges of Future Disk Drives," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 11, pp. 1836-1846, 2008.
- [4] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley, 2011.
- [5] S. V. Tyblikov and A. Tybulewicz, *Methods in the quantum theory of magnetism*. New York : Plenum Press, c1967., 1967.
- [6] A. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2009.
- [7] N. J. Gokemeijer, T. W. Clinton, T. M. Crawford, and M. Johnson, "Direct measurement of the field from a magnetic recording head using an InAs Hall sensor on a contact write/read tester," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 290-291, pp. 254-256, 2005.
- [8] V.L.Mirinirov, *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*. Russia , Nizhny Novgorod: The Russian Academy of Sciences Institute of Physics of Microstructures, 2004.
- [9] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe, "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution," *Applied Physics Letters*, vol. 50, no. 20, pp. 1455-1457, 1987.
- [10] S. Suping, G. Lijie, L. Shaoping, and M. Sining, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.
- [11] Z. Yuchen and Z. Jian-Gang, "Effect of pole-tip size on perpendicular recording head remanence," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 12, pp. 4449-4453, 2005.
- [12] K. Takata, "Domain structures of a main pole tip in a hard disk drive observed by magnetic strain imaging," *Surface and Interface Analysis*, vol. 46, no. 12-13, pp. 1257-1261, 2014.
- [13] M. A. Bashir *et al.*, "Head and bit patterned media optimization at areal densities of 2.5Tbit/in² and beyond," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, no. 3, pp. 269-275, 2012.
- [14] K. Takano, "Magnetization dynamics of perpendicular writers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 287, pp. 346-351, 2005.
- [15] K. Takano, "Micromagnetic-FEM models of a perpendicular writer and reader," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 2, pp. 696-701, 2005.
- [16] S. MICHAL, "CHARACTERIZATION OF MAGNETIC NANOSTRUCTURES BY MAGNETIC FORCE MICROSCOPY," Bc. Faculty of Mechanical, Engineering Institute of Physical engineering, Brno University of Technology, 2014.
- [17] M. Norman, "MAGNETIC STORAGE BACK TO FUNDAMENTALS," *MOSAIC*, vol. 17, no. 3, 1986.
- [18] D. Z. Bai and J.-G. Zhu, "Micromagnetics of perpendicular write heads with extremely small pole tip dimensions," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, p. 6833, 2002.
- [19] M. Mochizuki, C. Ishikawa, Y. Okada, and K. Nakamoto, "Reduction in remanent magnetization using a multi-layered

- single-pole writer," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 287, pp. 372-375, 2005.
- [20] M. Mochizuki, C. Ishikawa, H. Ide, K. Nakamoto, Y. Nakatani, and N. Hayashi, "Remanent head field study of single pole-type head based on micromagnetics," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 10, pp. 6748-6750, 2003.
- [21] D. Z. Bai, Z. Jian-Gang, L. Peng, K. Stoev, and F. Liu, "Writer pole tip remanence in perpendicular recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 3, pp. 473-480, 2006.
- [22] Z. Li, D. Z. Bai, E. Lin, and S. Mao, "Write field asymmetry in perpendicular magnetic recording," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 7, p. 07B713, 2012.
- [23] K. Hirata, T. Roppongi, and K. Noguchi, "A study of pole material properties for pole erasure suppression in perpendicular recording heads," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 287, pp. 352-356, 2005.
- [24] L. Wang, D. Z. Bai, and J. Wang, "Finite Element Modeling of Writer Head Design for Shingled Recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3551-3554, 2012.
- [25] T. Okada *et al.*, "Newly developed wraparound-shielded head for perpendicular recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 2899-2901, 2005.
- [26] M. J. Jae, H. B. Jae, Y. Haldorai, and T. L. Kwon, "An approach to cleaning of dry etching residues with supercritical carbon dioxide."
- [27] T. Jan-Ulrich, B. Margaret E., T. Michael F., and W. Dieter, "Grain Size Control in FePt Thin Films by Ar-Ion Etched Pt Seed Layers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 1271-1273, 2001.
- [28] A. Takashi, H. Youn Gi, and E. Masayoshi, "HIGH-SELECTIVITY REACTIVE ION ETCHING WITH CO/NH₃/Xe GAS FOR MICRO/NANOSTRUCTURING OF 20%Fe-Ni, Au, Pt, AND Cu," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 574-577, 2003.
- [29] D. F. Wang *et al.*, "Magnetic mesa structures fabricated by reactive ion etching with CO/NH₃/Xe plasma chemistry for an all-silicon quantum computer," *Nanotechnology*, vol. 16, no. 6, pp. 990-994, 2005.
- [30] M.Naoe, K.Hamaya, N.Fujiwara, T.Taniyama, Y.Kitamoto, and Y.Yamazaki, "selective dry etching of magnetic thin films for high sensitive magnetoresistive sensor," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 235, pp. 223-226, 2001.
- [31] Z. Mingsheng and L. Bo, "Effect of pattern shape on etching wall profile in slider fabrication," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 303, no. 2, pp. e106-e109, 2006.
- [32] K. P. Furlan, A. N. Klein, and D. Hotza, "diamond-like carbon films deposited by hydrocarbon plasma sources," pp. 165-172, 2013.
- [33] A. C. Ferrari, "Diamond-like carbon for magnetic storage disks," *Surface and Coatings Technology*, vol. 180-181, pp. 190-206, 2004.
- [34] S. N. Piramanayagam, M. Shakerzadeh, B. Varghese, and H. K. Tan, "Effect of Carbon Overcoat Implantation on the Magnetic and Structural Properties of Perpendicular Recording Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [35] C.-K. Lee, "Electrochemical Corrosion and Wear Behavior of an Ultra-thin DLC Film Deposited on Different Annealing Ni-P Layers on Al- Mg Alloy in NaCl Solution," *International Journal of Electrochemical Science*, pp. 5983-5998, 2016.



ภาคผนวก (ก)

คำสั่งการสร้างภาพแม่เหล็กด้วยโปรแกรมแมทแลบ (matrix laboratory, MATLAB)

```

% contour plot of MFM compare SEM %

clear all

clc; clf;

close all

mfmpphase = csvread('C:\Users\Desktop\namefile.csv');

mfmdata.phase = mfmpphase

sem = imread('C:\Users\Desktop\namefile.tif');

sem = flipdim(sem,1);

mfmm = mfmdata.phase;

[numy,numx] = size(mfmm);

sizex = 800e-9;    %defined in MFM measurements
sizey = 800e-9;    %defined in MFM measurements

xstep = sizex/numx;
ystep = sizey/numy;

cut_data = 50;

numx=numx-cut_data;

%find maximum amplitude %

y = min(mfmm,[],2);    %down track data
x = min(mfmm,[],1);    %cross track data

%locate the maximum peak postion x and y %

peak_posx = find(y == min(min(mfmm,[],2)));

peak_posy = find(x == min(min(mfmm,[],1)));

max_data = max(max(mfmm,[],2));

min_data = min(min(mfmm,[],2));

% set zero base line %

mfmm= mfmm-max_data;

```

```

[numys,numxs] = size(sem);

sizexs = 675e-9;    %defined in SEM measurements
sizeys = 675e-9;    %defined in SEM measurements

xsteps = sizexs/numxs;

ysteps = sizeys/numys;

% Moving Avg. %

Moving_Avg = 7;

Lines = 5;

% Bundle %

Count = numy-Lines-1;

for Bundle_No=1:Count
    y = -mfm(Bundle_No : Bundle_No + Lines-1,:);
    Bundle_line(Count - (Bundle_No - 1),:) = [(sum(y,1) - max(y,[],1) - min(y,[],1))/(Lines - 2)];
end

% Bundle_line_moving %

for Bundle_No=1:Count
for moving = 1:numx - ( Moving_Avg - 1 )
    Bundle_line_moving(Bundle_No,moving) = mean(Bundle_line(Bundle_No,moving:moving
+
    Moving_Avg - 1));
end
end

% set contour scale %

[numy_moving,numx_moving] = size(Bundle_line_moving);

v = floor(min(min(Bundle_line_moving,[],2))):1:(max(max(Bundle_line_moving,[],2)));

% Contour Plot Bundle_line_moving in nm scale %

```

```

figure(1)

xplot=[1*xstep*1e9:xstep*1e9:numx_moving*xstep*1e9];
yplot=[1*ystep*1e9:ystep*1e9:numy_moving*ystep*1e9];

[xx,yy] = meshgrid(xplot,yplot);

[C3,h3] =contourf(xx,yy,Bundle_line_moving,v);

view(2)

xmin=100;

xmax=750; %boundary X 650

ymin=50;

ymax=650; %boundary Y 600

xlim= [xmin xmax];

ylim= [ymin ymax];

axis([xlim ylim ]);

set(gca,'xTick',xmin:100:xmax);

set(gca,'xTickLabel',{'0','100','200','300','400','500','600','700','800','900'});

set(gca,'yTick',ymin:100:ymax);

set(gca,'yTickLabel',{'0','100','200','300','400','500','600','700','800','900'});

xlabel(' Cross track [nm]')

ylabel(' Down track [nm]')

caxis([0 35]); % set color bar

colorbar;

h = colorbar;

ylabel(h, 'phase (deg)');

```

```

figure(2)

xplots=[1*xsteps*1e9:xsteps*1e9:numxs*xsteps*1e9];

yplots=[1*ysteps*1e9:ysteps*1e9:numys*ysteps*1e9];

[xxs,yy] = meshgrid(xplots+75,yplots-10);

[C4,h4] = contour(sem);

[C5,h5] =contour(xxs,yy,sem>155,'white');

```

hold on

```

figure(2)

xplot=[1*xstep*1e9:xstep*1e9:numx_moving*xstep*1e9];

yplot=[1*ystep*1e9:ystep*1e9:numy_moving*ystep*1e9];

[xx,yy] = meshgrid(xplot,yplot);

[C1,h2] = contourf(xx,yy,Bundle_line_moving,v);

caxis([0 35]); %%% set color bar

colorbar;

h = colorbar;

ylabel(h, 'phase (deg)');

axis([xlim ylim]);

set(gca,'xTick',xmin:100:xmax);

set(gca,'xTickLabel',{'0','100','200','300','400','500','600','700','800','900'});

set(gca,'yTick',ymin:100:ymax);

set(gca,'yTickLabel',{'0','100','200','300','400','500','600','700','800','900'});

xlabel(' Cross track [nm]')

ylabel(' Down track [nm]')

```



```

%%% % find area % % % % %
count= Bundle_line_moving ;
[py,px] = size(count);
high=0;
for i=1:py
    for jj=1:px
        if (count(i,jj)>= 10)
            high=high+1;
        end
    end
end
format short
num_high=high*xstep*ystep*1e9*1e9
num_high_point=high
%%% % sum phase % % % % %
A = Bundle_line_moving;
A= A>=15;
A = A.*Bundle_line_moving;
AA = sum(A,2);
format longg;
sumphase = sum(AA,1,'double');
%%% % average phase % % % % %
avgphase = sumphase./num_high_point

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภูมินทร์ ดิเรกโรจน์วุฒิ
วัน เดือน ปี เกิด	27 มกราคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 5 ซอยจันทร์43แยก29 แขวงทุ่งวัดดอน เขตสาทร กทม. 10120
ผลงานตีพิมพ์	P. Dilekrojanavuti, K. Saengkaew, I. Cheowanish and B Damrongsak, "Magnetic Force Microscopy Observation of Perpendicular Recording Head Remanence," Journal of Physics: Conference Series (JPCS). [accepted]

