



การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PHYSICAL AND MAGNETIC CHARACTERIZATION OF MAGNETIC FORCE  
MICROSCOPY TIPS



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	การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและแม่เหล็กของหัววัดกล้อง จุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
โดย	อดิวรรณ สังข์ทอง
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชรวิ รัตน์สกุลทอง )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ )

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์ )





57306205 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, หัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉาก

นางสาว อติวรรณ สังข์ทอง: การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (MFM) เทคนิคทั่วไป ปกติจะถูกใช้เพื่อถ่ายภาพโดเมนแม่เหล็กและลวดลายของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร การใช้งานนี้ต้องการหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (MFM probe) ที่มีความละเอียดสูงเป็นพิเศษสำหรับการถ่ายภาพโครงสร้างขนาดเล็ก และยังต้องมีความไวในการตอบสนองที่ดีสำหรับตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นน้อย ๆ ได้ ในปัจจุบัน MFM เทคนิคถูกใช้ในการตรวจสอบหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับแอปพลิเคชันนี้ หัววัด MFM ควรจะมีการตอบสนองที่ดีต่อสนามแม่เหล็กสลับ (AC) และสนามแม่เหล็กตรง (DC) ที่มีความเข้มสูงที่สร้างจากหัวเขียนได้ ในงานวิจัยนี้ เราวิเคราะห์และเปรียบเทียบหัววัด MFM เชิงพาณิชย์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบหัวเขียนแม่เหล็ก หัววัด MFM ที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้นถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล (Ni) นิกเกิลไฮดรอกไซด์ (NiFe) และนิกเกิลโคบอลต์ (NiCo) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (EDX) ถูกใช้เพื่อยืนยันโครงสร้างของหัววัด MFM และสารประกอบของวัสดุสารเคลือบ การตอบสนองของหัววัด MFM ต่อ สนามแม่เหล็ก AC และ DC ถูกวัดโดยระบบ MFM ที่ติดตั้งหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉากเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก การวัดโดยทั่วไปถูกดำเนินการโดยการป้อนกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ เพื่อให้แน่ใจว่าแมกนีไทเซชันที่บริเวณโพลหลักมีการอิ่มตัวเต็มที่ นอกจากนี้การวัดฮิสเทอรีซิสลูปของการตอบสนองของหัววัด MFM ถูกวัดที่ 2 ความสูงของการสแกนคือ 75 นาโนเมตร และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับความสูงของ MFM ทั่วไปคือ 75 นาโนเมตร หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe แสดงการตอบสนองที่ดีกว่าหัววัดอื่น 2 เท่า ที่ความสูงนี้ สังเกตเห็นว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในทุกหัววัด MFM เมื่อลดความสูงลงมาที่ 10 นาโนเมตร เพื่อเพิ่มความละเอียดของรูปภาพ การตอบสนองของหัววัด MFM ทุกตัวต่อสนามแม่เหล็ก DC มีค่าเพิ่มขึ้นตามที่คาดไว้ อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้าม แมกนีไทเซชันของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ยังคงอยู่ในทิศทางเดิม ที่เป็นเช่นนี้เพราะค่าโคเออร์ซิวิตีของ NiCo อลลรอยต์มีค่ามากกว่าค่าโคเออร์ซิวิตีของ Ni และ NiFe นอกจากนี้ การตอบสนองต่อความถี่สูงของหัววัด MFM ถูกตรวจวัดโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียน จาก 1 กิโลเฮิร์ต ถึง 100 เมกะเฮิร์ต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีลักษณะเรียบตลอดช่วงความถี่ ในทางกลับกัน การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่มีค่ามากกว่า 50 กิโลเฮิร์ต

57306205 : Major (PHYSICS)

Keyword : magnetic force microscopy, MFM probe, perpendicular magnetic write head

MISS Adiwon SUNGTHONG: Physical and magnetic characterization of magnetic force microscopy tips Thesis advisor : Badin Damrongsaks, Ph.D.

A conventional magnetic force microscopy (MFM) technique is usually employed to image magnetic domains and patterns of ferromagnetic materials. This requires MFM probes that have an ultrahigh resolution for imaging small structures and also a good sensitivity for detecting the low intensity of magnetic stray fields. Currently, the MFM technique is utilized to inspect magnetic write heads used in hard disk drives. For this application, the suitable MFM probe should have a good response to the strong intensity of both AC and DC magnetic fields produced from the write head. In this thesis, we characterized and compared commercial available MFM probes in order to be employed to inspect the magnetic write heads. Those MFM probes samples were coated with 3 different magnetic thin films, including nickel (Ni), nickel-iron (NiFe) and nickel-cobalt (NiCo). Scanning force microscopy (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX) were used to confirm the probe structures and the compositions of coating materials. The response of the MFM probes to AC and DC magnetic fields was measured by using MFM equipped with a perpendicular magnetic recording head as a magnetic field generator. Typical measurements were performed using the write current of 30 mA to ensure that the magnetization at the main pole was fully saturated. In addition, measurements of the hysteresis loop of the probe response were taken at 2 scanning heights, 75 and 10 nm, respectively. For a typical MFM scan height of 75 nm, the NiFe coated probe showed a two times better in sensitivity than the others. At this scan height, we observed no magnetization reversal effect in all three probes. When decreasing a scan height down to 10 nm (in order to improve image resolutions), the response of all probes to the DC magnetic fields was improved as expected; however, the effect of the magnetization reversal was noticed for the MFM probes coated with Ni and NiFe. In contrast, the magnetization of NiCo coated probe remained in the same direction. This is due to the high coercivity of NiCo alloys compared with those of Ni and NiFe. Moreover, the high-frequency response of MFM probes was investigated by varying the write frequency, from 1 kHz to 100 MHz. Experimental results showed the flat response across the frequency spectrum for the NiFe MFM probe. On the other hand, the MFM probe coated with Ni revealed an increase in the probe response when the write frequency was raised up beyond 50 kHz.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลากรจากหลากหลายผ่าน ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณในความกรุณาของท่านมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด (Western Digital (Thailand) Co., LTD) ที่สนับสนุนทุนวิจัย อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณ จักรกฤษ สุภาวสุทธิ์ ที่ช่วยให้ความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณ อธิพิณ เชี่ยววานิช คุณ กานต์ แสงแก้ว และ คุณ อรรถพล พ่วงพี ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมไปถึงพี่ ๆ ในแผนก Technical Support Engineer ที่ให้ความกรุณาสอนการใช้เครื่องมือ และให้การดูแลตลอดการทำงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัว รวมไปถึง พี่ ๆ และ เพื่อน ๆ ทุกคน ที่เป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดัน และสนับสนุนและช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ตลอดการทำงานวิจัย

อดิวรรณ สังข์ทอง



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	6
2.1.1 หลักการทำงานของ MFM.....	7
2.2 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	14
2.2.1 ระบบของหัววัด MFM.....	14
2.3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	16
2.4.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	17
2.4.2 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	18
2.4 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน.....	19

2.4.1	สนามแม่เหล็ก .....	19
2.4.2	สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ .....	20
2.4.3	โมเมนต์แม่เหล็ก .....	22
2.4.4	แมกนีไทเซชัน .....	23
2.4.5	สารแม่เหล็กเฟอร์โรและฮีสเทอริซิส .....	24
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	26
บทที่ 3	การตรวจวัดการตอบสนองของหัววัด MFM ด้วยหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉาก .....	33
3.1	ข้อมูลของหัววัด MFM ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย .....	33
3.2	แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก .....	35
3.3	การตรวจสอบการตอบสนองของหัววัด MFM ด้วยหัวเขียนแม่เหล็ก .....	35
3.3.1	การจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก .....	35
3.3.2	การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กและการสร้างภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียน .....	36
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก .....	40
บทที่ 4	การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็ก .....	44
4.1	การศึกษาทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM แต่ละตัว .....	44
4.2	การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อชนิดของสนามแม่เหล็ก .....	50
4.3	การศึกษาฮีสเทอริซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM .....	57
4.4	การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง .....	63
4.5	การตรวจสอบรูปทรงและสารที่เคลือบบนหัววัด MFM .....	68
บทที่ 5	สรุปและอภิปรายผล .....	72
ภาคผนวก	.....	74
ภาคผนวก ก	.....	74
ภาคผนวก ข	.....	76
ภาคผนวก ค	.....	78

รายการอ้างอิง ..... 80

ประวัติผู้เขียน ..... 84



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของหัววัด MFM.....	34
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวคาน.....	34
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ SEM.....	68



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของ MFM.....	1
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างรูปภาพ MFM ของลักษณะข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล.....	2
รูปที่ 1.3 การพัฒนาความละเอียดของข้อมูลที่สามารถตรวจวัดได้ด้วย MFM.....	2
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของ MFM .....	7
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบการสั่นของหัววัด MFM โดยมีความหน่วง.....	8
รูปที่ 2.3 การสั่นของหัววัด MFM (ก) แอมพลิจูด (ข) เฟส.....	10
รูปที่ 2.4 การจำลองการสั่นของหัววัด MFM กรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำ.....	11
รูปที่ 2.5 (ก) แอมพลิจูด และ (ข) เฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับหัววัด MFM .....	13
รูปที่ 2.6 รูปภาพที่ถ่ายด้วย SEM ของหัววัด MFM .....	14
รูปที่ 2.7 หัววัด MFM แบบจุดมวล (point probe model) (ก) หัววัด MFM ที่มีลักษณะเป็นโมเมนต์ ขั้วเดียว (monopole: $q$ ) หรือ โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก (magnetic dipole moment: $m$ ) (ข) พิจารณาหัววัด MFM ในรูปแบบประจุ โดยภายในสีขาวเป็นบริเวณที่มีแมกนีไทเซชัน แตกต่างกันทั้ง 2 ฝั่ง .....	15
รูปที่ 2.8 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ก) RAMAC (ข) แผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ RAMAC .....	17
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	18
รูปที่ 2.10 กระบวนการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากและสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียน .....	19
รูปที่ 2.11 การเกิดสนามแม่เหล็ก (ก) ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวด (ข) มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวด... ..	19
รูปที่ 2.12 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ (ก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด (ข) ภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติ สนามแม่เหล็กภายในขดลวดจะมีความสม่ำเสมอ .....	21



รูปที่ 2.13 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจาก (ก) การหมุนรอบตัวเองของนิวเคลียส (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน (ค) การโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส .....	22
รูปที่ 2.14 แท่งทรงกระบอกที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก $N$ ตัว .....	23
รูปที่ 2.15 โดเมนภายในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างสุ่ม (ข) การจัดเรียงของโมเมนต์แม่เหล็กตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก .....	24
รูปที่ 2.16 ฮิสเทอรีซิสลูปที่แสดงคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โร .....	25
รูปที่ 2.17 ฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์ (ก) แบบอ่อน (ข) แบบแข็ง .....	26
รูปที่ 2.18 รูปภาพ MFM ของสนามแม่เหล็กคงค้างภายในสารแม่เหล็ก permalloy .....	27
รูปที่ 2.19 การสแกนจากการตรวจวัดหัวเขียนแบบแวนอนด้วย MFM .....	27
รูปที่ 2.20 รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูง ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 0 mA (b) 2 mA (c) 5 mA (d) 10 mA (e) 15 mA (f) 20 mA (g) 25 mA (h) 45 mA และ (i) -45 mA .....	28
รูปที่ 2.21 สนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ตรวจวัดด้วย MFM เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (a) 0 mA (b) 10 mA (c) 30 mA และ (d) รูปภาพพื้นผิวของหัวเขียนที่ถ่ายด้วย AFM.....	29
รูปที่ 2.22 รูปภาพสนามแม่เหล็กของข้อมูลแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Co ที่ความหนา (a) 10 nm (b) 20 nm (c) 30 nm (d) 40 nm และ (e) 60 nm .....	30
รูปที่ 2.23 รูปภาพสนามแม่เหล็กของข้อมูลแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย CoCrPt ที่ความหนา (a) 10 nm (b) 20 nm (c) 30 nm (d) 40 nm และ (e) 60 nm.....	31
รูปที่ 2.24 ความละเอียดของการตรวจวัดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม.....	31
รูปที่ 3.1 รูปภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัด MFM ที่มีรูปทรงโอบีส (ก) ด้านข้าง (side view) (ข) ด้านหน้า (front view) และ (ค) ตัวคาน (cantilever).....	34
รูปที่ 3.2 โครงสร้างหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉากมุมมองด้าน ABS .....	35
รูปที่ 3.3 การติดตั้งระบบสำหรับการตรวจสอบการตอบสนองของหัววัด MFM.....	36
รูปที่ 3.4 (ก) ขอบเขตของการสแกนหัวบริเวณหัวเขียน (ข) เส้นของการสแกนตามบริเวณที่กำหนด โดยเริ่มสแกนจากซ้ายไปขวา รูปเล็กคือระยะห่างในแต่ละตำแหน่งของการสแกนทั้งในแกน $x$ และแกน $y$ .....	37

รูปที่ 3.5 ลักษณะการตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยหัวเขียนในแนวแกน x หรือ แนวครอส  
 แทร็ค ..... 37

รูปที่ 3.6 ลักษณะการโค้งงอและการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน (ก) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภาย  
 ภายนอก (ข) และ (ค) กรณีมีสนามแม่เหล็กภายนอก..... 38

รูปที่ 3.7 (ก) รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จาก MFM (ข) ค่าความต่างเฟสของเส้นสแกนที่มี  
 ค่าความต่างเฟสสูงสุด (ค) (ง) และ (จ) รูปภาพขยายของหมายเลขที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ 39

รูปที่ 3.8 การเฉลี่ยข้อมูล (ก) ตัวอย่างข้อมูลความต่างเฟสที่ได้จากการตรวจวัด มีขนาดเท่ากับ 512 x  
 512 pixel (ข) ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลในแนวดาวน์แทร็ค (ค) ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลใน  
 แนวครอสแทร็ค ..... 41

รูปที่ 3.9 (ก) ภาพสนามแม่เหล็กเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลภาพโดยโปรแกรม MATLAB  
 (ข) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คที่ตำแหน่งค่าความต่างเฟสสูงสุด..... 42

รูปที่ 4.1 ทิศของแมกนีไทเซชันคงค้างภายในสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกกรณีไม่มีสนามแม่-  
 เหล็กภายนอก..... 45

รูปที่ 4.2 (ก) หัววัด MFM ก่อนนำไปแมกนีไทเซชัน (ข) ทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM หลัง  
 การแมกนีไทเซชันด้วยสนามแม่เหล็ก DC+ (ค) เมื่อนำหัววัด MFM ที่ถูกแมกนีไทเซชันไป  
 ตรวจวัดหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ..... 46

รูปที่ 4.3 (ก) ทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM หลังการแมกนีไทเซชันด้วยสนามแม่เหล็ก DC-  
 (ข) เมื่อนำหัววัด MFM ที่ถูกแมกนีไทเซชันไปตรวจวัดหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+  
 ..... 46

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า  
 DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย  
 Ni..... 47

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า  
 DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย  
 NiFe ..... 47

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า  
 DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย  
 NiCo..... 47

- รูปที่ 4.7 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni..... 48
- รูปที่ 4.8 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ..... 48
- รูปที่ 4.9 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo..... 48
- รูปที่ 4.10 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า AC ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแตร็คของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ..... 52
- รูปที่ 4.11 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า DC+ ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแตร็ค ของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ..... 53
- รูปที่ 4.12 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า DC- ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแตร็ค ของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ..... 54
- รูปที่ 4.13 ทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในซิลด์ของหัวเขียนแบบตั้งฉาก ด้านบนเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากขวาไปซ้าย ด้านล่างเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากซ้ายไปขวา ..... 55
- รูปที่ 4.14 ภาพจำลองการตรวจวัด ณ บริเวณ ต่าง ๆ ของหัวเขียน เส้นสีแดง คือ ค่าความต่างเฟส 55
- รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงเฟสเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM จุดสีเขียวคือ ค่าเฟสเริ่มต้นของหัววัด MFM ที่มีค่าต่ำกว่า 90 องศา..... 56
- รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm

และรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA ..... 59

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm และรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA..... 60

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm และรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA..... 61

รูปที่ 4.19 ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองที่ความสูง 75 nm โดยที่ เส้นสีดำ หัววัด MFM ที่เคลือบ ด้วย Ni เส้นสีแดง หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และเส้นสีน้ำเงิน หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ..... 62

รูปที่ 4.20 ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองที่ความสูง 10 nm โดยที่ เส้นสีดำ หัววัด MFM ที่เคลือบ ด้วย Ni เส้นสีแดง หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และเส้นสีน้ำเงิน หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ..... 62

รูปที่ 4.21 เส้นการสแกนที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุดของค่าความถี่ 1kHz – 100 MHz ที่จ่าย ให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo ..... 64

รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัว เขียนตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo ..... 65

รูปที่ 4.23 ทางซ้ายมือสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับหัวเขียน ทางขวามือสัญญาณที่ตรวจวัดได้ โดยเส้น สีแดงคือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มของสนามแม่เหล็ก ..... 66

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลเซชันของค่าความต่างเฟสกับความถี่ของกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz โดยที่ เส้นสีดำ คือ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีแดง คือ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และ เส้นสีน้ำเงิน คือ หัววัด MFM ที่เคลือบ ด้วย NiCo ..... 67

รูปที่ 4.25 ช่วงการทำงานของออปแอมป์ที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณอินพุต ..... 67

รูปที่ 4.26 ตัวอย่างรูปภาพของหัววัด MFM ที่ถ่ายด้วย SEM เมื่อกำลังขยาย (ก) 35x (ข) 1kx และ (ค) 10kx..... 69

รูปที่ 4.27 ผลการตรวจวัดธาตุและสารประกอบด้วย EDX ของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM (ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo..... 70



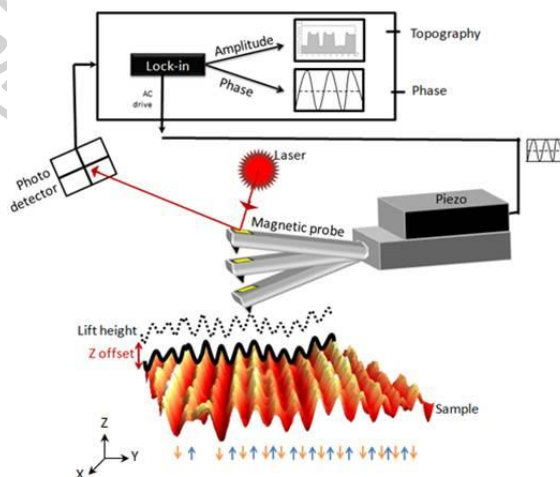
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy: MFM) เป็นเครื่องมือที่มีการพัฒนามาจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy: AFM) ใช้สำหรับตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ที่อยู่ภายในวัสดุแม่เหล็ก [1, 2] รวมไปถึงใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic platters) [3] เพื่อช่วยในการพัฒนาการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive: HDD)

หลักการการทำงานของ MFM นั้นเป็นหลักการเดียวกับ AFM แต่แตกต่างกันที่หัววัด ซึ่งใน MFM นั้นจะใช้หัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM probe) เคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic) เรียกว่า หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (MFM probe) การตรวจสอบวัสดุแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการนำหัววัด MFM สแกนไปบนพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็ก เพื่อวัดแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กแต่ละบริเวณจะทำให้หัววัด MFM เกิดการโค้งงอ ดังรูปที่ 1.1 ผลการตรวจสอบจะถูกประมวลผลออกมาเป็นรูปภาพ ดังรูปที่ 1.2

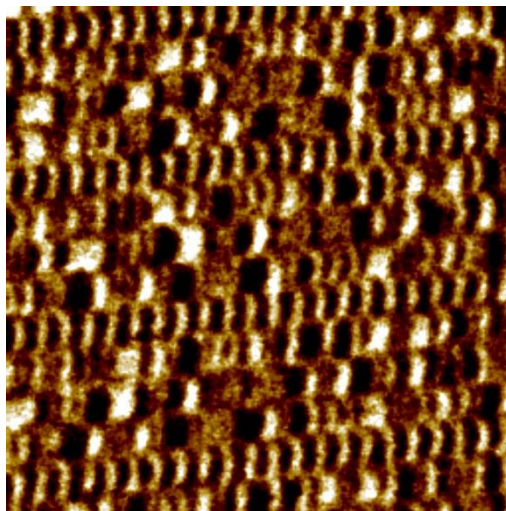


รูปที่ 1.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของ MFM

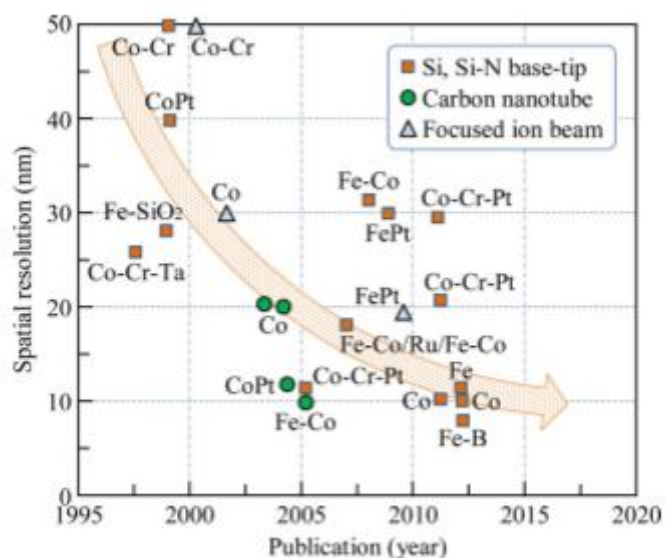
ที่มา: (4 November 2016). *Magnetic Force Microscopy Mode*. Available:

<http://www.csinstruments.eu/magnetic-force-microscopy-mode/>





รูปที่ 1.2 ตัวอย่างรูปภาพ MFM ของลักษณะข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล  
 ที่มา: (4 November 2016). *Magnetic domain of High-density HDD media*.  
 Available: <http://www.parkafm.com/index.php/medias/resources/afm-images?page=5>



รูปที่ 1.3 การพัฒนาความละเอียดของข้อมูลที่สามารถตรวจวัดได้ด้วย MFM  
 ที่มา: M. Futamoto, T. Hagami, S. Ishihara, K. Soneta, and M. Ohtake,  
 "Improvement of Magnetic Force Microscope Resolution and Application to  
 High-Density Recording Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 6,  
 pp. 2748-2754, 2013.

ปัญหาหนึ่งที่เป็นแรงขับเคลื่อนให้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของ MFM คือ การเพิ่มความจุหรือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) ในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลแม่เหล็กมีค่าเล็กลง ดังนั้นนักวิจัยจึงต้องพัฒนา MFM ให้สามารถตรวจวัดข้อมูลที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งยังคงความละเอียดของรูปภาพให้มีคุณภาพสูงด้วย โดยมุ่งเน้นการพัฒนาไปที่หัววัด MFM ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญของ MFM วิธีการพัฒนาทำได้หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธีการแรก คือ การเพิ่มความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM [4] วิธีการที่สอง คือ การเปลี่ยนสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM [5] ซึ่งวิธีการทั้ง 2 นี้จะช่วยเพิ่มแรงปฏิกิริยาระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของวัสดุแม่เหล็ก หรือเรียกอีกว่า เพิ่มการตอบสนองของหัววัด MFM ให้ดีขึ้น รวมไปถึงเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดข้อมูลที่มีขนาดเล็กได้ ซึ่งในปัจจุบัน MFM สามารถตรวจวัดข้อมูลที่มีขนาดเล็กได้ถึง 8 นาโนเมตร [6] แสดงดังรูปที่ 1.3

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของหัววัด MFM ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นจะกระทำเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ฟิล์มบางทั่วไป ได้แก่ การวิเคราะห์ความขรุขระ (roughness) ของฟิล์ม ด้วย AFM การวิเคราะห์ความเป็นแม่เหล็กหรือฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (vibrating sample magnetometer: VSM) ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ไม่สามารถกระทำบนหัววัด MFM ได้โดยตรง ดังนั้นนักวิจัยหรือนักพัฒนาที่เกี่ยวข้องจะต้องใส่วัสดุรองรับ (substrate) ที่เป็นซิลิกอน (Silicon: Si) (ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับ AFM probe) ลงไปเคลือบฟิล์มพร้อม ๆ กับหัววัด MFM ด้วย แล้วนำชิ้นตัวอย่างนั้นไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ แทน ส่วนหัววัด MFM นั้นจะถูกนำไปตรวจวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยการตรวจวัดความหนาแน่นของข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (เปรียบเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก) เพื่อนำรูปภาพที่ได้จากการตรวจวัดมาแปลงเป็นข้อมูลโดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (fast fourier transform) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของขนาดข้อมูลที่เล็กที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีการนำ MFM ไปใช้ในการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก ซึ่งต้องการหัววัด MFM ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง และมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็ก เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้กับหัวเขียน ดังนั้นการใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของหัววัด MFM จะมีข้อจำกัดในการศึกษาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สลับไปสลับมา (AC magnetic field) เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะเป็นสนามแม่เหล็กคงที่ (magnetic stray field) และมีความเข้มน้อย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่แตกต่างออกไป โดยการใช้หัวเขียนแม่เหล็ก (magnetic write head) เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก



เนื่องจาก หัวเขียนสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงถึง 2.4 เทสลา อีกทั้งยังสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ทั้งแบบ DC field และ AC field โดยจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตอบสนองของหัววัด MFM ได้แก่ ชนิดของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก ปริมาณความถี่ของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM รวมไปถึงการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) และเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (energy dispersive X-ray spectrometer: EDX or EDS) เพื่อทำการยืนยันรูปทรงของหัววัด MFM และสารที่เคลือบบนหัววัด MFM ด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กต่างชนิดกัน
- 2) เพื่อศึกษาฮิสเทอรีซิสลูปของการตอบสนองของหัววัด MFM
- 3) เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การตอบสนองของหัววัด MFM นั้นจะขึ้นอยู่กับแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ออกมาจากพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามสมการ  $\Delta\phi = \frac{Q}{k} \frac{dF_{t-s}}{dz}$  โดยที่  $F_{t-s} = \mu_0 \int \nabla \cdot (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip}$  จะเห็นว่า แรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับ แมกนีไทเซชันของสารที่เคลือบบนหัววัด MFM และความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้น ถ้าหากใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกัน ตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเท่ากัน จะสามารถเห็นความแตกต่างของการตอบสนองของหัววัด MFM แต่ละตัว

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ของบริษัท Nanosensors ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล (Nickel: Ni) นิกเกิลไอรอน (Nickel-iron: NiFe) และนิกเกิลโคบอลต์ (Nickel-cobalt: NiCo) ด้วย MFM ที่ติดตั้งหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉากเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก โดยการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็ก AC และ DC หัวเขียนแม่เหล็กจะถูกป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 30 mA นอกจากนี้ การศึกษาฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM จะทำการตรวจวัดที่ 2 ความสูง ได้แก่ 75 นาโนเมตร และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ และเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียนในช่วง  $\pm 60$  mA และศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง โดย

เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 1 กิโลเฮิร์ต จนถึง 100 เมกะเฮิร์ต นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ รุ่น MERLIN ของบริษัท ZEISS จะถูกใช้ในการยืนยันรูปทรงของหัววัด MFM และสารประกอบของวัสดุ สารเคลือบ ซึ่งถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า 4,000 เท่า และ 10,000 เท่า ตามลำดับ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเลือกใช้หัววัด MFM ให้เหมาะสมกับงานที่จะทำการตรวจวัดได้
- 2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ MFM ด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

MFM เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญสำหรับการศึกษาการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงใช้ในการศึกษาความหนาแน่นของข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการพัฒนาให้สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้มากขึ้นหรือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) โดยการเปลี่ยนเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวนอน (longitudinal recording) มาเป็นเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวตั้งฉาก (perpendicular recording) ทำให้ขนาดของข้อมูลแม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกมีขนาดเล็กลง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องมือวัดอย่าง MFM ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ในการพัฒนา MFM นั้น มีการมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความละเอียดของข้อมูลในการตรวจวัด (resolution) และการเพิ่มการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (sensitivity) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดขนาดของหัววัด MFM การเพิ่มความหนาของสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM และการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM เป็นต้น โดยปัญหาที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกัน

ในบทนี้ ผู้วิจัยจึงกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้น และเป็นแนวทางที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย หลักการทำงานของ MFM ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแม่เหล็ก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และองค์ประกอบพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

#### 2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

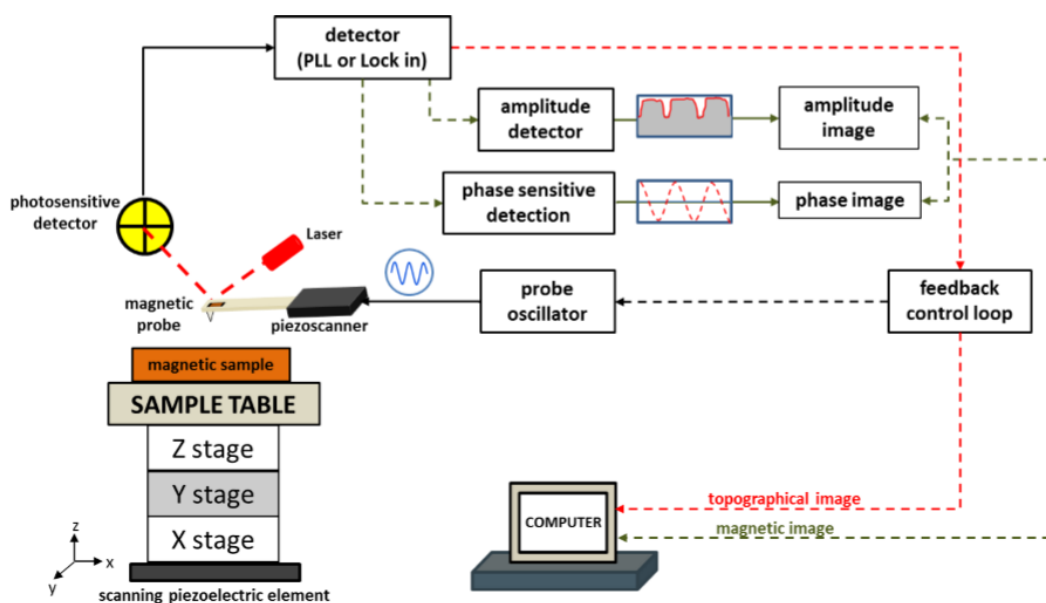
MFM ถูกสร้างขึ้นในปี 1987 โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่าน ได้แก่ Martin และ Wickramasinghe [7] โดยใช้ MFM ในการถ่ายภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก รุ่น IBM 3380 ของบริษัท ไอบีเอ็ม ด้วยการวัดแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวของหัวเขียน จึงทำให้ MFM เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย

MFM จัดเป็นกล้องจุลทรรศน์ประเภทกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (scanning probe microscopy: SPM) กล่าวคือ เป็นเครื่องมือที่ต้องอาศัยแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัด MFM กับชิ้นตัวอย่าง โดยแรงปฏิกิริยาที่ว่านี้ คือ แรงแม่เหล็ก (แรงดูด (attractive force) หรือ แรงผลัก (repulsive force)) ซึ่งหัววัด MFM จะถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก ดังนั้นตัวอย่างที่สามารถตรวจวัด

ได้จะต้องเป็นวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็ก MFM จึงเป็นเครื่องมือที่นิยมในวงการวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุศาสตร์ (material science) ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) รวมไปถึงในวงการอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องมือที่ไม่จำเป็นต้องตรวจวัดในระบบสุญญากาศ สามารถตรวจวัดชิ้นงานหรือวัสดุที่มีขนาดเล็กได้

### 2.1.1 หลักการทำงานของ MFM

ในระบบ MFM จะเป็นประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ได้แก่ หัววัด MFM ซึ่งติดอยู่บนคานยาว (cantilever) แหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (voltage source) เพียโซอิเล็กทริก ทรานส์ดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) เลเซอร์ไดโอด (laser diode) อุปกรณ์ตรวจวัดความไวแสง (photosensitive detectors: PSD) เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (lock-in amplifier) ตัวสแกนเพียโซ (piezo scanner) คอมพิวเตอร์ และที่ขาดไม่ได้คือ สารแม่เหล็กตัวอย่าง (magnetic sample) แสดงดังรูปที่ 2.1

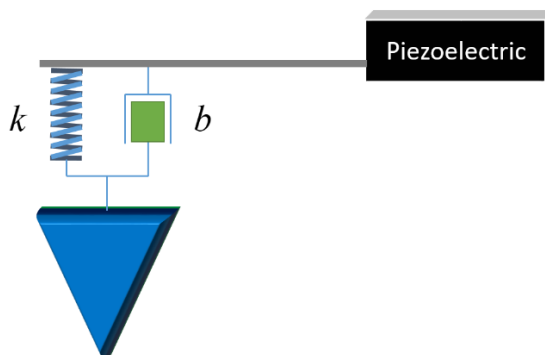


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของ MFM

ที่มา: อ. โฉมหน้า, "กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงปริมาณสำหรับหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง," วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.

โดยทั่วไป MFM จะทำงานในโหมดไดนามิก (dynamic mode) ซึ่งหัววัด MFM จะถูกทำให้สั่นที่ความถี่ธรรมชาติ (resonance frequency) ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริก ทรานส์ดิวเซอร์ เพื่อให้่ายต่อการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการสั่นของหัววัด MFM ในโหมดไดนามิกนี้ จะสมมติให้หัววัด MFM มีคุณสมบัติเป็นจุดมวล (point mass model) หมายความว่า สมมติให้

หัววัด MFM มีขนาดเล็กมากจนเป็นจุด (เพื่อตัดการพิจารณาแรงภายในของหัววัด MFM) มีมวล  $m$  ติดกับสปริงซึ่งมีค่าคงที่ของสปริง  $k$  และเมื่อหัววัด MFM สั่นจะเกิดแรงต้านอากาศ โดยมีสัมประสิทธิ์ความหน่วง  $b$  ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบการสั่นของหัววัด MFM โดยมีความหน่วง

เมื่อทำการป้อนแรงภายนอกให้กับเพียโซอิเล็กทริกเท่ากับ  $F_{drive} = F_0 e^{i\omega t}$  หัววัด MFM จะมีการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (simple harmonic oscillation) ที่มีความถี่  $\omega$  โดยหัววัด MFM จะเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน  $z$  ตำแหน่งของหัววัด MFM ที่เวลาใด ๆ เป็นดังสมการ

$$z(t) = A_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ แอมพลิจูดสูงสุดในการสั่นของหัววัด MFM

$\phi$  คือ เฟสของการสั่นของหัววัด MFM

ต่อไป จะแยกพิจารณาการเคลื่อนที่ของหัววัด MFM ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่ไม่แรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM และกรณีที่มีแรงภายนอกมากกระทำ ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM (หัววัด MFM สั่นอยู่กลางอากาศ) สมการการเคลื่อนที่ของหัววัด MFM สามารถเขียนได้เป็นดังสมการ

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของหัววัด MFM

$b$  คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง

$k$  คือ ค่าคงที่สปริงของหัววัด MFM

หาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอนุพันธ์อันดับที่สองของสมการที่ (2.1) แล้วนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$\left(-\omega^2 + \frac{i\omega b}{m} + \frac{k}{m}\right)A_0 e^{i(\omega t - \phi)} = \frac{F_0}{m} e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  และ แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)  $Q = \sqrt{mk}/b$  แทนลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$\left(-\omega^2 + \frac{i\omega_0\omega}{Q} + \omega_0^2\right)A_0 e^{i(\omega t - \phi)} = \frac{F_0}{m} e^{i\omega t} \quad (2.4)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.4) ใหม่ จะได้

$$A_0(\omega_0^2 - \omega^2) + i\frac{A_0}{Q}\omega_0\omega = \frac{F_0}{m} e^{i\phi} \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.5) จะเห็นว่าเทอมที่อยู่ด้านขวามือนั้นอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่โดยใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's formula)  $e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi$  แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$A_0(\omega_0^2 - \omega^2) = \frac{F_0}{m} \cos \phi \quad (2.6)$$

และ 
$$\frac{A_0}{Q}\omega_0\omega = \frac{F_0}{m} \sin \phi \quad (2.7)$$

จากนั้น ยกกำลังสองสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะได้เป็น

$$[A_0(\omega_0^2 - \omega^2)]^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \cos^2 \phi \quad (2.8)$$

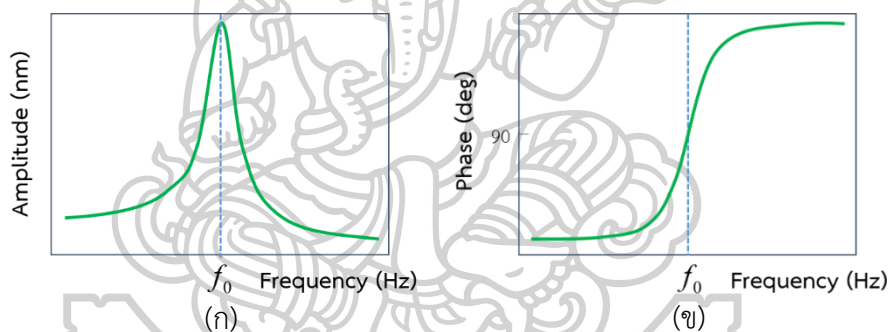
$$\left(\frac{A_0}{Q}\omega_0\omega\right)^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \sin^2 \phi \quad (2.9)$$

นำสมการที่ (2.8) + (2.9) และจัดรูปใหม่ จะได้แอมพลิจูดและเฟสของการสั่น เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$A_0 = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0 \omega / Q)^2}} \quad (2.10)$$

และ 
$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของคลื่นรูปไซน์ (sine wave) ที่ใช้ในการกระตุ้นให้หัววัด MFM สั่น จากค่าน้อยไปมากจะได้แอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของหัววัด MFM เป็นดังรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อค่าความถี่มีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของหัววัด MFM ( $\omega = \omega_0$ ) จะทำให้หัววัด MFM สั่นที่ค่าแอมพลิจูดสูงสุดและค่าเฟสจะอยู่ที่ 90 องศา



รูปที่ 2.3 การสั่นของหัววัด MFM (ก) แอมพลิจูด (ข) เฟส

กรณีที่ 2 เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM เกิดขึ้นเมื่อนำหัววัด MFM เข้าไปใกล้กับวัสดุแม่เหล็ก จะเกิดแรงอันตรกิริยาทางแม่เหล็กขึ้นระหว่างวัสดุทั้ง 2 นี้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็ก  $z(t)$  ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของหัววัด MFM ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} + F_{t-s}[z(t)] \quad (2.12)$$

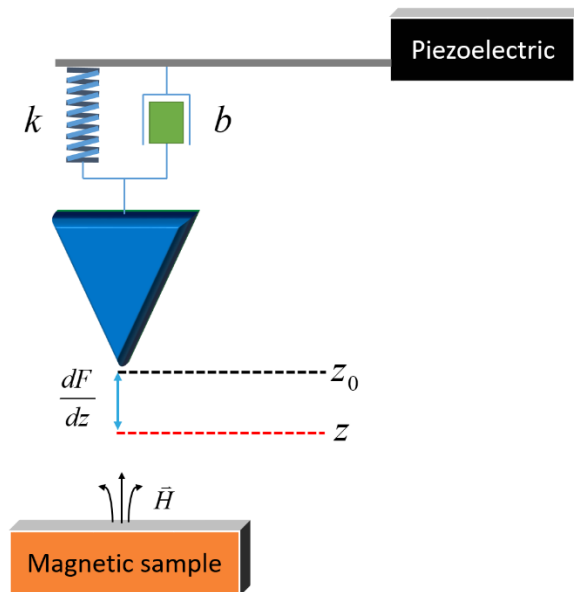
โดยที่แรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็ก เป็นดังสมการ

$$\vec{F}_{t-s} = \mu_0 \int \nabla (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\vec{M}_{tip}$  คือ แมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM



$\bar{H}_{sample}$  คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัด MFM  
 $dV_{tip}$  คือ ปริมาตรเล็ก ๆ ของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM



รูปที่ 2.4 การจำลองการสั่นของหัววัด MFM กรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำ

หากพิจารณาให้แรงที่มากระทำกับหัววัด MFM มีค่าน้อย ๆ แต่มีความแรงพอที่จะไปรบกวนการสั่นของหัววัด MFM ได้ ซึ่งจะทำให้แอมพลิจูดของการสั่นมีขนาดเล็กมาก ๆ จึงสามารถใช้หลักของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) มาอธิบายแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ได้ดังสมการ

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} + \left[ F_{t-s}(z=0) + \left( \frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0} z(t) \right] \quad (2.14)$$

จัดรูปสมการที่ (2.14) ใหม่ จะได้

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + \left[ k - \left( \frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0} \right] z(t) = F_0 e^{i\omega t} + F_{t-s}(z=0) \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) จะได้ความถี่ธรรมชาติของหัววัด MFM เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เป็นดังสมการ

$$\omega_o' = \sqrt{\frac{k - \left( \frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0}}{m}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\left( \frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0}}{k}} \quad (2.16)$$



เนื่องจาก เทอมเกรเดียนต์ของแรงระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก ๆ นั่นคือ

$\left(\frac{dF_{t-s}}{dz}\right)_{z=0} \ll k$  จึงสามารถใช้หลักของอนุกรมแมคลอริน (Maclaurin series) มาจัดรูปสมการที่ (2.16) ใหม่ ได้เป็น

$$\dot{\omega}_o \approx \omega_0 \left( 1 - \frac{\left(\frac{dF_{t-s}}{dz}\right)_{z=0}}{2k} \right) \quad (2.17)$$

ดังนั้น จะได้ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป (frequency shift) เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM เป็นดังสมการ

$$\Delta\omega_0 = \dot{\omega}_o - \omega_0 = \frac{\omega_0}{2k} \frac{dF_{t-s}}{dz} \quad (2.18)$$

แอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไป (amplitude shift) เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ เท่ากับ

$$\Delta A = \frac{2A_0 Q}{3\sqrt{3}k} \frac{dF_{t-s}}{dz} \quad (2.19)$$

และ ถ้าสมมติให้  $\dot{\omega}_o \approx \omega_0$  แล้วแทนลงใน สมการที่ (2.11) จะได้

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_0}{2Q\Delta\omega_0} \right) \quad (2.20)$$

แทนค่า  $\Delta\omega_0 = \frac{\omega_0}{2k} \frac{dF_{t-s}}{dz}$  ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{k}{Q \frac{dF_{t-s}}{dz}} \right) \quad (2.21)$$

จากกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากกระทำ เฟสของการสั่นจะมีค่าอยู่ที่ 90 องศา หรือ  $\pi/2$  แต่เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM จะทำให้เฟสเปลี่ยนแปลงไป (phase shift) หรือความต่างเฟส

เป็น  $\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \phi$  และเมื่อแทนค่า  $\phi$  จากสมการที่ (2.21) ลงไป จะได้ว่า

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{k}{Q \frac{dF_{t-s}}{dz}} \right) \quad (2.22)$$

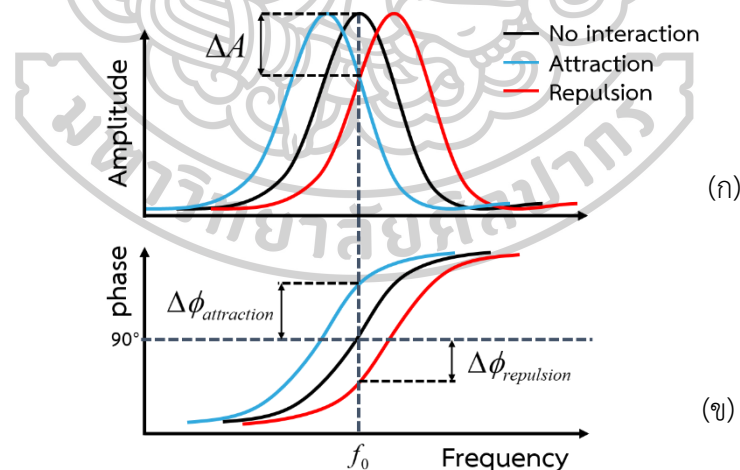
เนื่องจาก  $\tan^{-1} x \approx \frac{\pi}{2} - \frac{1}{x}$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{Q \frac{dF_{t-s}}{dz}}{k} \right) \quad (2.23)$$

ดังนั้น ความต่างเฟสเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำจะเท่ากับ

$$\Delta\phi = \frac{Q \frac{dF_{t-s}}{dz}}{k} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.19) จะเห็นว่า ความต่างเฟสจะมีค่าขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์คุณภาพ (ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ปริมาณอนุภาคในอากาศ) ค่าคงที่ของสปริงในที่นี้จะเป็นผลมาจากขนาดของหัววัด MFM และสุดท้ายคือเกรเดียนท์ของแรงที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็ก

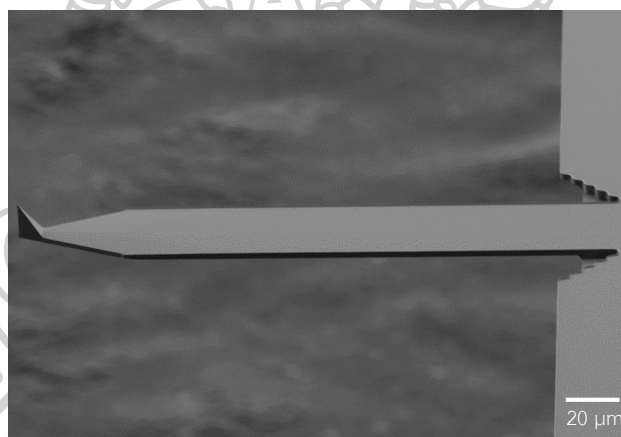


รูปที่ 2.5 (ก) แอมพลิจูด และ (ข) เฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำกับหัววัด MFM  
 แก๊ไขจาก: (15 April 2016). *Magnetic Force Microscopy: nanoscale magnetic imaging and lithography*. Available: [www.ntmdt.com/data/media/files/products/integra/mfm\\_digest.pdf](http://www.ntmdt.com/data/media/files/products/integra/mfm_digest.pdf)

จากสมการที่ (2.19) และ (2.24) แอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับหัววัด MFM แสดงดังรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) โดยที่เส้นสีแดงคือ แรงผลึก และเส้นสีน้ำเงินคือ แรงดูด ซึ่งปกติการประมวลผลภาพของระบบ MFM จะใช้ค่าความต่างเฟสมาสร้างเป็นภาพสนามแม่เหล็ก เนื่องจาก สามารถแยกแยะระหว่างแรงดูดหรือแรงผลึกที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็กได้

## 2.2 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

หัววัด MFM ซึ่งจัดได้ว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ หัววัด MFM มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยม มีปลายแหลมเหมือนเข็มติดที่ปลายคาน ดังรูปที่ 2.6 ถูกพัฒนาขึ้นโดยการนำหัววัด AFM มาเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์โร ตัวอย่างเช่น NiFe CoCr เป็นต้น ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น เคลือบด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC magnetron sputtering) [8] วิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (radio-frequency magnetron sputtering) [9] เป็นต้น



รูปที่ 2.6 รูปภาพที่ถ่ายด้วย SEM ของหัววัด MFM

### 2.2.1 ระบบของหัววัด MFM

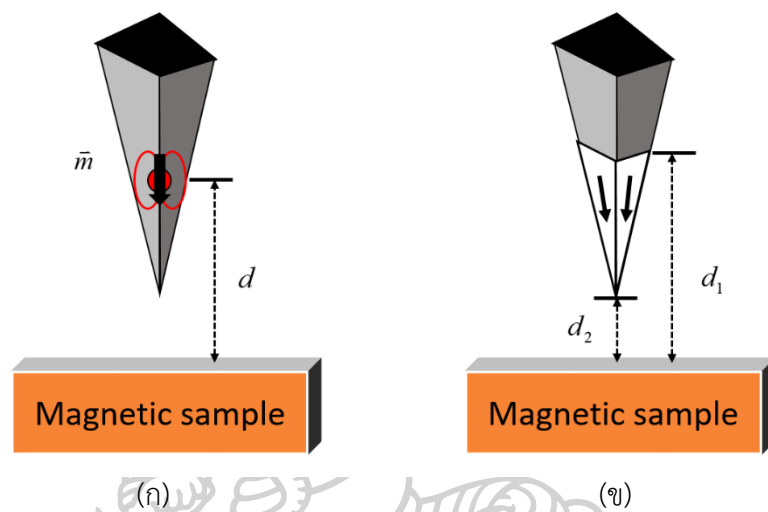
จากที่กล่าวไปข้างต้น MFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ถ่ายภาพสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากเกรเดียนต์ของแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็ก เมื่อนำหัววัด MFM เข้าใกล้กับวัสดุแม่เหล็ก จะทำให้เกิดพลังงานซีแมน (Zeeman energy:  $E$ ) ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดจากการที่โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM พยายามเรียงตัวไปตามทิศของสนามแม่เหล็กจากวัสดุแม่เหล็ก เป็นดังสมการ [10]

$$E = -\mu_0 \int \vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample} dV_{tip} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\mu_0$  คือ ความซึมผ่านได้ของสุญญากาศ

ในโหมดไดนามิก เพื่อลดความยุ่งยากและซับซ้อน จึงสมมติให้หัววัด MFM มีลักษณะเป็นจุดมวล แล้วทำให้ได้ว่าแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็ก อยู่ในรูปของอนุพันธ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะการสั้นของหัววัด MFM

$$F = -\vec{\nabla} \cdot \mathbf{E} = \mu_0 \int \vec{\nabla} \cdot (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} = \mu_0 (-q_{tip} + \vec{m}_{tip} \cdot \nabla) \vec{H}_{sample} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.7 หัววัด MFM แบบจุดมวล (point probe model) (ก) หัววัด MFM ที่มีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วเดียว (monopole:  $q$ ) หรือ โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก (magnetic dipole moment:  $\vec{m}$ )  
(ข) พิจารณาหัววัด MFM ในรูปแบบประจุ โดยภายในสีขาวเป็นบริเวณที่มีแมกนีไทเซชันแตกต่างกันทั้ง 2 ฝั่ง

โดยหัววัด MFM แบบจุดมวล สามารถพิจารณาแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM ได้ 2 ลักษณะ คือ แรงแม่เหล็กที่เกิดจากหัววัด MFM มีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก จะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของหัววัด MFM ซึ่งห่างจากวัสดุเป็นระยะ  $d$  ดังรูปที่ 2.7 (ก) และในกรณีที่หัววัด MFM มีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วเดียว จะเกิดแรงแม่เหล็กบริเวณปลายของหัววัด MFM ซึ่งมีระยะห่างจากวัสดุแม่เหล็ก  $d_2$  ดังรูปที่ 2.7 (ข) ทำให้สามารถเขียนแรงระหว่างหัววัด MFM กับวัสดุแม่เหล็กได้ใหม่ดังสมการต่อไปนี้

สมการสำหรับหัววัด MFM มีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วเดียว

$$F_q = \nabla \int \vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample} dV_{tip} = -q \cdot \vec{H}_{sample} \quad (2.27)$$

และสมการสำหรับหัววัด MFM มีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก

$$F_m = \nabla \int \bar{M}_{tip} \cdot \bar{H}_{sample} dV_{tip} = (\bar{m} \cdot \nabla) \bar{H}_{sample} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\bar{m} = \bar{M}_{eff} V_{eff}$  โดยที่  $\bar{M}_{eff}$  คือ แมกนีไทเซชันยังผลของหัววัด MFM และ  $V_{eff}$  คือ ปริมาตรยังผลของหัววัด MFM

เมื่อพิจารณาว่า แรงที่มากกระทำกับหัววัด MFM มีเฉพาะในแนวแกน  $z$  และทำการรวมแรงระหว่างหัววัด MFM แบบจุดมวลเข้าด้วยกัน จะได้

$$F = \mu_0 \left( -qH_z + m_x \frac{dH_x}{dz} + m_y \frac{dH_y}{dz} + m_z \frac{dH_z}{dz} \right) \quad (2.29)$$

หาอนุพันธ์สมการที่ (2.29) เทียบ  $z$  จะได้

$$\frac{dF}{dz} = \mu_0 \left( -q \frac{dH_z}{dz} + m_x \frac{d^2 H_x}{dz^2} + m_y \frac{d^2 H_y}{dz^2} + m_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} \right) \quad (2.30)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำต่อหัววัด MFM มีเฉพาะในแนวแกน  $z$  และหัววัดมีลักษณะเป็นโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก จะทำให้  $q = 0$  จะได้ว่า

$$\frac{dF}{dz} = \mu_0 \left( m_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} \right) \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) จะได้ว่า แรงที่กระทำต่อหัววัด MFM จะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์แม่เหล็ก  $m_z$  และสนามเหล็กภายนอก  $H_z$  ในแนวแกน  $z$  เท่านั้น

### 2.3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในคอมพิวเตอร์ โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล บริหารจัดการข้อมูล ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวแรกถูกสร้างขึ้นโดยบริษัทไอบีเอ็ม (International Business Machines: IBM) และใช้ชื่อว่า Random Access Method of Accounting and Control หรือ RAMAC [11] แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีความจุ 5 เมกะไบต์ (ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2 กิโลบิตต่อตารางนิ้ว) และใช้แผ่นบันทึกข้อมูลทั้งหมด 50 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 24 นิ้ว จึงทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รุ่นแรกมีขนาดใหญ่ เคลื่อนย้ายลำบาก ต่อมาจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีจัดเก็บข้อมูลให้สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้จำนวนมาก ๆ ในขณะที่ตัวอุปกรณ์หรือ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดเล็ก ซึ่งในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุสูงที่สุดมากถึง 10 เทระไบต์ [12] และแผ่นบันทึกข้อมูลมีขนาดเล็กลงโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 และ 3.5 นิ้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ก) RAMAC (ข) แผ่นบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ RAMAC

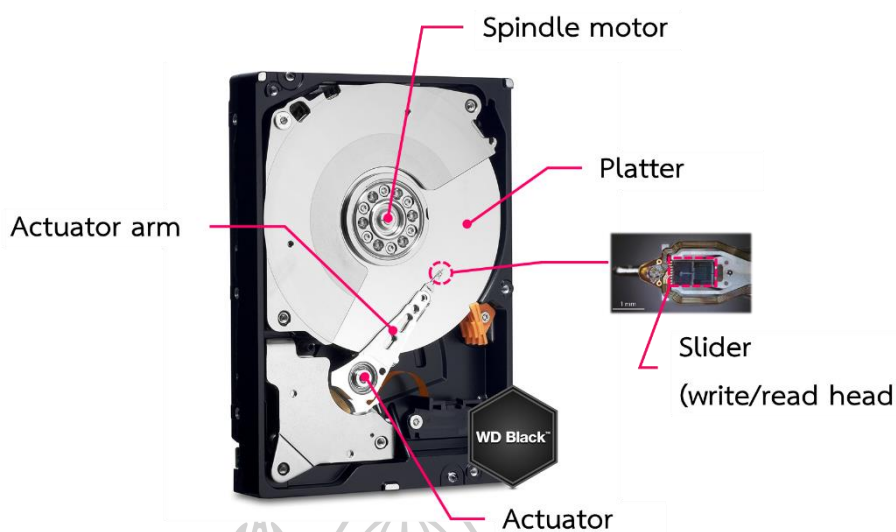
ที่มา: (ก) (15 May 2016). *engineeringhistory*. Available: <https://compute.info/tag/ramac>

ที่มา: (ข) (15 May 2016). *RAMAC The First Magnetic Hard Disk*. Available: <http://www03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/ramac/breakthroughs/>

#### 2.4.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บข้อมูล มีลักษณะเป็นจานกลมเคลือบด้วยสารแม่เหล็กทั้งสองด้าน ซึ่งจะถูกยึดเข้ากับแกนหมุน (spindle) และใช้สปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) เป็นตัวหมุนแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อให้ช่วยให้ฮาร์ดดิสก์มีความเร็วในการเขียน/อ่านเพิ่มขึ้น โดยปกติแผ่นบันทึกข้อมูลจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่ความเร็ว 7,200 รอบต่อนาที หัวเขียน/หัวอ่าน หรือเรียกว่า สไลเดอร์ (slider) ถูกสร้างขึ้นมาจากสารแม่เหล็ก ซึ่งในส่วนของหัวเขียนจะมีขดลวดเหนี่ยวนำพันอยู่ ดังรูปที่ 2.10 เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้ในการเขียนข้อมูล โดย slider จะถูกยึดไว้กับปลายของแขนเหล็ก (actuator arm) หัวเขียน/อ่านจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการหมุนของแกนหมุนหัวเขียน/หัวอ่าน (actuator) เพื่อให้สามารถเขียน/อ่านข้อมูลได้ทั่วทั้งแผ่นบันทึกข้อมูล การทำงานของฮาร์ดดิสก์จะถูกควบคุมด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (electronic circuit) เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผงวงจร หัวเขียน/หัวอ่านจะถูกนำออกจากแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากการกระแทก ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับข้อมูล หรือกับหัวเขียน/หัวอ่านได้

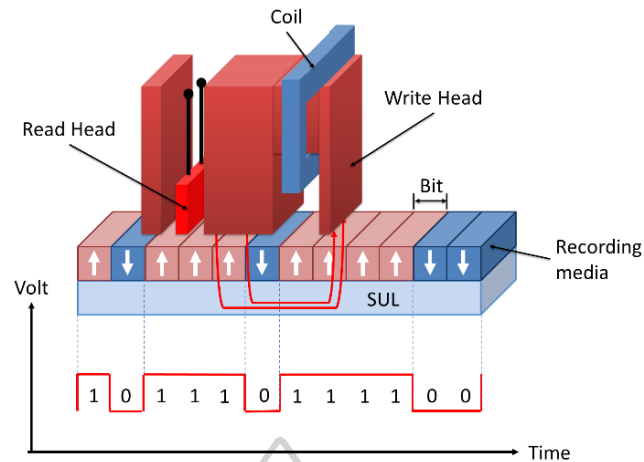




รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์  
 แก๊ไขจาก: (15 May 2016). *Internal Hard Drives*. Available: <https://www.amazon.com/Black-Performance-Desktop-Hard-Drive/dp/B011LVAVEQ>  
 แก๊ไขจาก: (15 May 2016). *Disk read-and-write head*. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Disk\\_read-and-write\\_head#/media/File:HDD\\_read-write\\_head.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head#/media/File:HDD_read-write_head.jpg)

#### 2.4.2 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ในปัจจุบันกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะใช้เทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording: PMR) โดยเพิ่มชั้นแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic under layer: SUL) เข้าไปในชั้นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.10 ในกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กนั้น จะเกิดขึ้นได้โดยแฉวงจรในฮาร์ดดิสก์จะทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลในรูปแบบไบนารี บิต “0” และ “1” ที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) แล้วส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียน (write coil) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณปลายโพล (write pole) ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้า/ออกจากหัวเขียนจะลงไปยังชั้นแม่เหล็กอ่อน โดยชั้นแม่เหล็กอ่อนนี้จะช่วยเหนี่ยวนำฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนให้ลงมายังชั้นบันทึกข้อมูล ซึ่งจะทำให้แมกนีไทเซชันของชั้นบันทึกข้อมูลเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามทิศสนามแม่เหล็กของหัวเขียน เทคโนโลยี PMR จึงช่วยทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุมากขึ้น



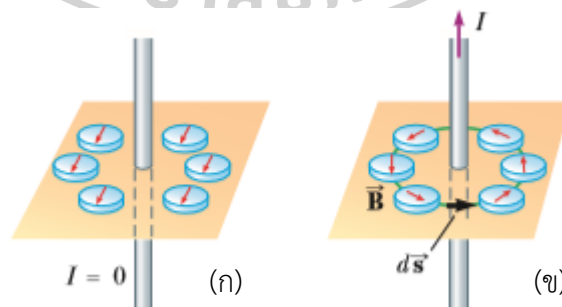
รูปที่ 2.10 กระบวนการบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากและสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียน  
ที่มา: อ ตอเลาะ. “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งด้วยการจำลอง  
ไฟไนท์เอลิเมนต์.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.

## 2.4 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน

จากหัวข้อที่ผ่านมา ไม่ว่าจะป็นหัววัด MFM วัสดุแม่เหล็ก หัวเขียน/หัวอ่าน แผ่นบันทึก  
ข้อมูลแม่เหล็ก ล้วนผลิตขึ้นมาจากสารแม่เหล็กทั้งสิ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีแม่เหล็ก  
พื้นฐาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง สนามแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็ก  
แมกนีไทเซชัน สภาวะแม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็ก และฮิสเทอรีซิส โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 สนามแม่เหล็ก

การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  
สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนโดยการนำเข็มทิศมาวางล้อมรอบลวดตัวนำ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดสนามแม่เหล็ก (ก) ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวด (ข) มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวด  
แก้ไขจาก: R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers with  
modern physics*, Student ed. USA: David Harris, 2008.



เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำ จะเห็นว่า เข็มทิศจะชี้ไปทิศเดียวกัน แต่เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ ทิศของเข็มทิศจะเบนไปตามแนวเส้นสัมผัสของวงกลม ดังรูปที่ 2.11 (ข)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ได้ด้วยกฎของแอมแปร์ เมื่อแบ่งเส้นรอบวงกลมที่มีรัศมี  $r$  ออกเป็นเวกเตอร์เล็ก ๆ  $d\vec{s}$  โดยแต่ละเวกเตอร์มีขนาดเท่ากับ  $\Delta s$  อยู่ในตามแนวเส้นสัมผัสของวงกลม ดังรูปที่ 2.11 (ข) เมื่อสนามไฟฟ้าของลวดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและ  $d\vec{s} \rightarrow 0$  จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าได้ 2 รูป คือ ในรูปอินทิกรัล และในรูปอนุพันธ์

กฎของแอมแปร์ในรูปอินทิกรัลจะเป็นการอินทิกรัลตามเส้นของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบลวดตัวนำที่จ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นวงปิด เรียกว่า ลูปแอมแปร์ (Amperian loop) ซึ่งพบว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบลูปแอมแปร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ ดังสมการ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.31)$$

และสามารถเขียนสมการที่ (2.31) ให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ได้ด้วยทฤษฎีบทสโตกส์ (Stoke's theorem)

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.32)$$

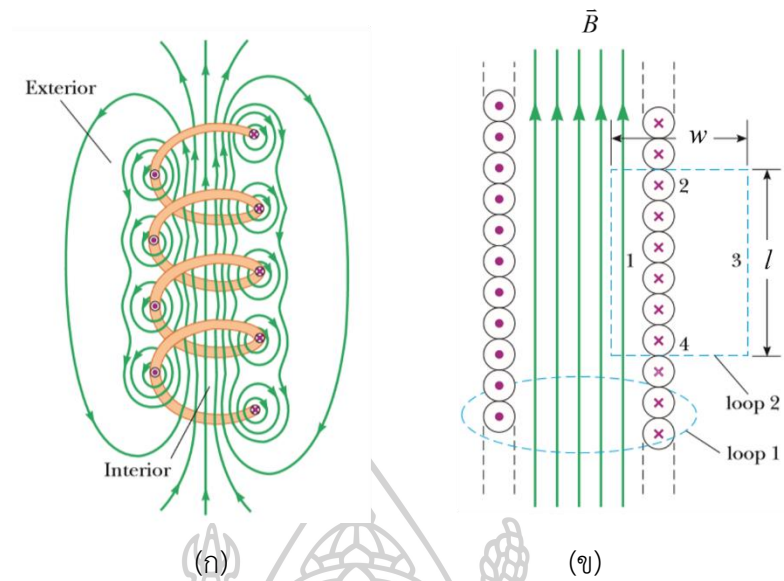
เมื่อ  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นกระแส (current density) หน่วย แอมแปร์ต่อตารางเมตร ( $A/m^2$ )

#### 2.4.2 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

โซลินอยด์ (solenoid) คือ ลวดยาวที่มีลักษณะขดเป็นเกลียว เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่มีขนาดคงที่ไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบริเวณรอบขดลวด ดังรูปที่ 2.12 (ก) โดยสนามแม่เหล็กสุทธิ (net magnetic field) คือ ผลรวมเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อยของแต่ละเกลียว สนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงขนานกันและสม่ำเสมอ ซึ่งสนามแม่เหล็กบริเวณนี้จะเป็นสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง

การคำนวณหาขนาดสนามแม่เหล็กจะอาศัยกฎของแอมแปร์ที่กล่าวไว้ว่า “การอินทิเกรตเชิงเส้นรอบเส้นปิดใด ๆ มีค่าแปรผันตรงกับกระแสสุทธิภายในผิวปิดนั้น” นั่นคือ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{net} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.12 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ (ก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด (ข) ภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติ สนามแม่เหล็กภายในขดลวดจะมีความสม่ำเสมอ  
 แก๊ไขจาก: R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers with modern physics*, Student ed. USA: David Harris, 2008.

เมื่อกำหนดผิวปิดให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว  $l$  กว้าง  $w$  ดังรูปที่ 2.12 (ข) และคำนวณหาสนามแม่เหล็กโดยใช้สมการที่ (2.33) รอบเส้นปิดทั้ง 4 ด้าน เมื่อพิจารณาเส้นปิดที่ 2 กับ 4 จะได้  $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$  เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับความยาว และเมื่อพิจารณาเส้นปิดที่ 3 จะทำให้  $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$  เช่นกันเนื่องจากไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกขดลวด ดังนั้นจะเหลือแค่เส้นปิดที่ 1 เท่านั้น จะได้

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{path 1}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{\text{path 1}} ds = Bl \quad (2.33)$$

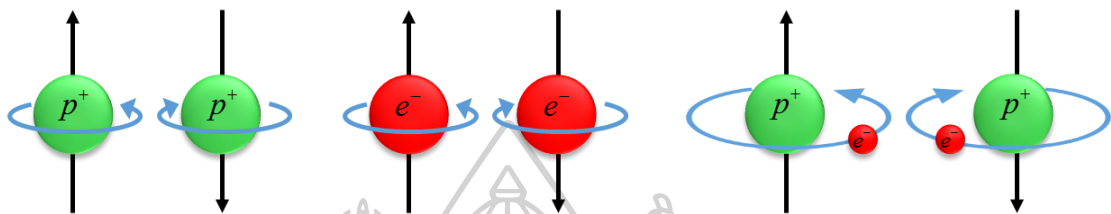
$$Bl = \mu_0 NI \quad (2.33)$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI \quad (2.33)$$

เมื่อ  $B$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  
 $N$  คือ จำนวนขดลวดทั้งหมด  
 $n$  คือ จำนวนรอบต่อความยาว

### 2.4.3 โมเมนต์แม่เหล็ก

โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment:  $\vec{m}$ ) เป็นสิ่งที่ใช้ในการอธิบายถึงสภาพแม่เหล็กหรือความเป็นแม่เหล็ก (magnetism) ของวัสดุ ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กก็คือสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบตัวเองของนิวเคลียส (spin of nucleus) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน (spin of electron) และการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส (electron orbital) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจาก (ก) การหมุนรอบตัวเองของนิวเคลียส (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน (ค) การโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

ค่าโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส จะเป็นไปตามสมการ

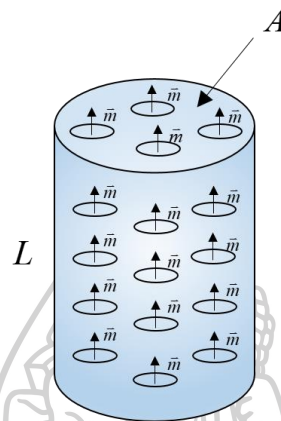
$$\vec{m} = -\frac{ehl}{4\pi m_e c} \quad (2.34)$$

เมื่อ	$e$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.60217662 \times 10^{-19}$ คุลอมบ์ (C)
	$h$	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ $6.62607004 \times 10^{-34}$ จูล·วินาที (J·s)
	$l$	คือ เลขควอนตัมออร์บิทัล (orbital quantum number = 0,1,2,...)
	$m_e$	คือ มวลของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $9.10938356 \times 10^{-31}$ กิโลกรัม (kg)
และ	$c$	คือ ความเร็วแสง มีค่าประมาณ $3.00 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที (m/s)

โดยโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนและการโคจรรอบนิวเคลียสนี้ จะมีทิศทางตามทิศของแกนหมุน ซึ่งจะมีได้เพียง 2 ทิศ ได้แก่ ทิศขึ้น และ ทิศลง ขนานกันแต่มีทิศตรงกันข้าม เพราะเหตุนี้ ทำให้สามารถมองได้ว่าอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมเป็นแม่เหล็กชิ้นเล็ก ๆ ค่าของโมเมนต์แม่เหล็ก อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า โบร์แมกนีตอน (bohr magneton:  $\mu_b$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.927 \times 10^{-27}$  erg/guass

#### 2.4.4 แมกนีไทเซชัน

ภายในวัสดุแม่เหล็กจะประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวรหรือโมเมนต์แม่เหล็กเล็ก ๆ มากมาย ถ้าสมมติให้วัสดุแม่เหล็กชิ้นหนึ่งมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่มีความยาว  $L$  มีพื้นที่หน้าตัด  $A$  มีโมเมนต์แม่เหล็ก  $\vec{m}$  จำนวน  $N$  ตัว ซึ่งวางตัวอยู่ในทิศทางเดียวกับแกนทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แท่งทรงกระบอกที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก  $N$  ตัว

ที่มา: (21 May 2016). *Magnetization*. Available: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>

กำหนดให้แมกนีไทเซชัน (magnetization:  $\vec{M}$ ) คือ ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิต่อปริมาตรเป็นดังสมการ

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i \quad (2.35)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของแท่งทรงกระบอก

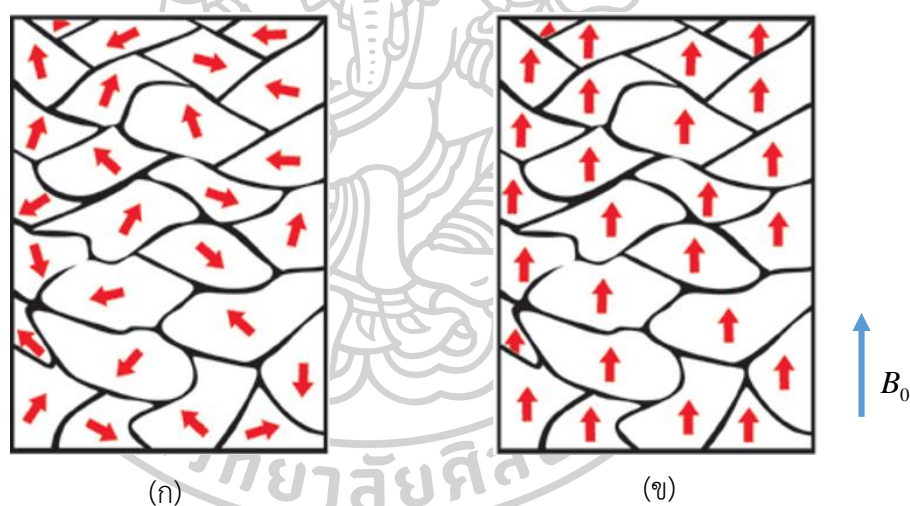
ในกรณีที่สมมติขั้นนี้ เมื่อโมเมนต์แม่เหล็กเรียงตัวอยู่ในทิศทางเดียวกัน จะทำให้หาค่าของแมกนีไทเซชันได้ด้วยสมการ

$$M = \frac{mN}{AL} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) พบว่า ค่าของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับจำนวนโมเมนต์แม่เหล็ก และ พื้นที่หน้าตัดคูณความยาว หรือก็คือ ปริมาตรของวัสดุแม่เหล็กนั่นเอง

#### 2.4.5 สารแม่เหล็กเฟอร์โรและฮีสเทอรีซิส

สารแม่เหล็กเฟอร์โร เป็นสารแม่เหล็กที่สามารถทำให้มีสภาพความเป็นแม่เหล็กคงอยู่ได้ ถึงแม้ว่าจะไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็ก หรือทำให้หมดสภาพความเป็นแม่เหล็กก็ได้ ภายในสารแม่เหล็ก เฟอร์โรจะมีการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเป็นกลุ่มในพื้นที่เล็ก ๆ เรียกว่าโดเมน (domain) โดยโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ดังรูปที่ 2.15 (ก) ซึ่งทำให้ค่าแมกนีไทเซชันสุทธิเป็นศูนย์ ( $\bar{M} = 0$ ) แต่ถ้านำสารแม่เหล็กเฟอร์โรไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะค่อย ๆ หมุนจนมีทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก จนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กภายในสารแม่เหล็กทั้งหมดมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.15 (ข) และเรียกแมกนีไทเซชัน ณ จุดนี้ว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization:  $M_s$ ) แต่เมื่อนำสารแม่เหล็กเฟอร์โรออกจากบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะมีการเปลี่ยนทิศทาง ทำให้ค่าแมกนีไทเซชันสุทธิลดลงแต่จะไม่เป็นศูนย์ เรียกแมกนีไทเซชันจุดนี้ว่า แมกนีไทเซชันคงค้าง (magnetic remanence:  $M_r$ )



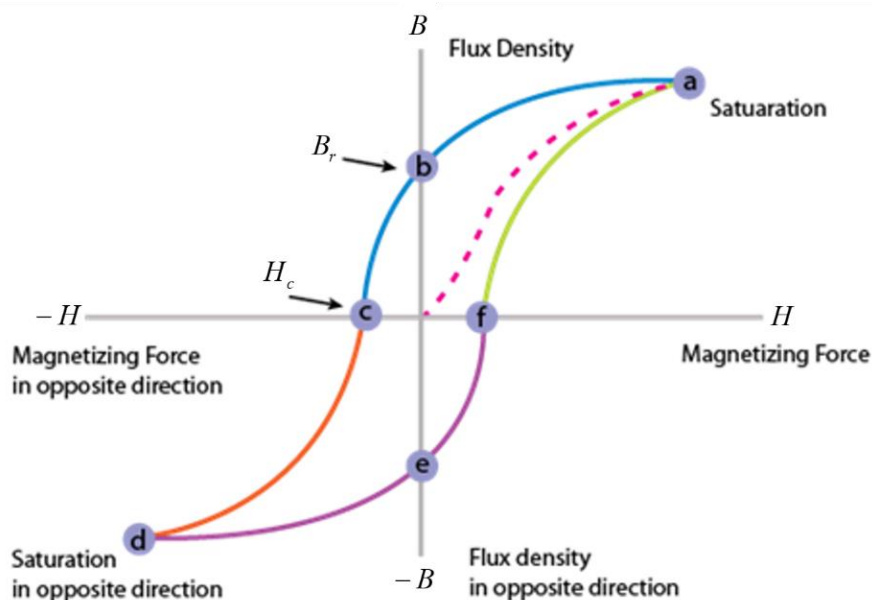
รูปที่ 2.15 โดเมนภายในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างสุ่ม (ข) การจัดเรียงของโมเมนต์แม่เหล็กตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก

แก้ไขจาก: (21 May 2016). *Ferromagnetic*. Available: [https://www.reddit.com/r/Elements/comments/g9op9/magnetism\\_and\\_magnets\\_part\\_2\\_filling\\_orbitals/](https://www.reddit.com/r/Elements/comments/g9op9/magnetism_and_magnets_part_2_filling_orbitals/)

สารแม่เหล็กเฟอร์โรเป็นสารที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปผลิตเป็นหัวเขียน/อ่าน แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นอกจากนี้ยังเป็นสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM ด้วยเช่นกัน เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวดังที่ได้เกริ่นไปในหัวข้อที่ผ่านมา โดยทั่วไปคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะสามารถบอกได้ด้วย



ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก  $\vec{H}$  กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\vec{B}$  ของสารแม่เหล็กเฟอร์โร ดังรูปที่ 2.16



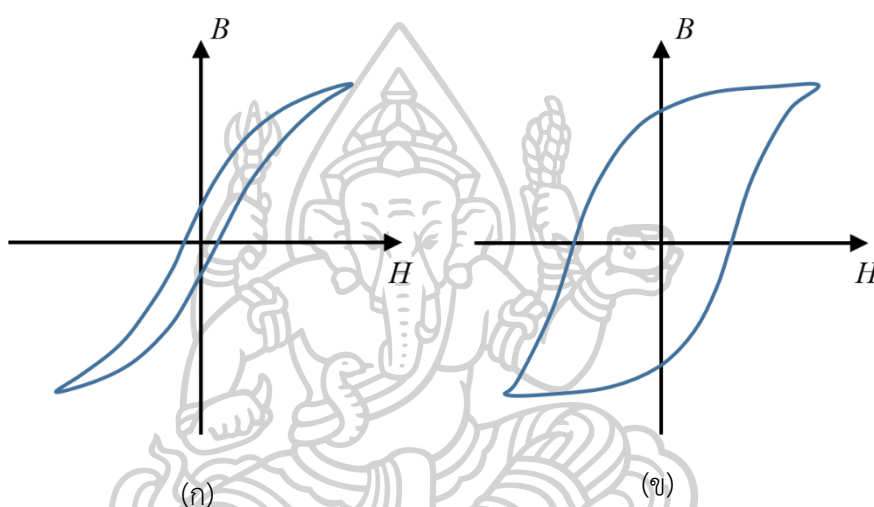
รูปที่ 2.16 ฮิสเทอรีซิสลูปที่แสดงคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โร

ที่มา: (21 May 2016). *Hysteresis Loop*. Available: <http://www.electricalengineering123.com/explanation-of-hysteresis-loss-eddy-current-losses-in-transformers/>

เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  แก่สารแม่เหล็กเฟอร์โรเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  เพิ่มขึ้น ดังเส้นประสีชมพู จนถึงจุดอิ่มตัวที่จุด a ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กภายในสารแม่เหล็กเฟอร์โรมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก  $H$  ทั้งหมด ทำให้มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด เรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetic flux density:  $B_s$ ) ต่อมาลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนเป็นศูนย์ เส้นโค้งตามปริมาณสนามแม่เหล็กจะไม่ทับเส้นเดิม แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นโค้ง a - b (เส้นสีฟ้า) ซึ่งจะเห็นว่าสารแม่เหล็กเฟอร์โรยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้อยู่ แม้ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ โดยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่จุด b นี้ เรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (remanence magnetic flux density:  $B_r$ ) เมื่อใส่สนามแม่เหล็กที่มีทิศตรงกันข้ามเท่ากับ  $H_c$  จะทำให้สารแม่เหล็กเฟอร์โรไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กอีกต่อไปที่จุด c ซึ่งเรียกว่า โคเออร์ซิวิตี (Coercivity) หากเพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็กไปทางติดลบมากขึ้น จะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กภายในสารมีการอิ่มตัวอีกครั้งที่จุด d แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับ  $B_s$  เขียนแทนด้วย  $-B_s$  และเมื่อลดสนามแม่เหล็กลงจนเป็นศูนย์อีกครั้งที่จุด e ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่า  $-B_r$  หากให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศ

ตรงข้ามอีกครั้ง จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แต่จะไม่ทับเส้นประสีชมพู แต่จะเป็นเส้นโค้ง  $e - f - a$  ซึ่งจะกลายเป็นวงครบ 1 รอบ เรียกว่า ฮิสเทอรีซิสลูป

นอกจากฮิสเทอรีซิสลูปของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะสามารถบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กได้แล้ว ยังสามารถใช้ในการจำแนกประเภทของสารแม่เหล็กเฟอร์โรได้อีกด้วย ซึ่งสารแม่เหล็กเฟอร์โรมี 2 ประเภท ได้แก่ สารแม่เหล็กเฟอร์โรอย่างอ่อน (soft ferromagnetic) และสารแม่เหล็กเฟอร์โรอย่างแข็ง (hard ferromagnetic) ซึ่งมีลักษณะฮิสเทอรีซิสลูปเป็นดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

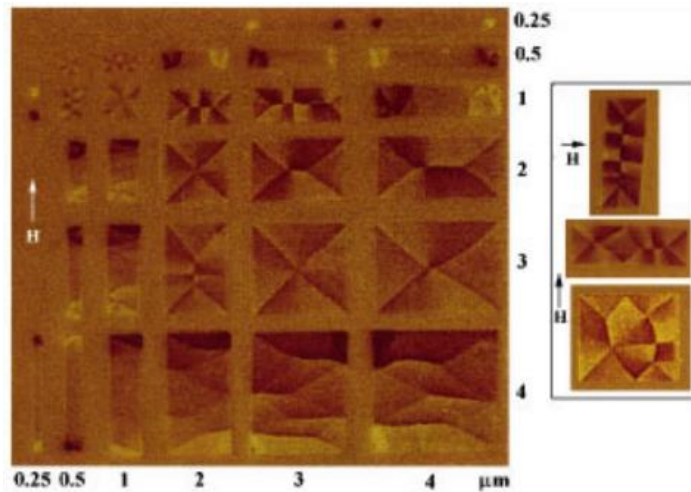


รูปที่ 2.17 ฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) แบบอ่อน (ข) แบบแข็ง

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

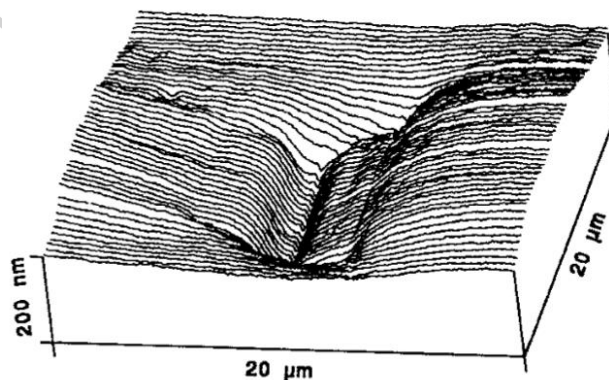
จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ MFM พบว่า ในยุคแรก ๆ MFM จะถูกใช้ในการถ่ายภาพโดเมนแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ เช่น ในปี ค.ศ. 1999 นักวิจัยชื่อ Gomez และคณะ [13] ทำการศึกษาการกระจายตัวของแมกนีไทเซชันภายในสารแม่เหล็ก NiFe โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 150 Oe ให้กับตัวอย่างแม่เหล็ก จากนั้นหยุดการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก และใช้ MFM มาถ่ายภาพโดเมนแม่เหล็กที่เกิดการคงค้าง ดังรูปที่ 2.18 โดยสีของรูปภาพสนามแม่เหล็กจะเป็นสิ่งที่ใช้ในการบอกทิศทางการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในสาร





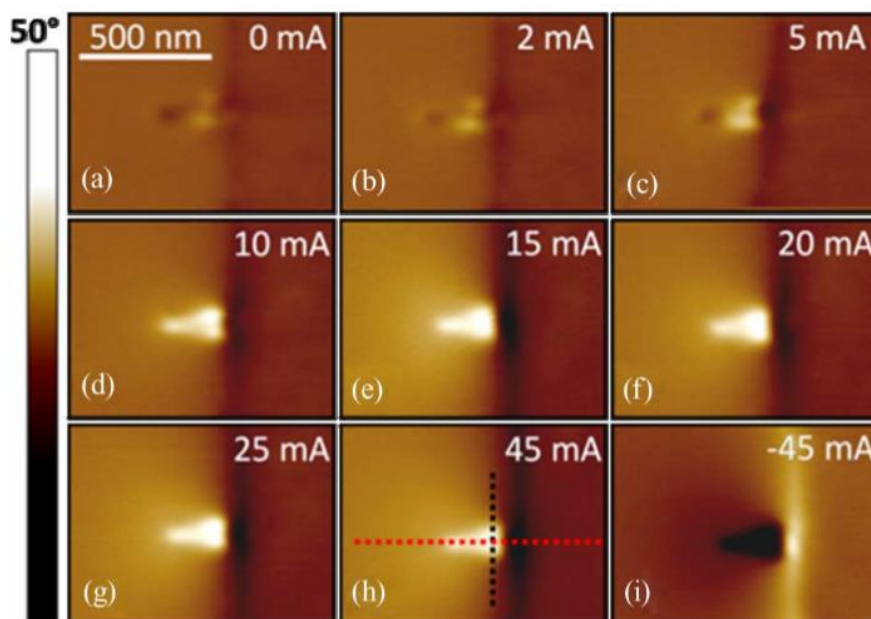
รูปที่ 2.18 รูปภาพ MFM ของสนามแม่เหล็กคงค้างภายในสารแม่เหล็ก permalloy  
 ที่มา: R. D. Gomez, T. V. Luu, O. A. Pak, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, "Domain configurations of nanostructured Permalloy elements," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 6163-6165, 1999.

ในปี ค.ศ. 1994 นักวิจัยชื่อ Rice และคณะ [14] ได้ใช้ MFM ในการศึกษาลักษณะสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยการป้อนกระแสไฟฟ้า DC ที่ 30 mA ให้กับหัวเขียนแม่เหล็กแบบแวนอน ในขณะที่หัววัด MFM สแกนไปบนพื้นผิวของหัวเขียน โดยหัววัด MFM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เคลือบด้วย Fe หนา 20 nm และ Au หนา 5 nm ผลการตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 2.19 จะเห็นว่ารอยบุ๋มมีการยุบตัวลงไปเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.19 การสแกนจากการตรวจวัดหัวเขียนแบบแวนอนด้วย MFM  
 ที่มา: P. Rice, J. Moreland, and A. Wadas, "dc magnetic force microscopy imaging of thin-film recording head," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, no. 10, pp. 6878-6880, 1994.

ในปี ค.ศ. 2010 นักวิจัยชื่อ Amos และคณะ [15] ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กอ้อมตัวของหัวเขียน โดยใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย FePt ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กอย่างแข็ง โดยมีค่าโคเออร์ซิวิตีสูงกว่า 11 kOe ในการทดสอบหัวเขียนจะถูกป้อนกระแสไฟฟ้า DC ตั้งแต่ 0 – 45 mA และ -45 mA รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแสดงดังรูปที่ 2.20



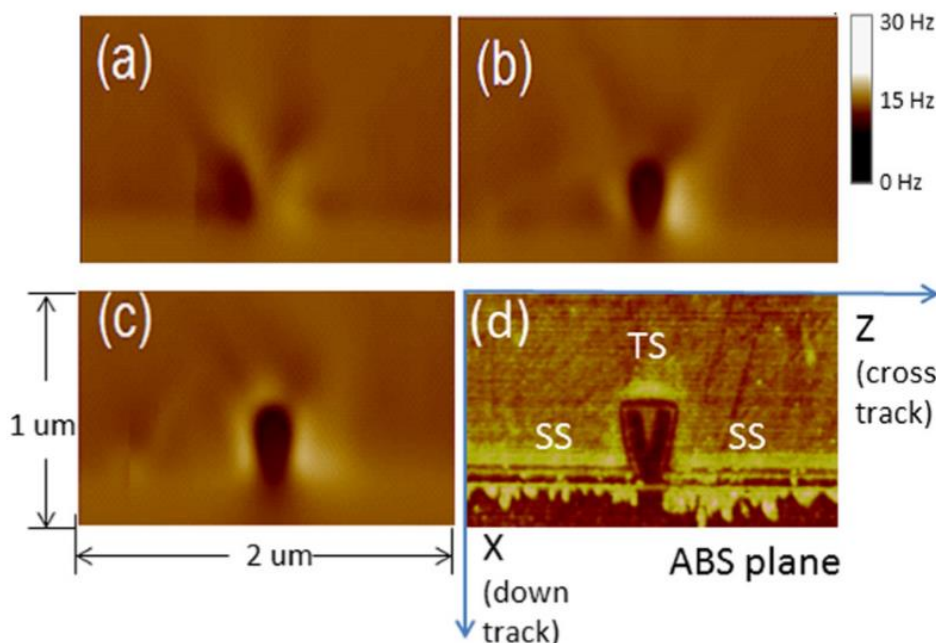
รูปที่ 2.20 รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูง ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 0 mA (b) 2 mA (c) 5 mA (d) 10 mA (e) 15 mA (f) 20 mA (g) 25 mA (h) 45 mA และ (i) -45 mA

ที่มา: N. Amos *et al.*, "Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices," *IEEE MAGNETICS LETTERS*, vol. 1, 2010.

จากรูปที่ 2.20 จะเห็นว่า ข้อดีของการใช้หัววัด MFM ที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูงนั้นจะทำให้สามารถระบุทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนได้

ต่อมา ในปี ค.ศ. 2012 นักวิจัยชื่อ Liu และคณะ [16] ศึกษาฟุตพริ้น (footprint) ของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง (ซึ่ง “footprint” ในที่นี้หมายถึง การเขียนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนลงไปบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีชั้นแม่เหล็กอ่อนโดยตรง) โดยใช้หัววัด MFM ที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีประมาณ 5000 Oe สแกนไปบนพื้นผิวของหัวเขียนขณะที่ป้อน

กระแสไฟฟ้าแตกต่างกันตั้งแต่ 0 – 30 mA รูปภาพสนามแม่เหล็กของการตรวจวัดเป็นดังรูปที่ 2.21 (a) – (c) และรูปภาพพื้นผิวของหัวเขียนเป็นดังรูปที่ 2.21 (d)



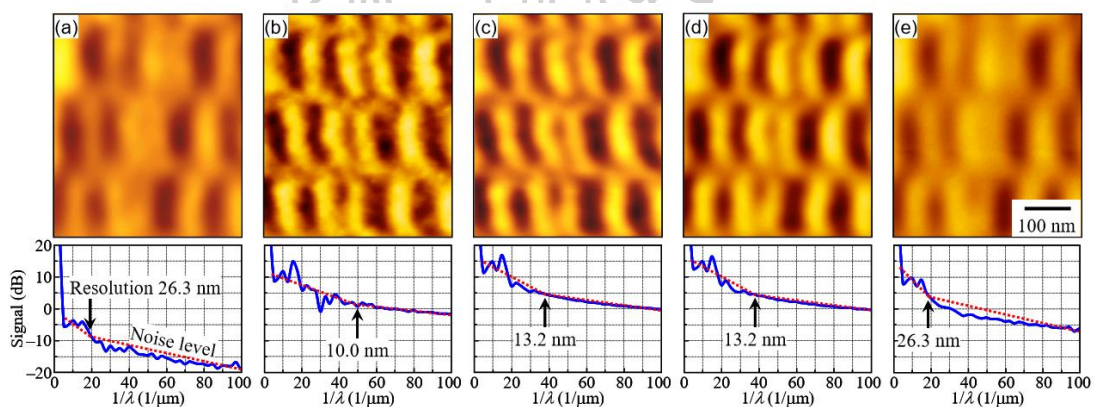
รูปที่ 2.21 สนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ตรวจวัดด้วย MFM เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (a) 0 mA (b) 10 mA (c) 30 mA และ (d) รูปภาพพื้นผิวของหัวเขียนที่ถ่ายด้วย AFM  
ที่มา: F. Liu *et al.*, "Characteristics of magnetic force microscopy magnetics on high moment perpendicular magnetic recording writers with high coercivity probes," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, 2012.

จากรูปที่ 2.21 (a) จะเห็นว่า ไม่มีการคงค้างของแมกนีไทเซชันเมื่อไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับหัวเขียน แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า 10 mA และ 30 mA ดังรูปที่ 2.21 (b) และ (c) จะเห็นว่าขนาดของสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่ขนาดของสนามแม่เหล็กมีขนาดเท่าเดิมเนื่องจากหัวเขียนถูกล้อมรอบด้วย ชิลด์ด้านบน (trailing shield: TS) และชิลด์ด้านข้าง (side shield: SS)

จากการทบทวนงานวิจัยที่กล่าวไปข้างต้น จะเห็นว่า MFM มีการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งแต่ละการตรวจวัดนั้นจะมีความต้องการใช้หัววัด MFM ที่ต่างกัน แต่ทุกงานที่ตรวจวัดด้วย MFM นั้น นักวิจัยส่วนใหญ่จะมีความคำนึงถึงความละเอียดของข้อมูลที่สามารถตรวจวัดได้ ตัวอย่างเช่น การศึกษาโดเมนแม่เหล็ก เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้ MFM ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนนั้น จะต้องใช้หัววัด MFM ที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดี เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนเป็นสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง ดังนั้น นักวิจัยจึงพยายามพัฒนาหัววัด MFM ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น

ในปี ค.ศ. 2002 นักวิจัยชื่อ Phillips และคณะ [17] ทำการปรับปรุงหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Co ที่ความหนา 30 nm ด้วยเทคนิคโฟกัสไอออนบีมมิลลิ่ง (focus ion beam milling) โดยใช้  $\text{Ga}^+$  เพื่อเพิ่มความละเอียดของการตรวจวัด โดยการตรวจวัดสารแม่เหล็ก CoNi/Pt ซึ่งให้ค่าความละเอียดเท่ากับ 30 nm

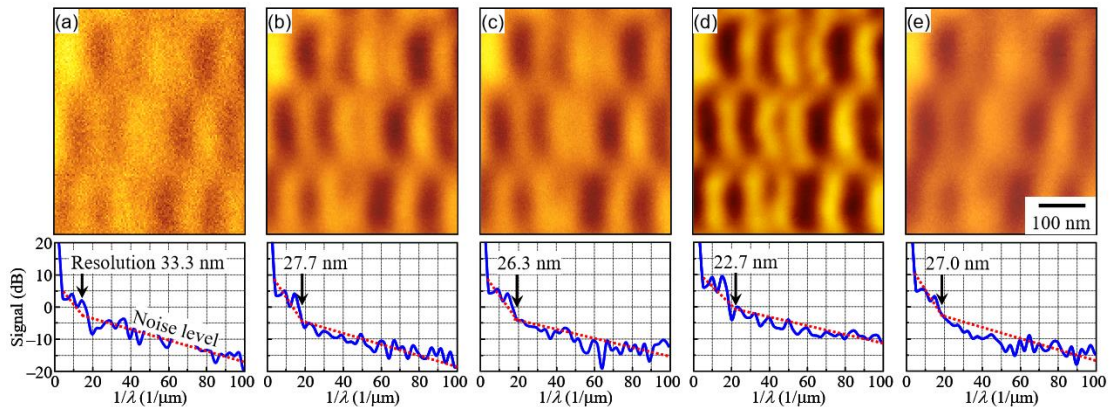
ในปี ค.ศ. 2011 นักวิจัยชื่อ Nagano และคณะ [4] ได้ศึกษาผลกระทบของความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM ต่อความละเอียดในการตรวจวัด โดยการเคลือบ Co และ CoCrPt บนหัววัด AFM ที่ขนาดรัศมี 5 nm ที่ความหนา 10 – 80 nm แล้วนำไปตรวจวัดแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ  $163 \text{ Gb/in}^2$  ผลการตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Co และ CoCrPt ที่ความหนาต่าง ๆ เป็นดังรูปที่ 2.22 และ รูปที่ 2.23 ตามลำดับ ค่าความละเอียดในการตรวจวัดสามารถคำนวณได้โดยการใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์ เพื่อแยกสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดออกจากสัญญาณรบกวน ซึ่งจุดตัดของเส้นความชันของสัญญาณทั้งสองที่กล่าวมานั้นจะเป็นค่าความละเอียดในการตรวจวัด แสดงดังกราฟย่อยในรูปที่ 2.22 – 2.23



รูปที่ 2.22 รูปภาพสนามแม่เหล็กของข้อมูลแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Co ที่ความหนา (a) 10 nm (b) 20 nm (c) 30 nm (d) 40 nm และ (e) 60 nm

ที่มา: K. Nagano, K. Tobar, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Effect of Magnetic Film Thickness on the Spatial Resolution of Magnetic Force Microscope Tips," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 303, p. 012014, 2011.

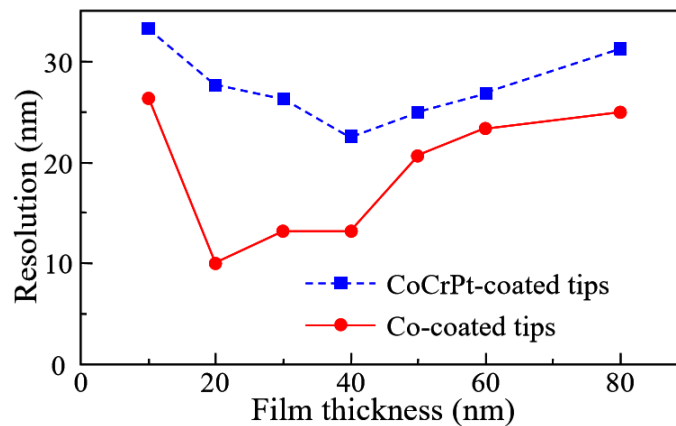




รูปที่ 2.23 รูปภาพสนามแม่เหล็กของข้อมูลแม่เหล็กที่ตรวจวัดด้วย หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย

CoCrPt ที่ความหนา (a) 10 nm (b) 20 nm (c) 30 nm (d) 40 nm และ (e) 60 nm

ที่มา: K. Nagano, K. Tobar, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Effect of Magnetic Film Thickness on the Spatial Resolution of Magnetic Force Microscope Tips," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 303, p. 012014, 2011.



รูปที่ 2.24 ความละเอียดของการตรวจวัดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

ที่มา: K. Nagano, K. Tobar, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Effect of Magnetic Film Thickness on the Spatial Resolution of Magnetic Force Microscope Tips," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 303, p. 012014, 2011.

จากรูปที่ 2.24 พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Co ที่ 20 nm จะมีความละเอียดในการตรวจวัดที่ดีที่สุด โดยมีความละเอียดของข้อมูลที่เล็กที่สุดที่วัดได้เท่ากับ 10 nm เมื่อสังเกต รูปที่ 2.22 (b) จะมีความคมชัดที่สุดนั่นเอง ส่วนหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย CoCrPt จะตรวจวัดความละเอียดของข้อมูลที่เล็กที่สุดได้เท่ากับ 22.7 nm เมื่อเคลือบด้วยความหนา 40 nm

จากการทบทวนงานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นว่าทุกแอปพลิเคชันของ MFM จะใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni NiFe และ NiCo ซึ่งเป็นตัวแทนของสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ สารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบอ่อนพิเศษ (super soft ferromagnetic) สารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบอ่อน (soft ferromagnetic) และสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบแข็ง (hard ferromagnetic) ตามลำดับ โดยใช้ระบบ MFM ที่ติดตั้งหัวเขียนแม่เหล็กเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งวิธีการตรวจวัดการตอบสนองและการวิเคราะห์ข้อมูลจะแสดงในบทถัดไป



### บทที่ 3

#### การตรวจวัดการตอบสนองของหัววัด MFM ด้วยหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉาก

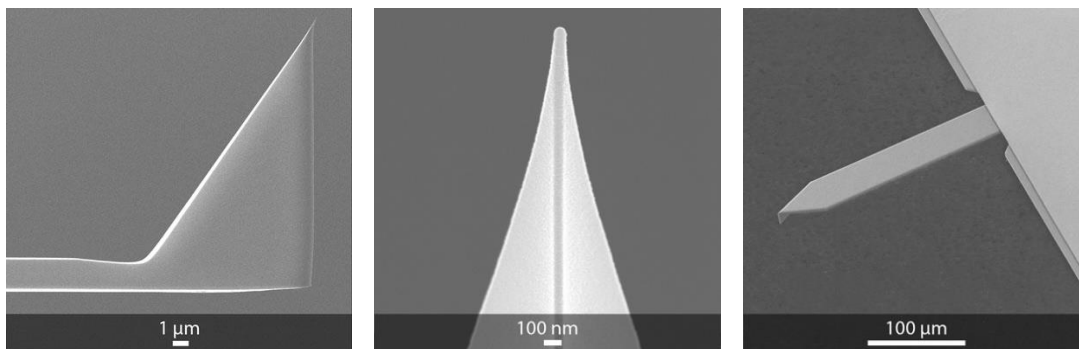
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์โรแบบอ่อนพิเศษ แบบอ่อน และแบบแข็ง ต่อสนามแม่เหล็ก AC และ DC โดยใช้หัวเขียนแม่เหล็กเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเลือกใช้งานของหัววัดเนื่องจากแอปพลิเคชันในการใช้งาน MFM มีความหลากหลาย การตรวจวัดการตอบสนองของหัววัดต่อสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยหัวเขียนแม่เหล็กถูกกระทำภายใต้ระบบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในโหมดความต่างเฟส (phase contrast mode)

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มจากข้อมูลของตัวอย่างสำหรับการนำมาตรวจสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ลักษณะและโครงสร้างของหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก ต่อจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กและการตรวจวัดหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญที่ใช้ในงานวิจัย การพิจารณาการตอบสนองของหัววัด MFM และการอธิบายความหมายของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปวิเคราะห์

#### 3.1 ข้อมูลของหัววัด MFM ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การตอบสนองของหัววัด MFM จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM รวมไปถึงความคมชัดของภาพที่เกิดจากการสแกนทั่วบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่มีความเป็นแม่เหล็ก [18] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หัววัด MFM เซิงพาณิชย์รูปทรงโอปัส (OPUS) ของบริษัท Nanosensors แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยหัววัด หัววัด MFM ที่ใช้จะเคลือบสารแม่เหล็กแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ นิกเกิล (Ni) นิกเกิลไอรอน (NiFe) และนิกเกิลโคบอลต์ (NiCo) โดยสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่เลือกใช้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรแบบอ่อนพิเศษ (super soft ferromagnetic) สารแม่เหล็กเฟอร์โรแบบอ่อน (soft ferromagnetic) และ สารแม่เหล็กเฟอร์โรแบบแข็ง (hard ferromagnetic) ตามลำดับ ข้อมูลทางเทคนิคของหัววัด MFM และตัวคานแสดงในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 ตามลำดับ





รูปที่ 3.1 รูปภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัด MFM ที่มีรูปทรงโอส (ก) ด้านข้าง (side view) (ข) ด้านหน้า (front view) และ (ค) ตัวคาน (cantilever)

ที่มา: (4 June 2016). *240AC-MC*. Available: <http://www.opustips.com/en/afm-tip-240ac-ma.html>

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของหัววัด MFM

Parameters	Size
Height ( $\mu\text{m}$ )	14
Radius (nm)	< 60
Tip angles	0° front, 35° back, < 9° side
Film thickness (nm)	50

ที่มา: (4 June 2016). *AFM Tip*. Available: <http://www.opustips.com/en/afm-tip-240ac-ma.html>

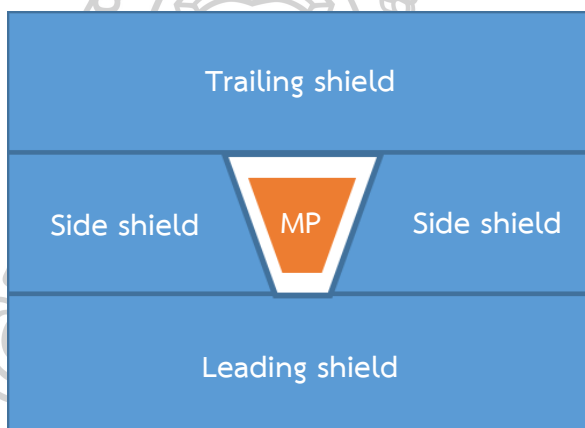
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของตัวคาน

Parameters	Size
Length ( $\mu\text{m}$ )	230 - 250 $\mu\text{m}$
Width ( $\mu\text{m}$ )	38 - 42 $\mu\text{m}$
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	2.1 - 3.1 $\mu\text{m}$
Force constant	0.6 - 3.9 $\mu\text{m}$
Resonance Frequency	45 - 90 kHz

ที่มา: (4 June 2016). *AFM Cantilever*. Available: <http://www.opustips.com/en/afm-tip-240ac-ma.html>

### 3.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ทั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (direct current magnetic field: DC field) และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (alternative current magnetic field: AC field) ดังนั้น แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอกจะต้องสร้างสนามแม่เหล็กได้ ทั้ง 2 รูปแบบ จากการทบทวนวรรณกรรมและวารสารที่ผ่านมาพบว่า หัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording head: PMR) สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงถึง 2.4 T [19] และยังสามารถตอบสนองต่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับได้มากกว่า 1 GHz [20, 21] จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉากเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 3.2 โครงสร้างหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉากมุมมองด้าน ABS

หัวเขียนแบบ PMR ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นโมเดลแบบมีซิลด์ล้อมรอบหัวเขียน (full wrapped-around shield) ซึ่งประกอบไปด้วย โพลหลักสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก (main pole: MP) ซึ่งอยู่ตรงกลาง ซิลด์ด้านบน (trailing shield: TS) ซิลด์ด้านข้าง (side shield: SS) ซิลด์ด้านล่าง (leading shield: LDS) ซิลด์ทั้งหมดทำหน้าที่เพิ่มเกรเดียนสนามแม่เหล็กของหัวเขียนให้มีค่าสูงขึ้นในแต่ละด้านแบบจำลองของหัวเขียนแบบ PMR ในมุมมองด้าน ABS แสดงดังรูปที่ 3.2

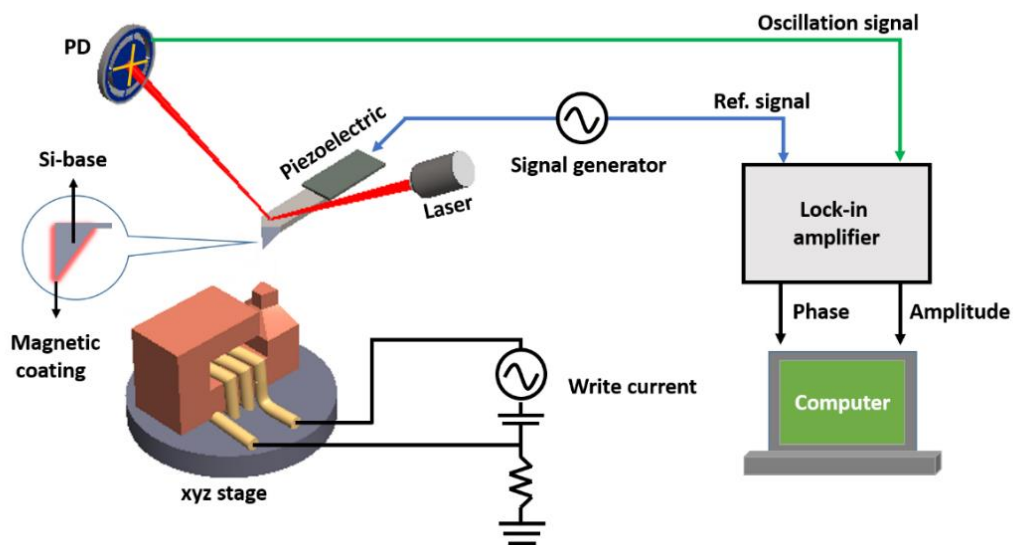
### 3.3 การตรวจสอบการตอบสนองของหัววัด MFM ด้วยหัวเขียนแม่เหล็ก

#### 3.3.1 การจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การจัดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM ด้วยหัวเขียนแม่เหล็กเป็น ดังรูปที่ 3.3 โดยเริ่มจากการติดตั้งชุดหัววัด MFM เข้ากับเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เมื่อทำการจ่าย

แรงดันไฟฟ้าให้แก่เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลทำให้คานสั้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ แรงดันไฟฟ้าค่าที่ทำให้คานสั้นจะถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (Lock-in amplifier) เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) จากนั้นทำการปรับเลเซอร์ให้ตกกระทบที่ปลายคาน แสงเลเซอร์จะสะท้อนปลายคานไปยัง PSD โดยสัญญาณเอาท์พุทจาก PSD จะส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณล็อกอินเพื่อใช้เป็นสัญญาณเปรียบเทียบ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำต่อคานจะทำให้แอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของคานเปลี่ยนแปลงไปดังสมการ  $\Delta A = \frac{2A_0Q}{3\sqrt{3}k} \frac{dF_{t-s}}{dz}$  และ  $\Delta\phi = \frac{Q}{k} \frac{dF_{t-s}}{dz}$  จะทำให้ได้การเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดของคาน ณ ตำแหน่งหรือบริเวณที่ทำการตรวจวัด

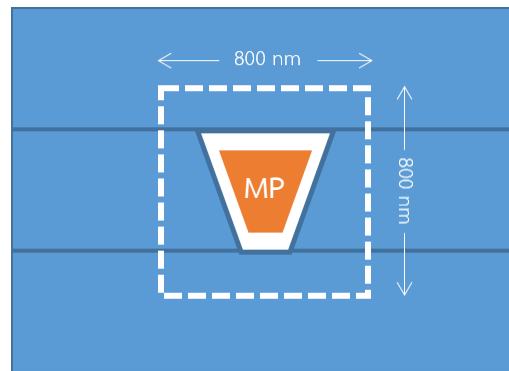
หัวเขียนแม่เหล็กถูกติดตั้งบนฐานรองที่สามารถปรับเลื่อนระยะได้ในแนวแกน x y และ z จากนั้นเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ปลายโพลของหัวเขียนในทิศ  $\pm z$



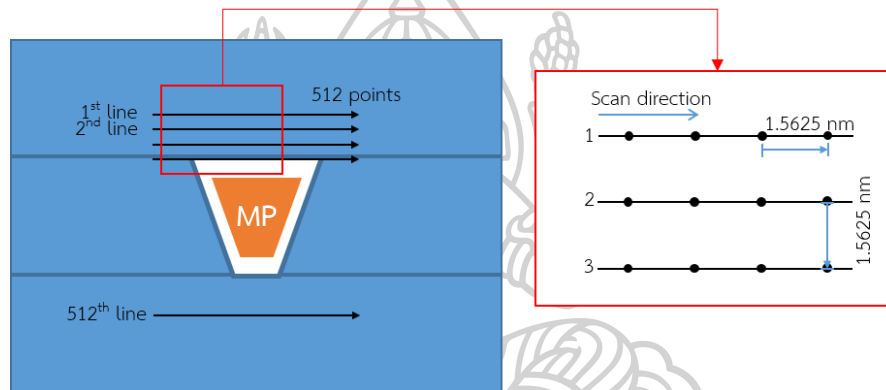
รูปที่ 3.3 การติดตั้งระบบสำหรับการตรวจสอบการตอบสนองของหัววัด MFM

### 3.3.2 การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กและการสร้างภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียน

การตรวจวัดหัวเขียนสามารถกระทำได้โดยกำหนดระยะห่างระหว่างหัววัด MFM กับหัวเขียน หรือเรียกอีกอย่างว่า ความสูงของการสแกน (scan height: SH) ให้อยู่ในช่วง 10 – 100 nm [22] และกำหนดขอบเขตของการตรวจวัดเป็นพื้นที่ขนาด 800 nm x 800 nm ความละเอียดในการสแกน 512 pixel x 512 pixel ดังนั้นระยะห่างของแต่ละตำแหน่งจะมีค่าเท่ากับ 1.5625 nm ดังรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

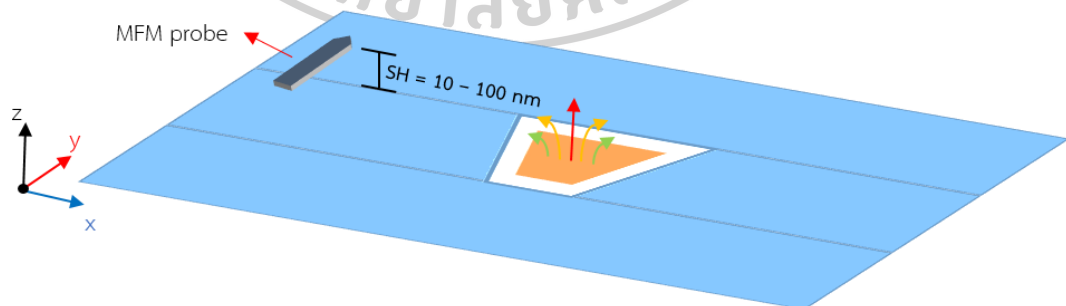


(ก)



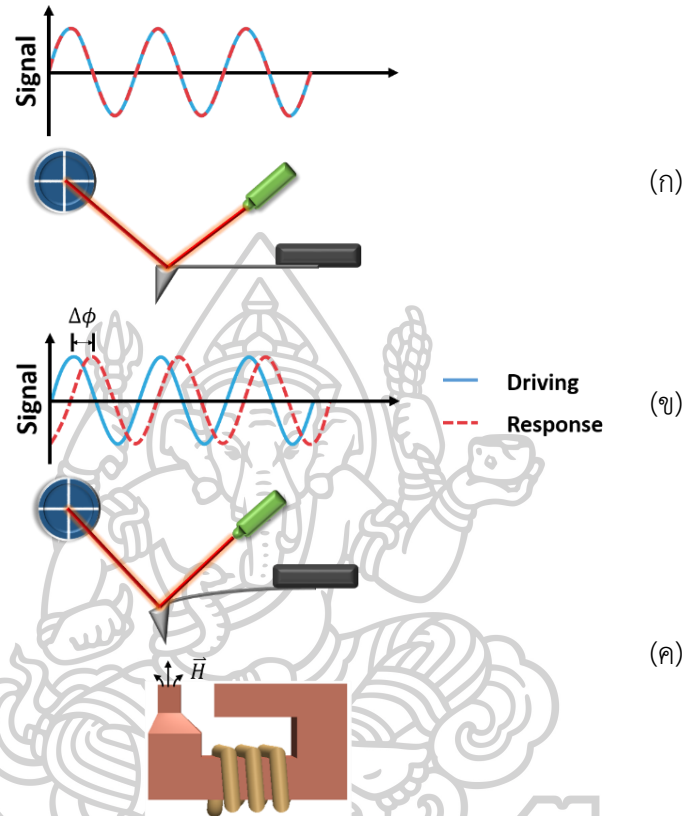
(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) ขอบเขตของการสแกนทั่วบริเวณหัวเขียน (ข) เส้นของการสแกนตามบริเวณที่กำหนด โดยเริ่มสแกนจากซ้ายไปขวา รูปเล็กคือระยะห่างในแต่ละตำแหน่งของการสแกนทั้งในแกน x และ แกน y



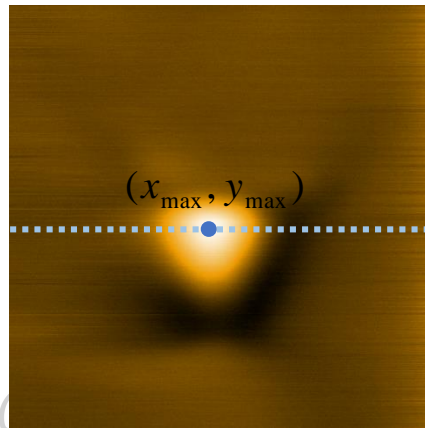
รูปที่ 3.5 ลักษณะการตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยหัวเขียนในแนวแกน x หรือ แนวครอส แทร็ค

หัววัด MFM จะสแกนผ่านทั่วทั้งบริเวณหัวเขียนในแนวครอสแทร็ค (cross track) ในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียน เพื่อเหนี่ยวนำให้หัวเขียนสร้างสนามแม่เหล็กในทิศพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากหัวเขียนตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.5

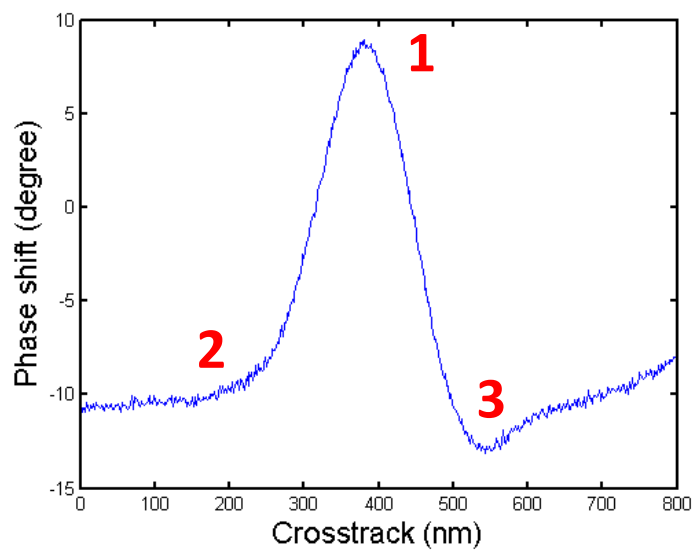


รูปที่ 3.6 ลักษณะการโค้งงอและการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน (ก) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (ข) และ (ค) กรณีมีสนามแม่เหล็กภายนอก

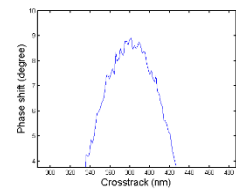
รูปที่ 3.6 (ก) แสดงให้เห็นการสั่นของคานก่อนได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก แอมพลิจูดและเฟสของคานจะมีค่าคงที่ แต่เมื่อหัววัด MFM สแกนผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กทั้งแรงดูดและแรงผลัก ดังรูปที่ 3.6 (ค) แรงที่เกิดขึ้นจะทำให้คานเกิดการโค้งงอส่งผลให้แอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของคานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังรูปที่ 3.6 (ข) โดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสที่เกิดขึ้นบ่งบอกถึงความเข้มของสนามแม่เหล็กในแต่ละบริเวณที่ตรวจวัด ดังนั้นข้อมูลการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสจะถูกนำมาสร้างเป็นภาพสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.7 (ก)



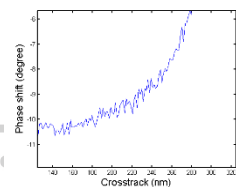
(ก)



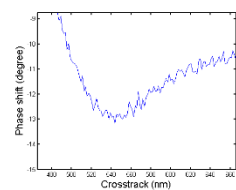
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 3.7 (ก) รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จาก MFM (ข) ค่าความต่างเฟสของเส้นสแกนที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุด (ค) (ง) และ (จ) รูปภาพขยายของหมายเลขที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในการวิเคราะห์การตอบสนองของหัววัด MFM นั้น ผู้วิจัยจะพิจารณาค่าความต่างเฟส ณ ตำแหน่งที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดของการตรวจวัดซึ่งอยู่ในตำแหน่งจุดสีน้ำเงิน ( $x_{max}, y_{max}$ ) ของรูปที่ 3.7 (ก) และจะดึงค่าความต่างเฟสที่วัดได้ในเส้นประมวลกราฟ ดังรูปที่ 3.7 (ข) เพื่อพิจารณาลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด และใช้ในการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยการนำค่าความต่างเฟสสูงสุดลบค่าความต่างเฟสต่ำสุด จากรูปจะเห็นว่า ข้อมูลมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ซึ่งจะทำให้การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น จะนำค่าความต่างเฟสของบริเวณหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งมีขนาดของข้อมูลในแนวทวนแตรีกและในแนวครอสแตรีกเท่ากับ  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  มาทำการเฉลี่ยเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัด และลดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average method) ใช้ชุดคำสั่งในภาคผนวก (ก)

ในการเฉลี่ยข้อมูลค่าความต่างเฟส จะเริ่มเฉลี่ยข้อมูลในแนวทวนแตรีกก่อน โดยการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทุก ๆ 5 ตำแหน่งที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 3.8 (ข) จะเห็นว่าค่าความต่างเฟสในตำแหน่งเกิดจากการเฉลี่ยข้อมูลในตำแหน่ง A1 A2 A3 A4 และ A5 และจะทำการเฉลี่ยข้อมูลไปเรื่อย ๆ จนถึงข้อมูลตำแหน่ง A508 เมื่อทำการเฉลี่ยข้อมูลเสร็จแล้ว ข้อมูลในแนวทวนแตรีกจะเหลือทั้งหมด 508 ตำแหน่ง ต่อมาทำการเฉลี่ยข้อมูลในแนวครอสแตรีกด้วยวิธีการเดียวกัน โดยข้อมูลในแนวครอสแตรีกจะถูกเฉลี่ยทุก ๆ 7 ตำแหน่งที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ค) ดังนั้นข้อมูลในแนวครอสแตรีกจะเหลือทั้งหมด 506 ตำแหน่ง

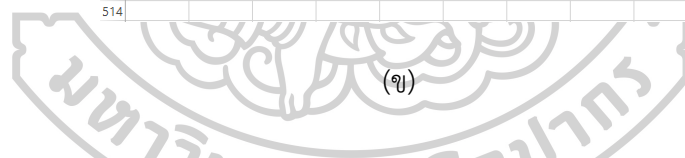
เมื่อทำการเฉลี่ยข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลจะเหลือเท่ากับ  $506 \text{ pixel} \times 508 \text{ pixel}$  ต่อมาจะนำข้อมูลนี้ไปสร้างภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนโดยผ่านการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม MATLAB (Matrix Laboratory) ตามคำสั่งในภาคผนวก (ข) จะทำให้ได้ภาพสนามแม่เหล็กขนาด  $790.625 \text{ nm} \times 793.75 \text{ nm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) แถบสีแสดงช่วงของค่าความต่างเฟสในบริเวณที่ทำการตรวจวัด โดยสีแดงเข้มแทนค่าความต่างเฟสสูงสุด และสีน้ำเงินเข้มแทนค่าความต่างเฟสต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อดึงข้อมูลในเส้นการสแกนที่มีค่าเฟสสูงสุดออกมาวาดกราฟ พบว่าสัญญาณรบกวนจะถูกตัดออกไป และได้เส้นกราฟที่เรียบขึ้น ดังรูปที่ 3.9 (ข)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	SR	SS
1	10.57	10.49	10.41	10.58	10.35	10.50	10.41	10.46	10.28	10.39	...	8.83	
2	10.03	10.01	9.84	9.52	9.83	9.91	9.60	9.88	9.61	9.58	...	8.13	
3	10.00	10.04	10.04	9.86	9.64	10.24	9.85	9.65	9.70	9.85	...	7.53	
4	9.61	9.41	9.20	9.40	10.06	10.01	9.49	9.74	9.52	9.70	...	7.23	
5	9.72	9.71	9.64	10.17	9.52	9.53	9.87	9.66	9.84	9.39	...	7.46	
6	9.29	9.90	9.82	9.92	9.61	9.57	9.63	9.65	9.62	9.64	...	8.04	
7	10.16	10.38	10.16	9.92	9.91	10.20	10.50	10.25	10.67	10.25	...	6.70	
8	10.00	9.56	9.71	9.77	9.65	9.35	9.46	9.43	9.63	9.72	...	7.23	
9	9.42	9.44	9.30	9.87	9.67	9.73	9.59	9.55	9.48	9.31	...	6.75	
10	9.92	10.06	10.00	10.04	9.82	9.62	9.69	9.83	9.73	9.47	...	8.14	
11	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
508	10.39	10.75	10.87	10.38	10.97	10.48	10.70	10.65	10.63	10.82	...	8.01	
509	10.71	10.75	10.96	11.08	10.87	11.02	10.92	10.64	11.06	11.03	...	9.14	
510	10.52	10.53	10.95	10.78	10.45	10.85	10.80	10.65	10.63	10.66	...	8.13	
511	10.63	10.61	10.98	10.58	10.79	10.62	10.88	10.28	10.64	10.69	...	7.45	
512	10.68	10.91	11.07	10.62	10.93	10.65	10.54	10.50	10.94	10.78	...	7.20	
513													
514													

(ก)

	A	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY
1	10.57		9.99	=	(A1+A2+A3+A4+A5)/5				
2	10.03		9.73	=	(A2+A3+A4+A5+A6)/5				
3	10.00		⋮						
4	9.61		⋮						
5	9.72		⋮						
6	9.29		⋮						
7	10.16		⋮						
8	10.00		⋮						
9	9.42		⋮						
10	9.92		⋮						
11	⋮		⋮						
508	10.39		10.59	=	(A508+A509+A510+A511+A512)/5				
509	10.71								
510	10.52								
511	10.63								
512	10.68								
513									
514									

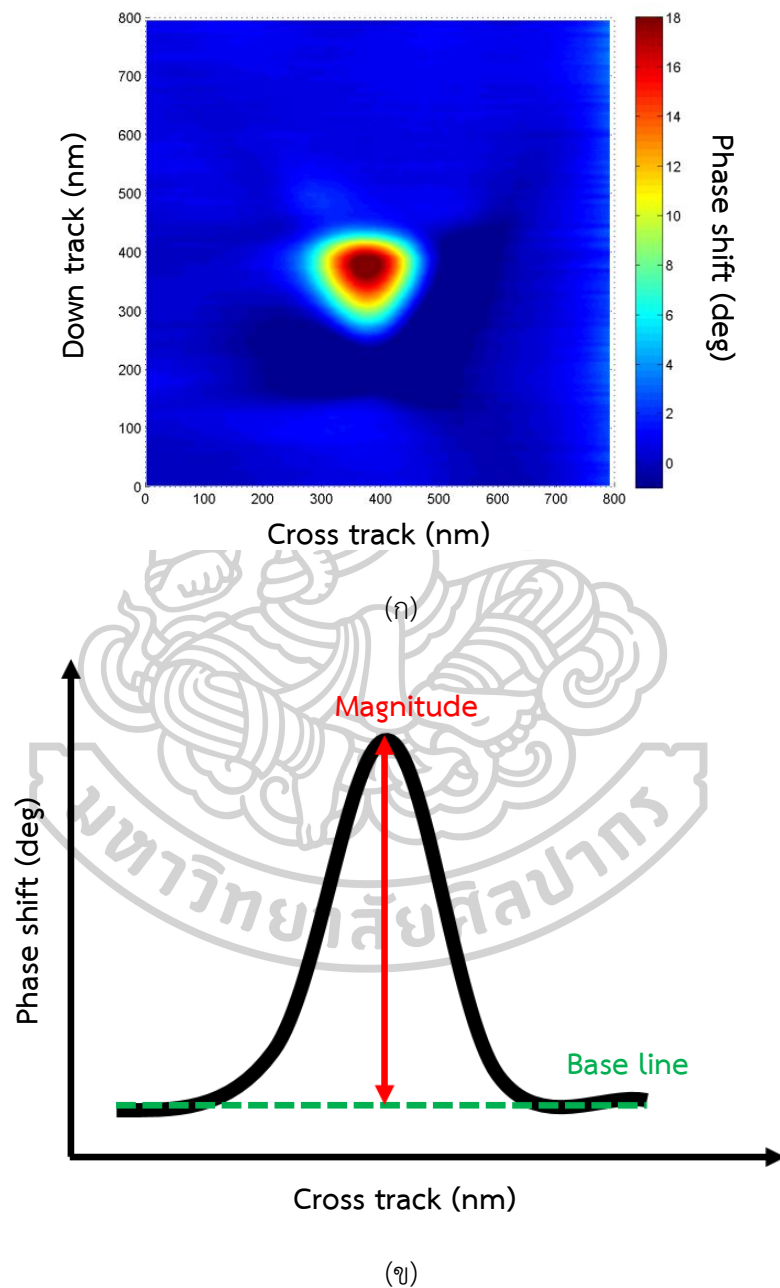


(ข)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	
1	9.99	9.93	9.82	9.91	9.88	10.04	9.84	9.88	9.79	9.78		8.12	7.90	8.06	7.90	8.00	7.77	7.84	
2																			
3																			
508	10.59	10.71	10.97	10.69	10.80	10.73	10.77	10.54	10.78	10.80		8.30	8.37	8.25	8.17	8.19	8.03	7.98	
509																			
1	9.92	9.90	9.88	9.87	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	7.94							
2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮							
3	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮							
508	10.75	10.743	10.753	10.729	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	8.1846							
509																			

(ค)

รูปที่ 3.8 การเฉลี่ยข้อมูล (ก) ตัวอย่างข้อมูลความต่างเฟสที่ได้จากการตรวจวัด มีขนาดเท่ากับ 512 x 512 pixel (ข) ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลในแนวทวนแนทรีค (ค) ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลในแนวครอสแนทรีค



รูปที่ 3.9 (ก) ภาพสนามแม่เหล็กเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลภาพโดยโปรแกรม MATLAB  
 (ข) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คที่ตำแหน่งค่าความต่างเฟสสูงสุด

เนื่องจากค่าความต่างเฟสสูงสุดและต่ำสุดในการตรวจวัดแต่ละครั้งจะมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการปรับค่าความต่างเฟสของทุกการตรวจวัดให้มีค่าความต่างเฟสต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 0 โดยการขีดเส้นฐาน (baseline) ของการตรวจวัดแต่ละครั้งขึ้นมา ดังเส้นสีเขียวในรูปที่ 3.9 (ข) ซึ่งเส้นฐานเกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของค่าความต่างเฟสที่บริเวณฐานของกราฟด้านซ้ายมือ

ในการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM จะใช้ค่าผลต่างของค่าความต่างเฟส นั่นคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด (magnitude) ในรูปที่ 3.9 (ข) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าความต่างเฟสสูงสุดกับเส้นฐาน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุดและรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ผ่านการประมวลผลจะถูกนำไปวิเคราะห์การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกันในบทถัดไป



## บทที่ 4

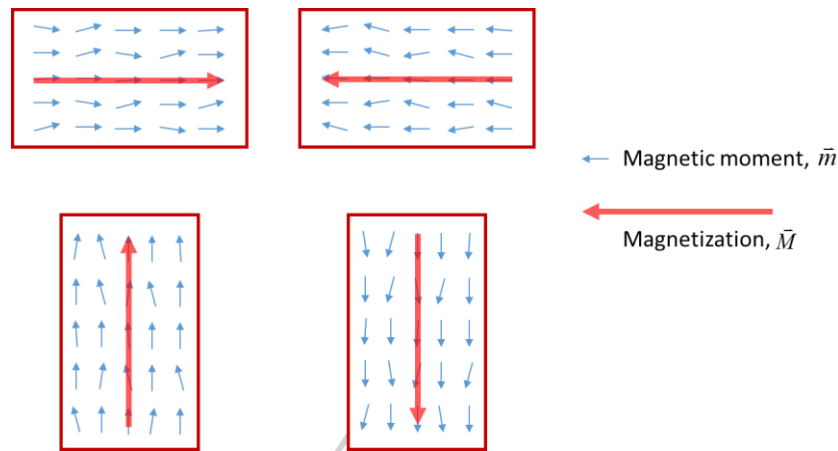
### การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้รับการพัฒนามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องมือให้สามารถตรวจวัดโดเมนแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กได้ในระดับต่ำกว่า 10 นาโนเมตร เพื่อเพิ่มความละเอียดของภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด และเพื่อเพิ่มการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ได้แก่ ชนิดของสารแม่เหล็กและความหนาที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM ขนาดและรูปทรงของหัววัด MFM และค่าเพกเตอร์คุณภาพ ( $Q$ ) ของระบบที่ใช้ในการตรวจวัด เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM รูปทรง OPUS ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ Ni-NiFe และ NiCo ซึ่งมีค่า  $H_c$  เท่ากับ 0.7 T และ 1000 Oe ตามลำดับ [23-25] ความหนาของฟิล์มแม่เหล็กเท่ากับ 50 นาโนเมตร ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของหัววัด MFM แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยผู้วิจัยแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ตอน ได้แก่ การศึกษาทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อชนิดของสนามแม่เหล็ก การศึกษาฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง และสุดท้ายเป็นการยืนยันลักษณะรูปทรงและสารที่ใช้เคลือบบนหัววัด MFM โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) และเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (energy-dispersive x-ray spectrometer: EDX)

#### 4.1 การศึกษาทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM แต่ละตัว

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร จำพวก Fe-Co และ Ni จะมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กถาวร (permanent magnetic dipole moment) กล่าวคือ เมื่อนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์ขั้วคู่ภายในวัสดุแม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น ๆ และเมื่อทำการลดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนเป็นศูนย์ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะยังคงสภาพแม่เหล็กได้ (โพลีมอร์ฟิซึม) (กลายเป็นแม่เหล็กถาวร) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization:  $\vec{M}$ ) โดยทั่วไปทิศทางของแมกนีไทเซชันอาจจะจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1

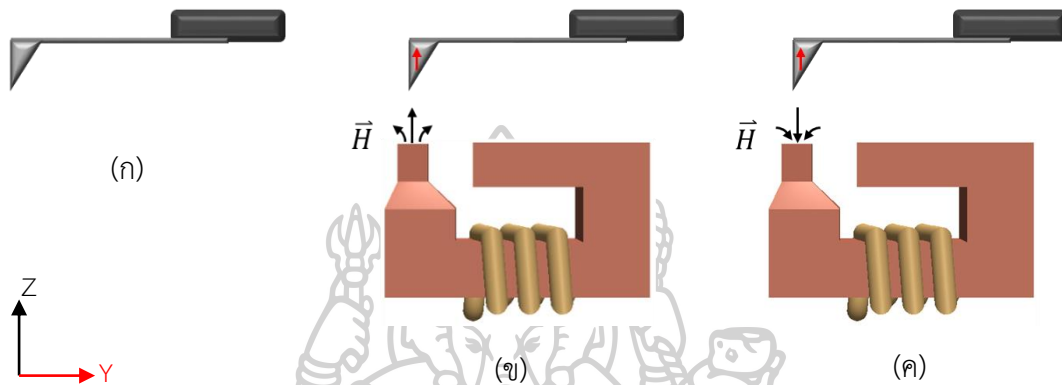


รูปที่ 4.1 ทิศของแมกนีไทเซชันคงค้างภายในสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกกรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

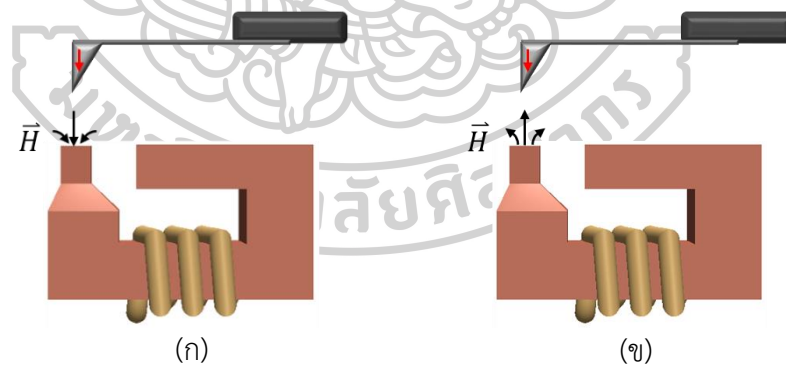
หัววัด MFM ถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์โรเช่นกัน ดังนั้นทิศทางแมกนีไทเซชันจะต้องมีการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางใดทิศทางหนึ่งเช่นเดียวกับวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โร ในการทดลองนี้ผู้วิจัยจะศึกษาทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM ว่ามีการจัดเรียงตัวอยู่ในลักษณะใด โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ในตอนที่ 1 ผู้วิจัยจะนำหัววัด MFM ไปสแกนหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 60 mA (ซึ่งเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจ่ายให้กับหัวเขียนได้) เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนมีความเข้มสูงสุดและสามารถเปลี่ยนทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM ไปตามทิศทางที่ต้องการ และกำหนดความสูงของการสแกนเท่ากับ 10 nm ผลจากการสแกนจะทำให้ทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก นั่นคือ ทิศ +z ดังรูปที่ 4.2 (ข)

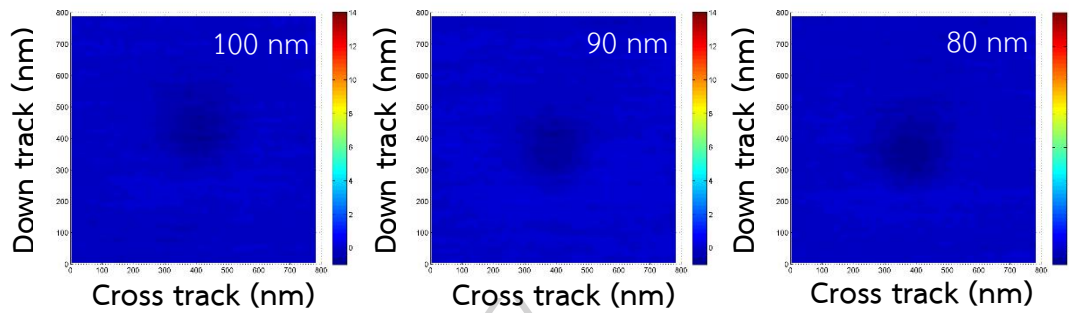
หลังจากที่ทำการแมกนีไทเซชันโมเมนต์แม่เหล็กของสารที่เคลือบบนหัววัด MFM ให้อยู่ในทิศทาง +z แล้วนั้น จะนำหัววัด MFM ไปตรวจวัดหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 60 mA สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากหัวเขียนจะมีทิศพุ่งเข้าไปในโพลหลัก หรือมีทิศ -z ซึ่งเป็นทิศทางตรงข้ามกับทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM ดังรูปที่ 4.2 (ค) ดังนั้นแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะตรวจวัดจะเป็นแรงผลัก และจะทำการตรวจวัดที่ 10 ระดับความสูง ได้แก่ 100 – 10 nm โดยลดความสูงลงครั้งละ 10 nm ตามลำดับ จากการทดลองนี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะเห็นรูปภาพสนามแม่เหล็กมีสีน้ำเงินเข้มบริเวณโพลหลักของหัวเขียน ผลการทดลองที่ความสูงของการสแกนเท่ากับ 100 – 80 nm แสดงดังรูปที่ 4.4 – 4.6 และผลการทดลองที่ความสูงของการสแกนทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค



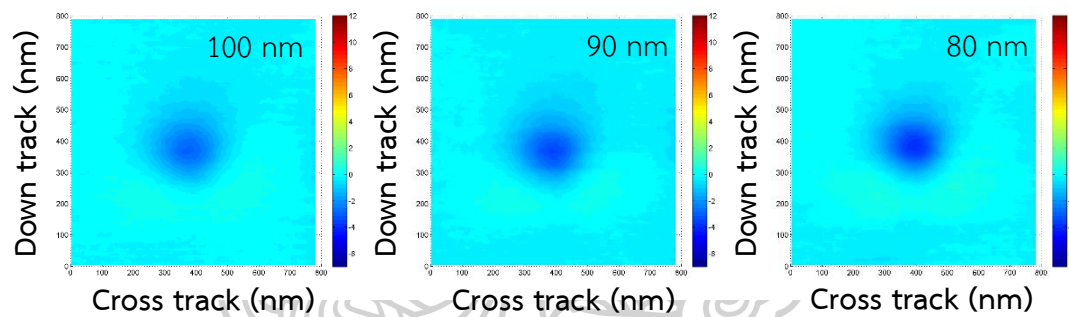
รูปที่ 4.2 (ก) หัววัด MFM ก่อนนำไปแมกนีไทเซชัน (ข) ทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM หลังการแมกนีไทเซชันด้วยสนามแม่เหล็ก DC+ (ค) เมื่อนำหัววัด MFM ที่ถูกแมกนีไทเซชันไปตรวจวัดหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC-



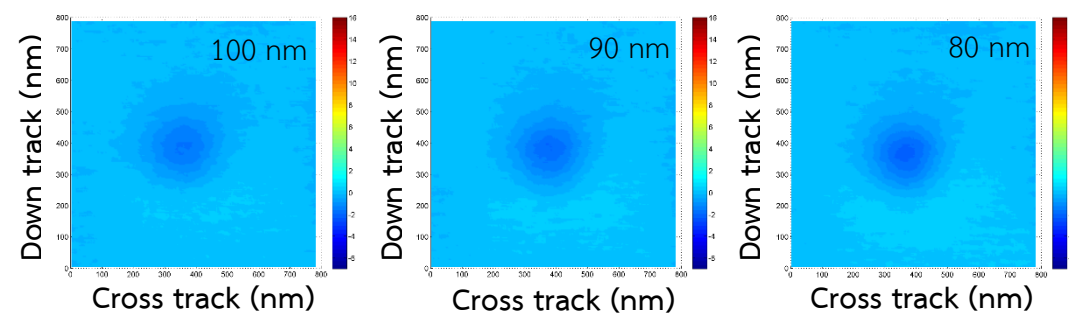
รูปที่ 4.3 (ก) ทิศทางแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM หลังการแมกนีไทเซชันด้วยสนามแม่เหล็ก DC- (ข) เมื่อนำหัววัด MFM ที่ถูกแมกนีไทเซชันไปตรวจวัดหัวเขียนในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni

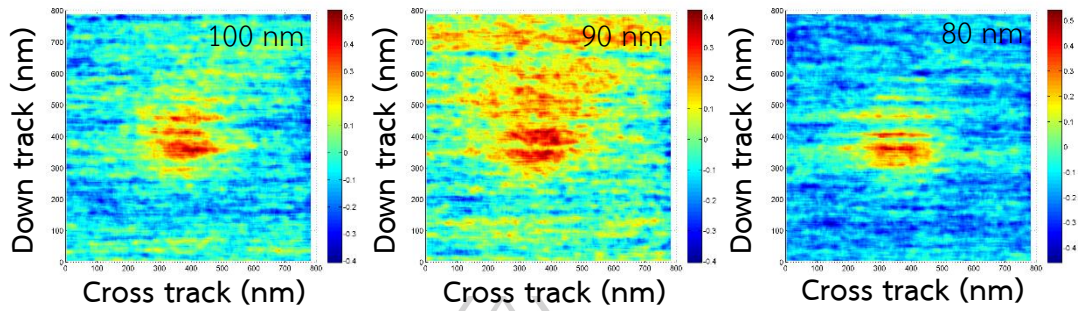


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe

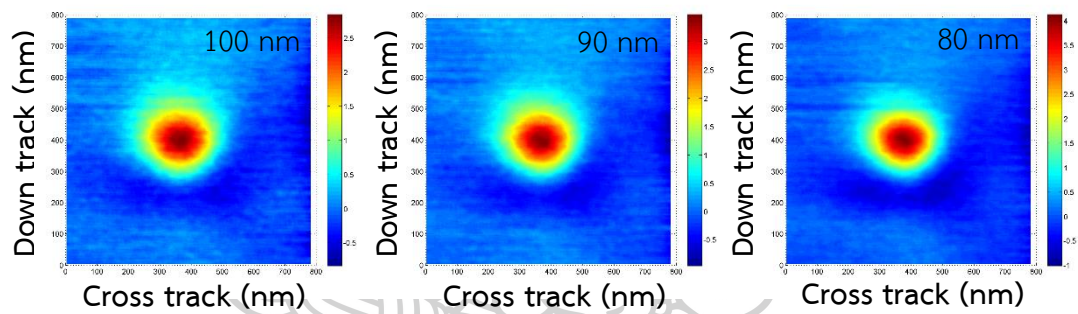


รูปที่ 4.6 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo

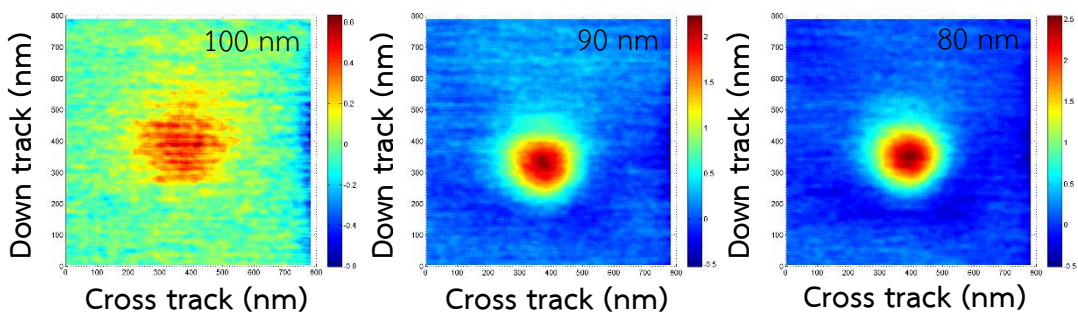




รูปที่ 4.7 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm 90 nm และ 80 nm ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo

จากรูปที่ 4.4 – 4.6 จะเห็นว่า รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดสอดคล้องกับ สมมติฐานที่ตั้งขึ้นนั่นคือ รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดของหัววัด MFM ทั้ง 3 ตัว มีความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณกลางโพลหลักเป็นสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งแสดงว่า ทิศแมกนีไทเซชันของ หัววัด MFM มีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศ +z นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณ กลางโพลหลักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของการสแกนลดลง ซึ่งทำให้สามารถเห็นลักษณะของ สนามแม่เหล็กที่สร้างโดยหัวเขียนแม่เหล็กได้ชัดเจนขึ้น สำหรับหัววัด MFM ทุกตัว และยังสังเกตเห็น ว่าการตอบสนองของหัววัด MFM แต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากันอีกด้วย ดังรูปที่ ค.1 – ค.3 ในภาคผนวก ค

ข้อสังเกตอีกข้อหนึ่งที่พบคือ เมื่อความสูงของการสแกนมีค่าเท่ากับ 50 nm ดังรูปที่ ค.1 ลักษณะรูปภาพสนามแม่เหล็กบริเวณกลางโพลหลักที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบ ด้วย Ni เริ่มมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นสีฟ้า และสีของสนามแม่เหล็กบริเวณกลางโพลหลัก เปลี่ยนเป็นสีแดงที่ความสูงของการสแกนเท่ากับ 10 nm ดังรูปที่ ค.1 ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า แรงแบบ ปฏิกริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนจากแรงผลักกลายเป็นแรงดูด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทิศแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางจากทิศ +z เป็นทิศ -z ตามทิศทางของ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนแม่เหล็ก และสามารถพบการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชันของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ ค.2 ในทางตรงกันข้าม สีของสนามแม่เหล็ก บริเวณกลางโพลหลักที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ยังคงเป็นสีน้ำเงินเข้ม หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางแมกนีไทเซชัน ดังรูปที่ ค.3

ในตอนที่ 2 จะทำการทดลองตรงข้ามกับในตอนที่ 1 กล่าวคือ นำหัววัด MFM ไปสแกนหัว เขียนในขณะที่จ่ายไฟฟ้ากระแส DC- ที่ปริมาณกระแสและความสูงของการสแกนเดียวกัน ผลจากการ สแกนจะทำให้ทิศแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM มีทิศอยู่ในทิศ -z ดังรูปที่ 4.3 (ก) จากนั้นนำหัววัด MFM ไปสแกนหัวเขียนในขณะที่จ่ายไฟฟ้ากระแส DC+ ด้วยเงื่อนไขเดียวกับตอนที่ 1 ดังนั้นแรง ปฏิกริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงผลัก ดังรูปที่ 4.3 (ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 – 4.9

การทดลองในตอนที่ 2 นี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะเห็นผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ ผลการทดลองในตอนที่ 1 นั่นคือ รูปภาพสนามแม่เหล็กจะต้องมีสีน้ำเงินบริเวณกลางโพลหลักของหัว เขียน แต่สิ่งที่พบจากผลการทดลองคือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณกลางโพลหลักมีสีแดงเข้ม นั่นหมายความว่า ทิศแมกนีไทเซชันภายในของหัววัด MFM ไม่เกิดการคงค้างอยู่ในทิศทาง -z แต่จะ มีการหมุนกลับไปอยู่ในทิศทางเริ่มต้น คือ ทิศ +z จึงทำให้ผลการตรวจวัดที่แสดงออกมาเป็นการวัด แรงแดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ดังนั้น จากผลการทดลองจึงสรุป ได้ว่า ทิศแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในหัววัด MFM มีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศ +z หรือทิศที่แมกนีไทเซชันมีการคงค้าง

เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni ดังรูปที่ 4.7 พบว่า ลักษณะของสนามแม่เหล็กไม่มีความชัดเจน เนื่องจากการที่ทิศแมกนีไทเซชันมีการหมุนกลับไปอยู่ในทิศ +z แต่ยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว หรือยังไม่เรียงตัวอยู่ในแนวขนานกับทิศของสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน แต่เมื่อสังเกตรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ดังรูปที่ ค.4 พบว่า ลักษณะของสนามแม่เหล็กมีความคมชัด และสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน

#### 4.2 การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อชนิดของสนามแม่เหล็ก

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา นักวิจัยส่วนใหญ่ใช้ MFM ในการตรวจสอบลักษณะโดเมนแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก รวมไปถึงการใช้ MFM ตรวจสอบความกว้างของข้อมูลแม่เหล็กที่บันทึกในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การใช้งานในลักษณะนี้เป็นการวัดแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัด MFM กับสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวของวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางแน่นอน เปรียบเสมือนการจ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ หรือ DC- ให้กับวัสดุแม่เหล็กเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในทิศพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้ MFM ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงานของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC ให้แก่หัวเขียนแม่เหล็ก หัวเขียนแม่เหล็กจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งเข้าและพุ่งออกจากปลายโพลสลับกันไปมา ดังนั้น หัววัด MFM ที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดี

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจะศึกษาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM ทั้ง 3 ตัว ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC DC+ และ DC- ให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 30 mA เนื่องจากเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเขียนข้อมูลลงแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก และยังเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจวัดหัวเขียนด้วย MFM และกำหนดความสูงของการสแกนเท่ากับ 10 nm ผลการตรวจวัดการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กชนิด AC DC+ และ DC- แสดงดังรูปที่ 4.10 – 4.12 ตามลำดับ

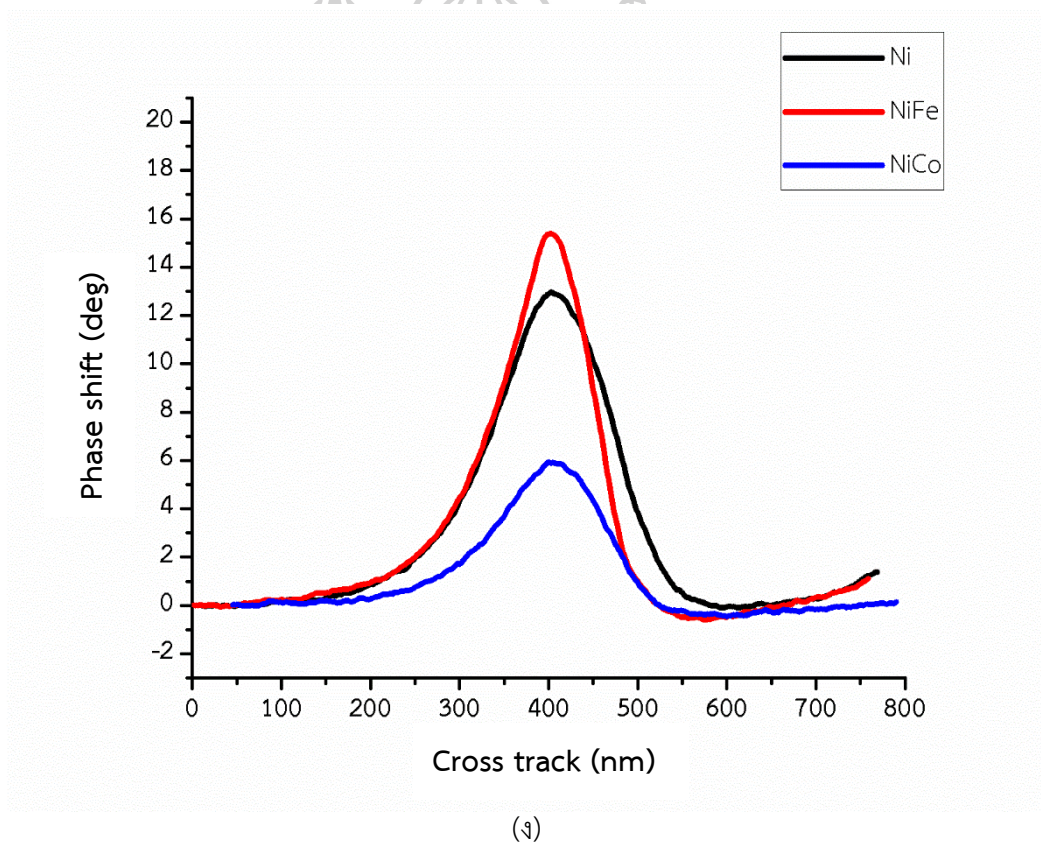
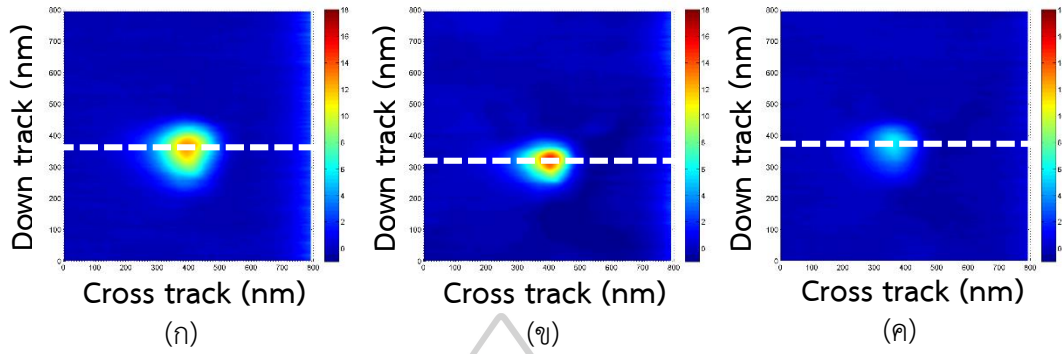
เมื่อพิจารณารูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด ดังรูปที่ 4.10 (ก) – (ค) พบว่า ลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก AC ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิดมีการเอียงไปทางด้านซ้ายมือมากกว่าด้านขวามือ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในของหัววัด MFM ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่สลับไปสลับมา ข้อสังเกตอีกข้อหนึ่ง พบคือ ขนาดของสนามแม่เหล็กบริเวณโพลหลักที่ตรวจวัดได้ของหัววัด MFM แต่ละตัวมีขนาดไม่เท่ากัน โดยที่ขนาดของสนามแม่เหล็กบริเวณโพลหลักที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีขนาดเล็กที่สุด แต่กลับมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุด ดังรูปที่ 4.10 (ข)

เมื่อพิจารณาค่าความต่างเฟสในแนวคอรอสแทร็คที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด ดังรูปที่ 4.10 (ง) พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก AC ได้ดีกว่าหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiCo โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุดเท่ากับ 15.39 องศา 12.97 องศา และ 5.95 องศา ตามลำดับ เนื่องจากหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีค่าแมกนีไทเซชันภายในสารมากกว่าสารแม่เหล็ก 2 ชนิด

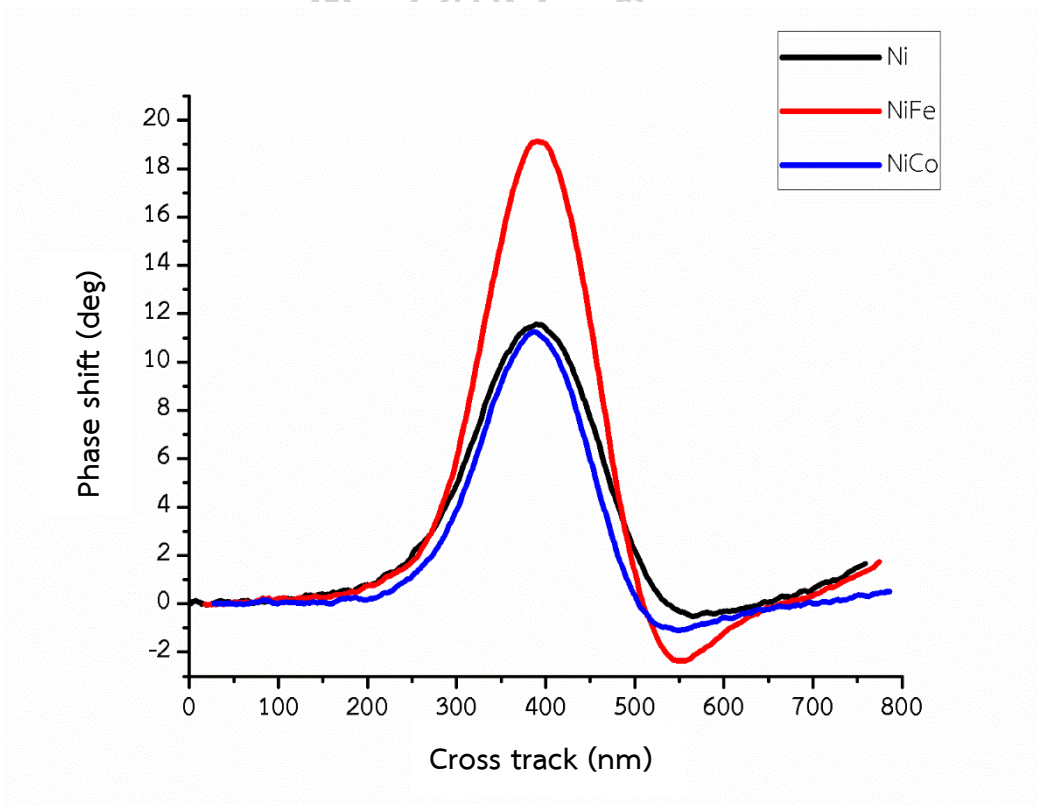
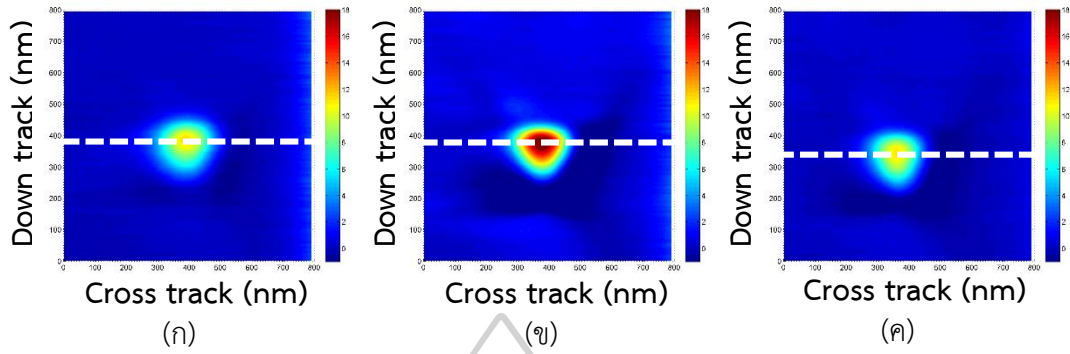
จากรูปที่ 4.11 (ก) - (ค) จะเห็นว่า ลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM มีความสมมาตรทั้ง 2 ด้าน เนื่องจาก การจ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ให้กับหัวเขียน ทำให้หัวเขียนสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มคงที่ แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนจึงไม่มีการสวิตช์ไปมา เมื่อเทียบกับการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก AC และเมื่อพิจารณาค่าความต่างเฟสในแนวคอรอสแทร็คที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองต่อสนาม DC+ ได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุดเท่ากับ 19.08 องศา แสดงดังรูปที่ 4.11 (ง)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเส้นความต่างเฟสของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ที่สนามแม่เหล็ก DC+ (เส้นสีแดง รูปที่ 4.11 (ง)) จะเห็นว่า บริเวณโคโนกราฟซ้ายมือมีความต่างเฟสต่ำกว่าด้านขวามือ เนื่องจากในกระบวนการผลิตหัวเขียนแม่เหล็กจะทำให้ทิศทางแมกนีไทเซชันภายในส่วนต่าง ๆ ของหัวเขียนมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบยิ่งขึ้น โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1 T ในทิศทางจากซ้ายไปขวา จึงทำให้ลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในซิลด์ (ซิลด์ทำมาจากสารแม่เหล็ก) มีการจัดเรียงตัวในแนว easy axis หรือมีทิศพุ่งเข้าหาขอบด้านข้างของซิลด์ ดังรูปที่ 4.13 เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ผู้วิจัยจึงสร้างรูปภาพจำลองการตรวจวัดขึ้นมา โดยกำหนดทิศเหนือเป็นหัวบวก และทิศใต้เป็นหัวลบ ดังรูปที่ 4.14 ดังนั้น เมื่อหัววัด MFM เคลื่อนที่ผ่านขอบของซิลด์ด้านขวาไปจนถึงขอบของโพลหลักจะเกิดแรงดูด ซึ่งทำให้ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุด ณ บริเวณกลางโพลหลัก จากนั้นค่าความต่างเฟสจะค่อย ๆ ลดลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก และเมื่อหัววัด MFM เคลื่อนที่ผ่านขอบซิลด์ด้านขวาจะเกิดแรงผลัก จึงทำให้ค่าความต่างเฟสมีค่าลดลงไปทางด้านลบ



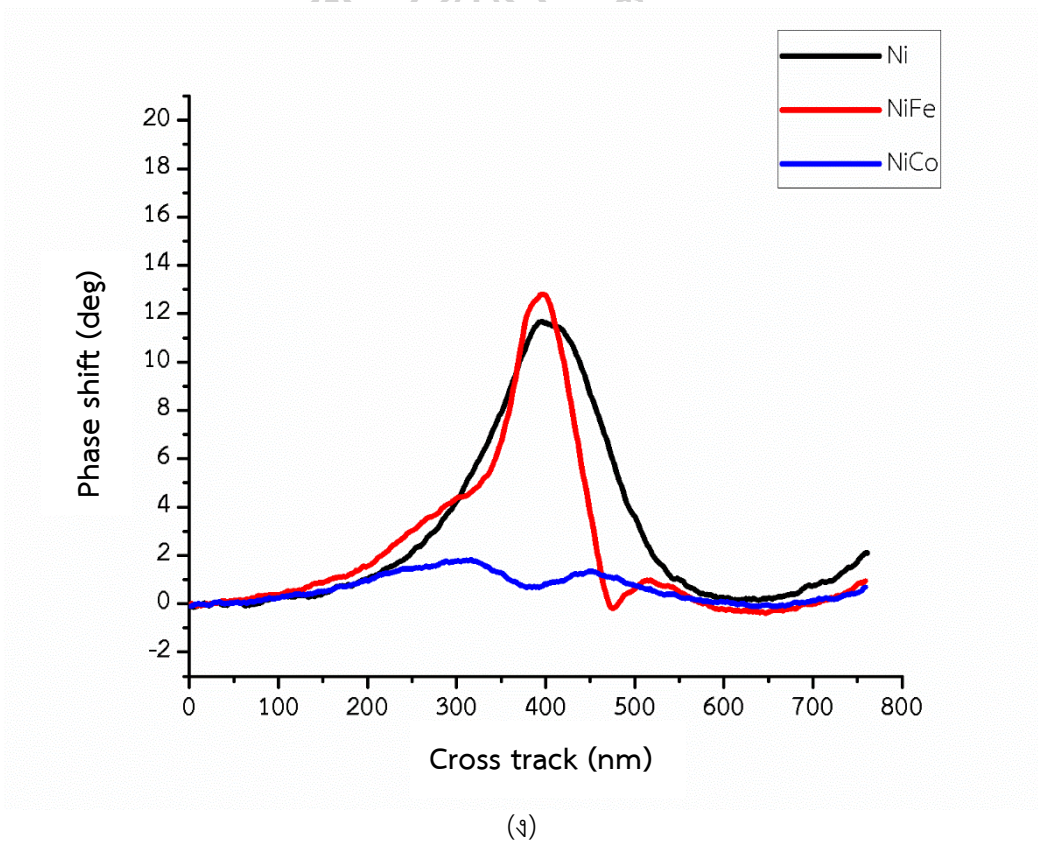
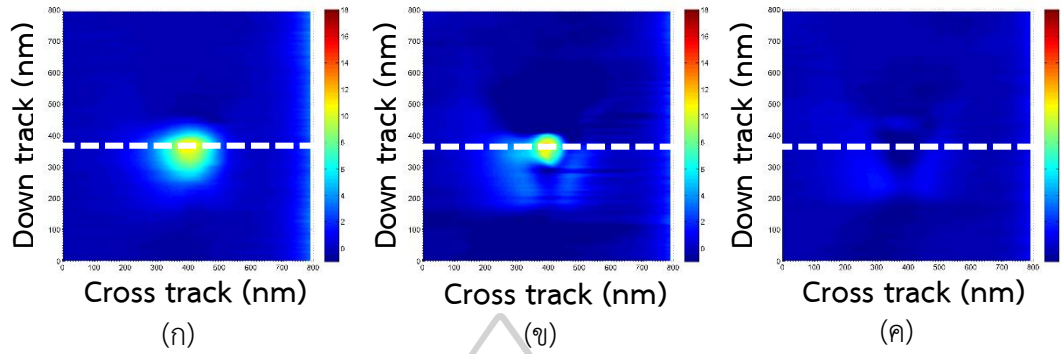


รูปที่ 4.10 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า AC ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ

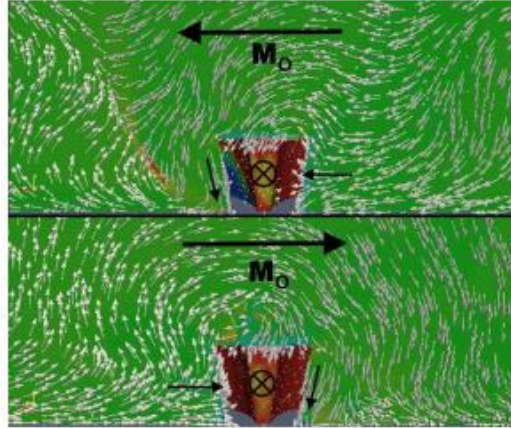


รูปที่ 4.11 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า DC+ ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็ค ของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ



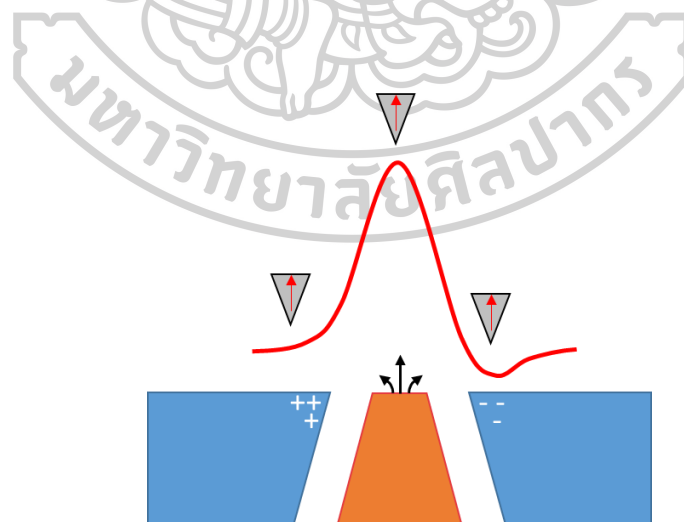


รูปที่ 4.12 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเมื่อจ่ายไฟฟ้า DC- ที่ตรวจวัดด้วยหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe (ค) NiCo และ (ง) ค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็ค ของแต่ละหัววัด MFM ตามแนวเส้นปะ



รูปที่ 4.13 ทิศทางแมกนีไทเซชันเริ่มต้นภายในขั้วของหัวเขียนแบบตั้งฉาก ด้านบนเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากขวาไปซ้าย ด้านล่างเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางจากซ้ายไปขวา

ที่มา: S. Song, L. Guan, S. Li, and S. Mao, "Micromagnetic Analysis of ATE of WAS PMR writers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009

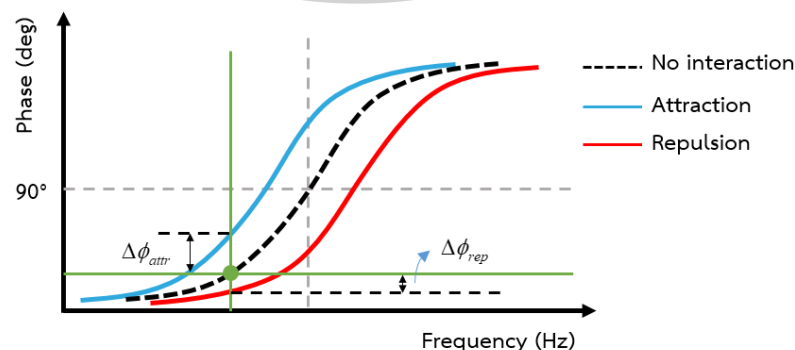


รูปที่ 4.14 ภาพจำลองการตรวจวัด ณ บริเวณ ต่าง ๆ ของหัวเขียน เส้นสีแดง คือ ค่าความต่างเฟส

เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก DC- โดยคาดหวังว่า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ให้แก่หัวเขียน จะทำให้ได้รูปภาพสนามแม่เหล็กที่บริเวณโพลหลักของหัวเขียนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ดังรูปที่ 4.12 (ค) เนื่องจาก การจ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ให้กับหัวเขียน หัวเขียนจะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางพุ่งเข้าไปในโพลหลัก ซึ่งทำให้แรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นแรงผลัก แต่จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) พบว่า รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiFe มีลักษณะคล้ายกับรูปภาพสนามแม่เหล็กเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า DC+ ให้กับหัวเขียน แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) นั่นแสดงว่า ทิศแมกนีไทเซชันภายใน หัววัด MFM มีการเปลี่ยนทิศทางไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในทางกลับกันแมกนีไทเซชันของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ยังคงมีทิศทางเดิมหรือไม่มีการเปลี่ยนทิศ

เมื่อพิจารณาการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก DC- เฉพาะหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo จะเห็นว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสมีน้อยมาก ซึ่งทำให้เห็นการตอบสนองได้ไม่ชัดเจน เส้นสีน้ำเงินในรูปที่ 4.12 (ง) เนื่องจาก ค่าของเฟสเริ่มต้นของหัววัด MFM ณ ตอนที่สั้นอยู่ในอากาศ (ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ) ไม่ได้อยู่ที่ 90 องศา แต่มีค่าเฟสน้อยกว่า 90 องศา (จุดสีเขียวในรูปที่ 4.15) ดังนั้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับหัววัด MFM ค่าความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยตาม ส่งผลให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก DC- มีค่าน้อยกว่า การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก DC+ ดังรูปที่ 4.15

จากผลการศึกษการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก AC DC+ และ DC- ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้ง 3 รูปแบบได้ดีกว่าหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiCo เนื่องจาก สารแม่เหล็ก NiFe มีค่าแมกนีไทเซชันภายในมากกว่าสารแม่เหล็กที่เหลือ จึงทำให้มีค่าความต่างเฟสสูงหรือมีการตอบสนองที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับสมการ 
$$\vec{F}_{t-s} = \mu_0 \int \vec{\nabla} (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip}$$



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงเฟสเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับหัววัด MFM จุดสีเขียวคือค่าเฟสเริ่มต้นของหัววัด MFM ที่มีค่าต่ำกว่า 90 องศา

### 4.3 การศึกษาฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ในการเพิ่มประสิทธิภาพของ MFM ให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดีนั้น จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของคาน (ส่งผลต่อค่าคงที่ของสปริง) ความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM (เพื่อเพิ่มค่าแมกนีไทเซชัน) ความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก (ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหัววัด MFM กับพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็ก) และค่าเฟกเตอร์คุณภาพของระบบที่ใช้ในการตรวจวัด (ขึ้นอยู่กับความหน่วง) ดังนั้น เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่านั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หัววัด MFM ที่มีขนาดเท่ากัน เคลือบด้วยสารแม่เหล็กที่มีความหนาเดียวกันคือ 50 nm และรักษาค่าแฟกเตอร์คุณภาพให้มีค่าคงที่ โดยการทดลองในระบบเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยต้องการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียน เนื่องจากค่าของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามกฎของแอมแปร์ ( $B = \mu_0 nI$ ) นั่นคือเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงขึ้นด้วย ดังนั้น จึงเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนในช่วง  $\pm 60$  mA ที่ความสูงของการสแกนเท่ากับ 75 nm (ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ใช้ในการตรวจวัดวัสดุแม่เหล็กทั่ว ๆ ไป) และความสูงของการสแกนเท่ากับ 10 nm เพื่อเพิ่มความคมชัดของรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด

โดยจะนำค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส ณ ตำแหน่งที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดด้วยวิธีการคำนวณดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองของหัววัด MFM กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก ซึ่งออกมาในรูปแบบฮิสเทอรีซิสรูป ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 – 4.18

จากรูปที่ 4.16 (ก) พิจารณาฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni ที่ความสูง 75 nm เส้นสีน้ำเงิน เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 5 mA ถึง 20 mA ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากความต่างเฟสเท่ากับ 5 องศา เป็น 12 องศา เพราะว่า การเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนมีความเข้มเพิ่มสูงขึ้น

จึงทำให้ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเป็นไปตามสมการ  $\Delta\phi = \frac{Q}{k} \left( \frac{\partial F}{\partial z} \right)$  เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนไปจนถึง 60 mA พบว่า ค่าความต่างเฟสมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือเกือบจะไม่มีเพิ่มขึ้นเลย เนื่องจาก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนเกิดการอิ่มตัวเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนมีค่าตั้งแต่ 30 mA ขึ้นไป [26] และเมื่อลดปริมาณกระแสไฟฟ้าลง ค่าความต่างเฟสก็ลดลงเช่นกัน และเมื่อเปลี่ยนทิศกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนเป็น DC- และเพิ่ม



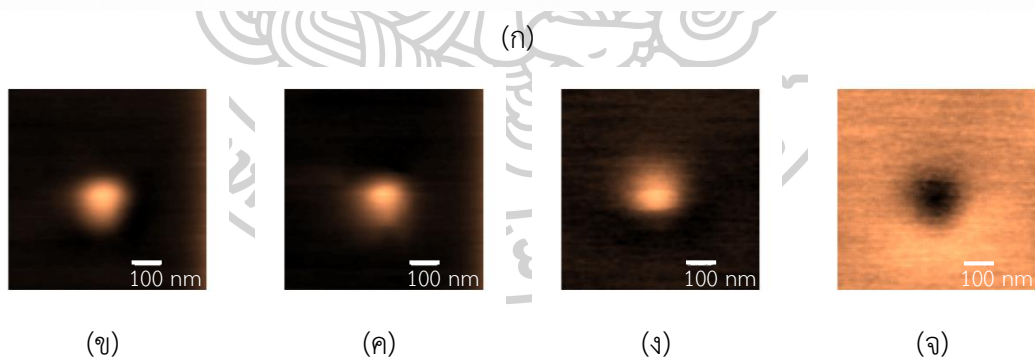
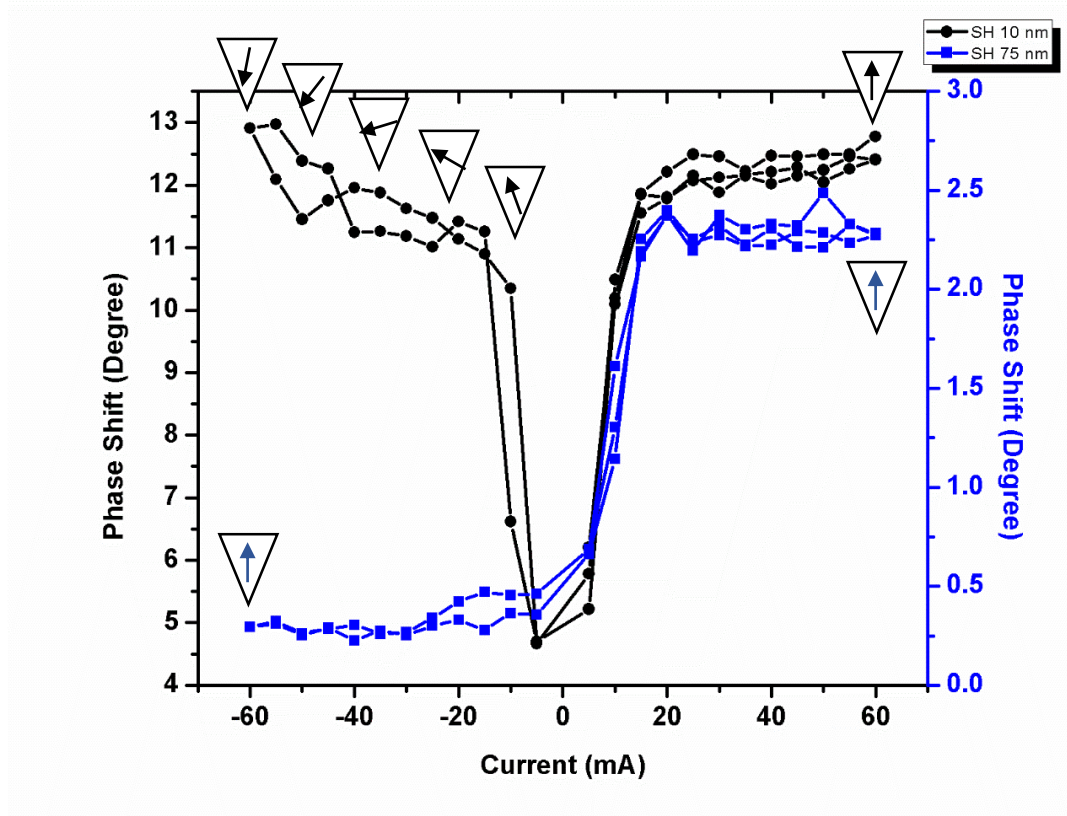
ปริมาณกระแสไฟฟ้าไปจนถึง  $-60$  mA พบว่า ค่าความต่างเฟสมีค่าน้อยกว่าตอนจ่ายกระแสไฟฟ้า DC+

เมื่อพิจารณาการตอบสนอง ที่ความสูง  $10$  nm เส้นสีดำ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าทางบวก ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการตรวจวัดที่ความสูง  $75$  nm แต่จะมีค่าความต่างเฟสที่สูงกว่า หรือมีการตอบสนองที่ดีกว่า และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าทางลบไปจนถึง  $-60$  mA พบว่า ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าทางบวกให้กับหัวเขียน เนื่องจาก ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัด MFM มีการเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งสังเกตได้จากรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 4.16 (ค)

เมื่อพิจารณาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ที่ความสูง  $75$  nm ดังรูปที่ 4.17 (ก) พบว่า การตอบสนองมีลักษณะเช่นเดียวกับหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni ที่ความสูง  $10$  nm จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าทางลบ ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่า  $-30$  mA และค่าความต่างเฟสมีค่าลดลงมาครึ่งหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับตอนจ่ายกระแสไฟฟ้าทางบวกให้กับหัวเขียน เนื่องจาก ทิศทางแมกนีไทเซชันภายในหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการหมุนเปลี่ยนทิศทางไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก แต่เป็นการเปลี่ยนทิศทางที่โมเมนต์แม่เหล็กภายในหัววัด MFM ยังไม่ถึงจุดอิ่ม ซึ่งสังเกตได้จากรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด ดังรูปที่ 4.17 (ค)

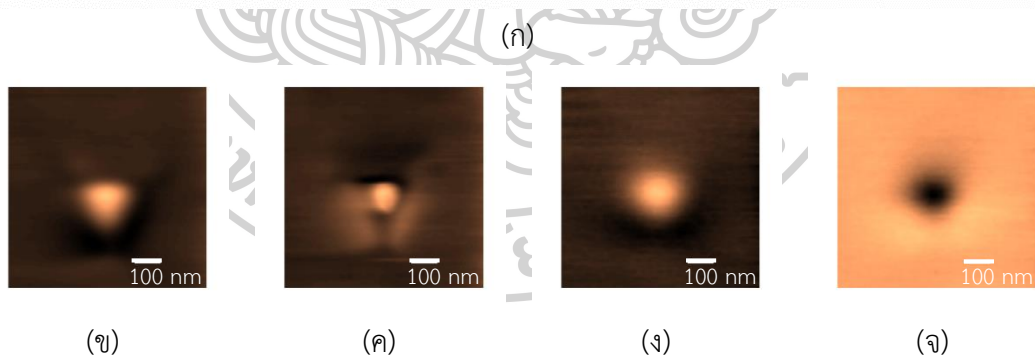
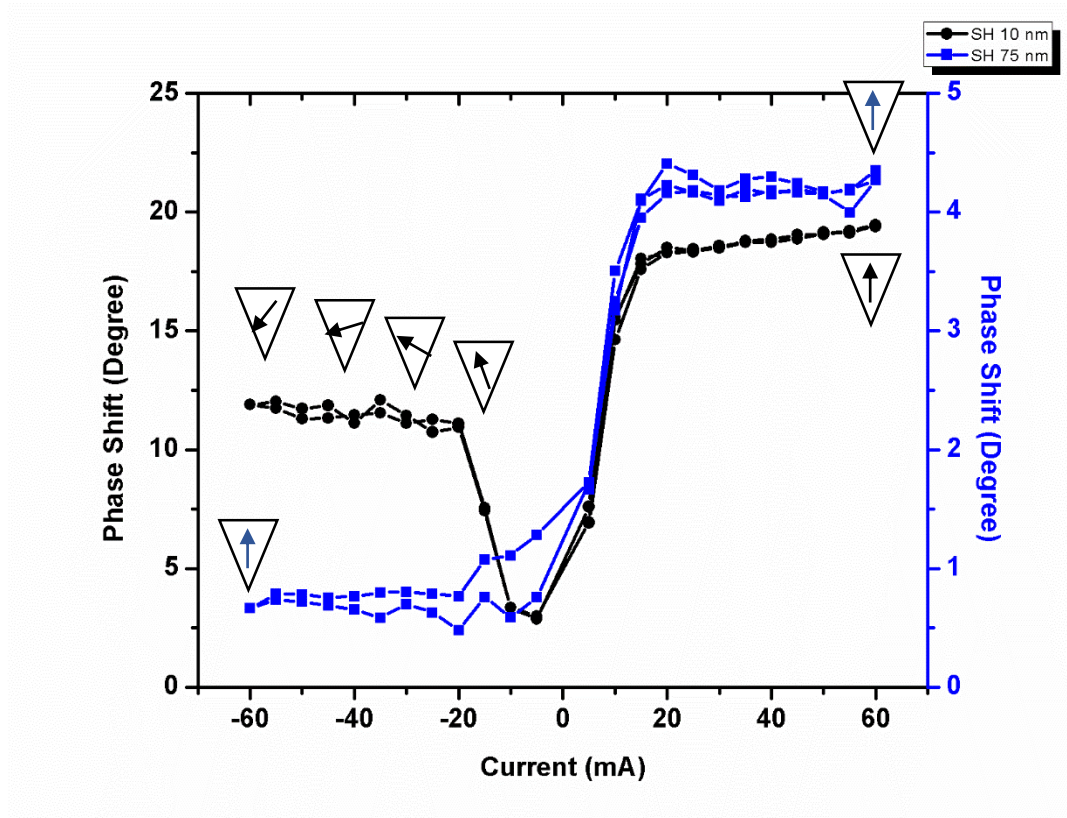
เมื่อพิจารณาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ดังรูปที่ 4.18 (ก) ที่ความสูง  $10$  nm และ  $75$  nm จะเห็นว่า ผลการตรวจวัดสอดคล้องกับของหัววัด MFM 2 ตัวที่ได้วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้ นั่นคือ เมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าทางบวก ค่าความต่างเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ และเมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าทางลบ ค่าความต่างเฟสจะลดลงเล็กน้อยและคงที่ และจากรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในหัววัด MFM

จากรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด ที่ความสูง  $75$  nm จะเห็นว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองที่ดีกว่าหัววัด MFM ตัวอื่น เนื่องจาก มีค่าความต่างเฟสสูงที่สุดประมาณ  $4.5$  องศา ดังนั้น จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า หากต้องการใช้ MFM ในการตรวจวัดลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ภายในสารแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการระบุทิศทางของแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ ควรใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และทำการตรวจวัดที่ความสูงมากกว่า  $70$  nm แต่จะได้ภาพสนามแม่เหล็กที่มีความคมชัดต่ำ หากต้องการความคมชัดมาก ควรใช้ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo โดยตรวจวัดที่ความสูงมากกว่า  $10$  นาโนเมตร เนื่องจาก ทิศทางแมกนีไทเซชันไม่มีการเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็ก มีความการตอบสนองสูง และทำให้ได้ภาพสนามแม่เหล็กที่มีความคมชัดสูง

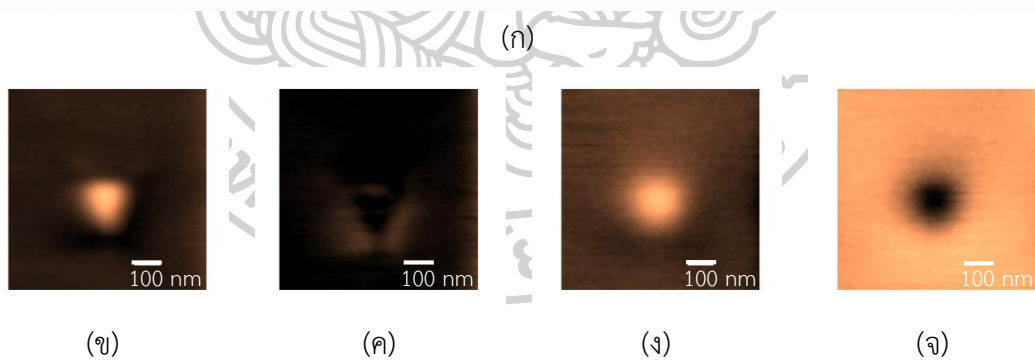
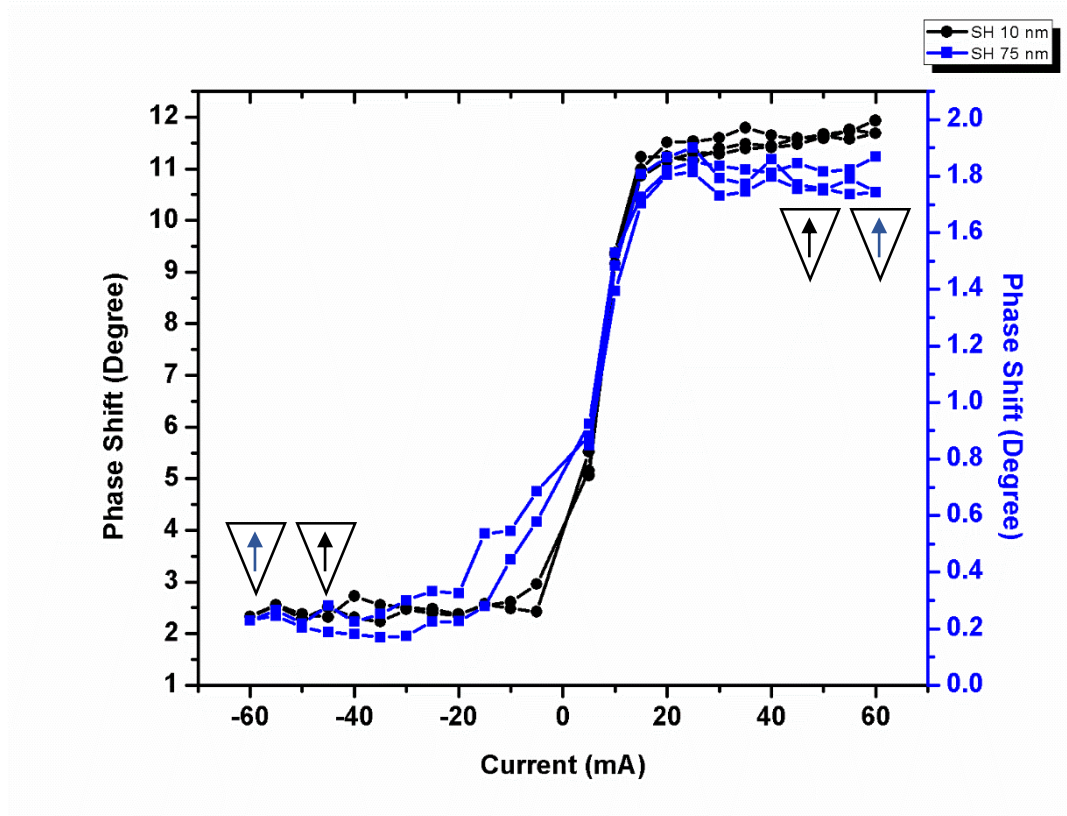


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm และ รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA

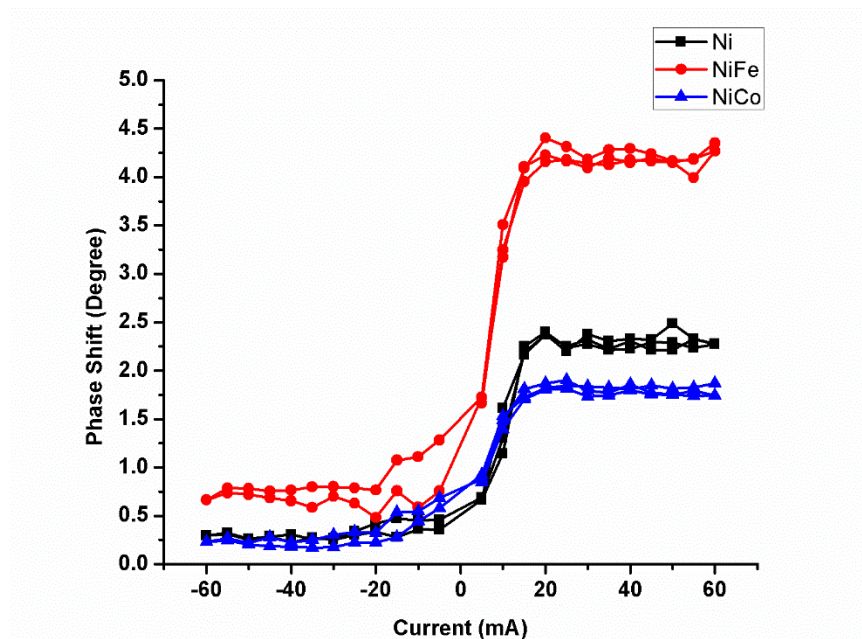




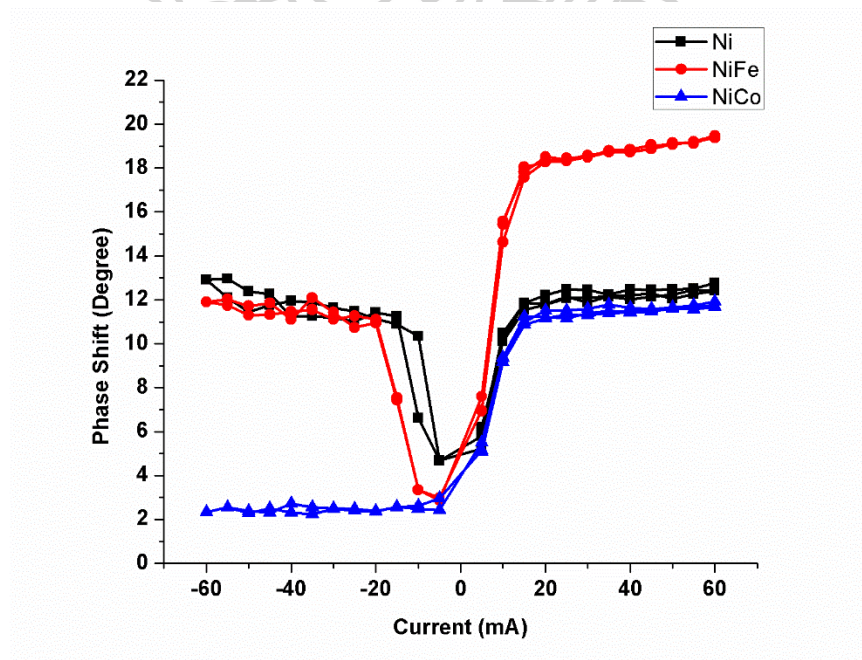
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm และรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสกับกระแสไฟฟ้า (ก) ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo เส้นสีดำ คือ ความสูง 10 nm เส้นสีน้ำเงิน คือ ความสูง 75 nm และรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ความสูง 10 nm (ข) 60 mA (ค) -60 mA และที่ความสูง 75 nm (ง) 60 mA และ (จ) -60 mA



รูปที่ 4.19 ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองที่ความสูง 75 nm โดยที่ เส้นสีดำ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีแดง หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และเส้นสีน้ำเงิน หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo



รูปที่ 4.20 ฮิสเทอรีซิสของการตอบสนองที่ความสูง 10 nm โดยที่ เส้นสีดำ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีแดง หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และเส้นสีน้ำเงิน หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo

จากรูปที่ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด ที่ความสูง 10 nm พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ยังคงเป็นหัววัด MFM ที่มีการตอบสนองที่ดีสำหรับสนามแม่เหล็ก DC+ มีค่าความต่างเฟสประมาณ 19 องศา ซึ่งสูงกว่าค่าความต่างเฟสของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiCo ประมาณ 2 เท่า

#### 4.4 การศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง

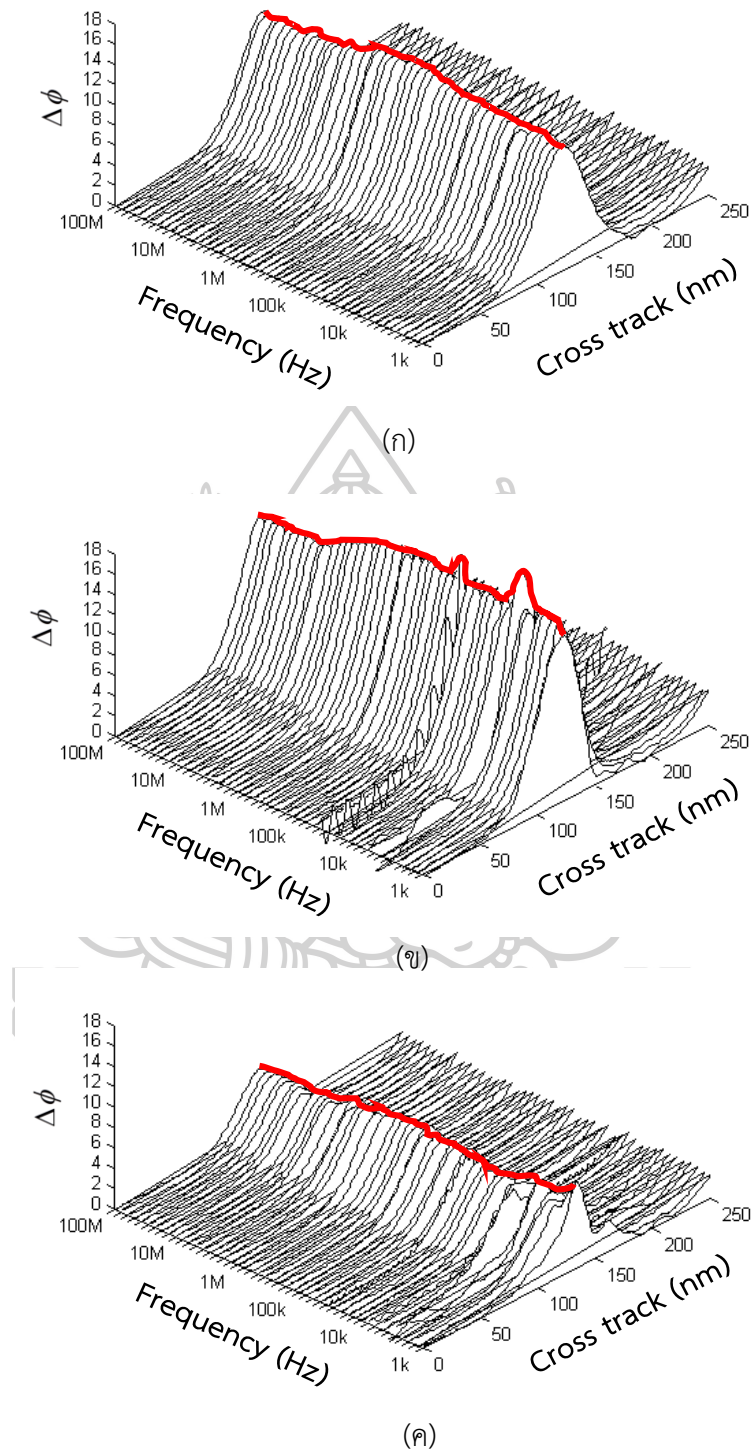
จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการใช้ MFM ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงานของหัวเขียนแม่เหล็ก ทางด้านความสามารถในการสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้า AC ที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียน โดยหัวเขียนสามารถสร้างสนามแม่เหล็กความถี่สูงได้ถึง 2 GHz ดังนั้น หัววัด MFM ที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูงได้

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยจะศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC ให้กับหัวเขียน และเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz ที่ความสูงของการสแกนเท่ากับ 10 nm โดยจะใช้เส้นการสแกนที่มีค่าความต่างเฟสสูงที่สุดของแต่ละความถี่มาสร้างเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.21 สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง ผลการตรวจวัดของแต่ละหัววัด MFM แสดงดังรูปที่ 4.21 (ก) – (ค)

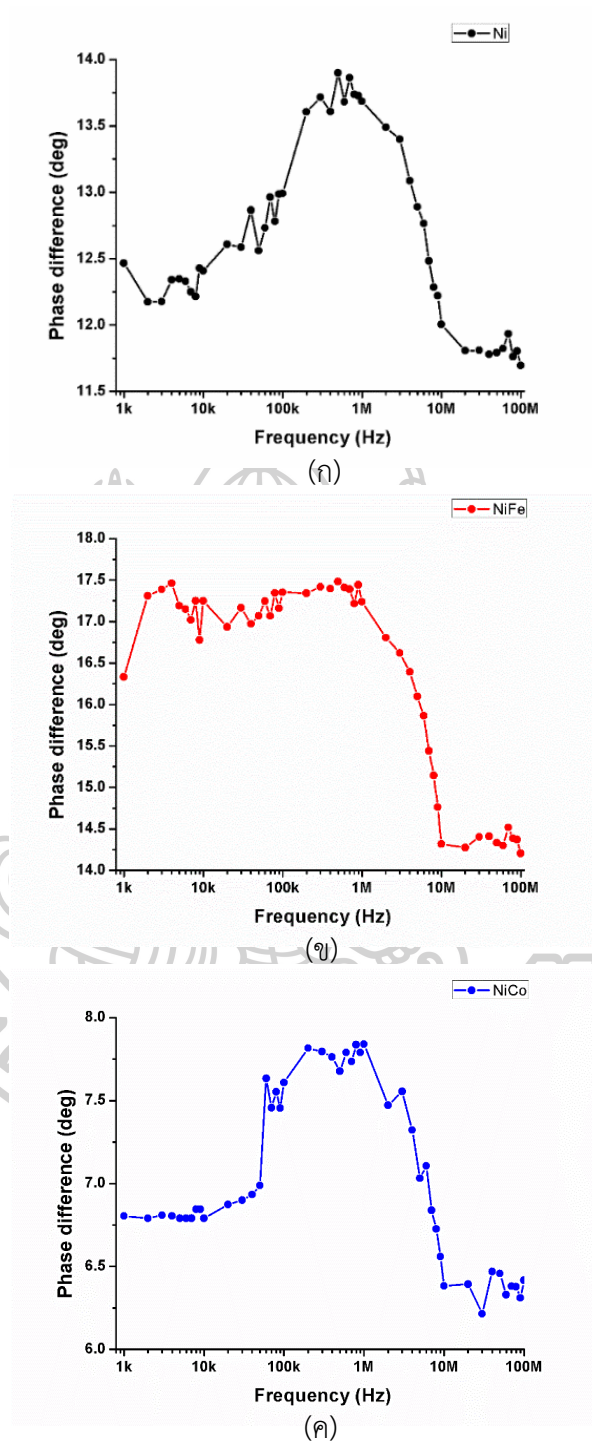
จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีแนวโน้มของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูงได้ดีกว่าหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiCo เพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ผู้วิจัยจะนำค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสที่สูงที่สุด เส้นสีแดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นขนาดของการตอบสนองของหัววัด MFM ที่มีต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนที่ความถี่ต่าง ๆ กัน มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียน ดังรูปที่ 4.22 (ก) – (ค)

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า ลักษณะการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiCo ค่าของการเปลี่ยนแปลงเฟสมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยหัวเขียนจะเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) โดยการเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยหัวเขียนมีเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.23 ส่วนการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูงของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสคงที่ตลอดค่าความถี่ต่ำตั้งแต่ 1kHz จนถึง 1 MHz



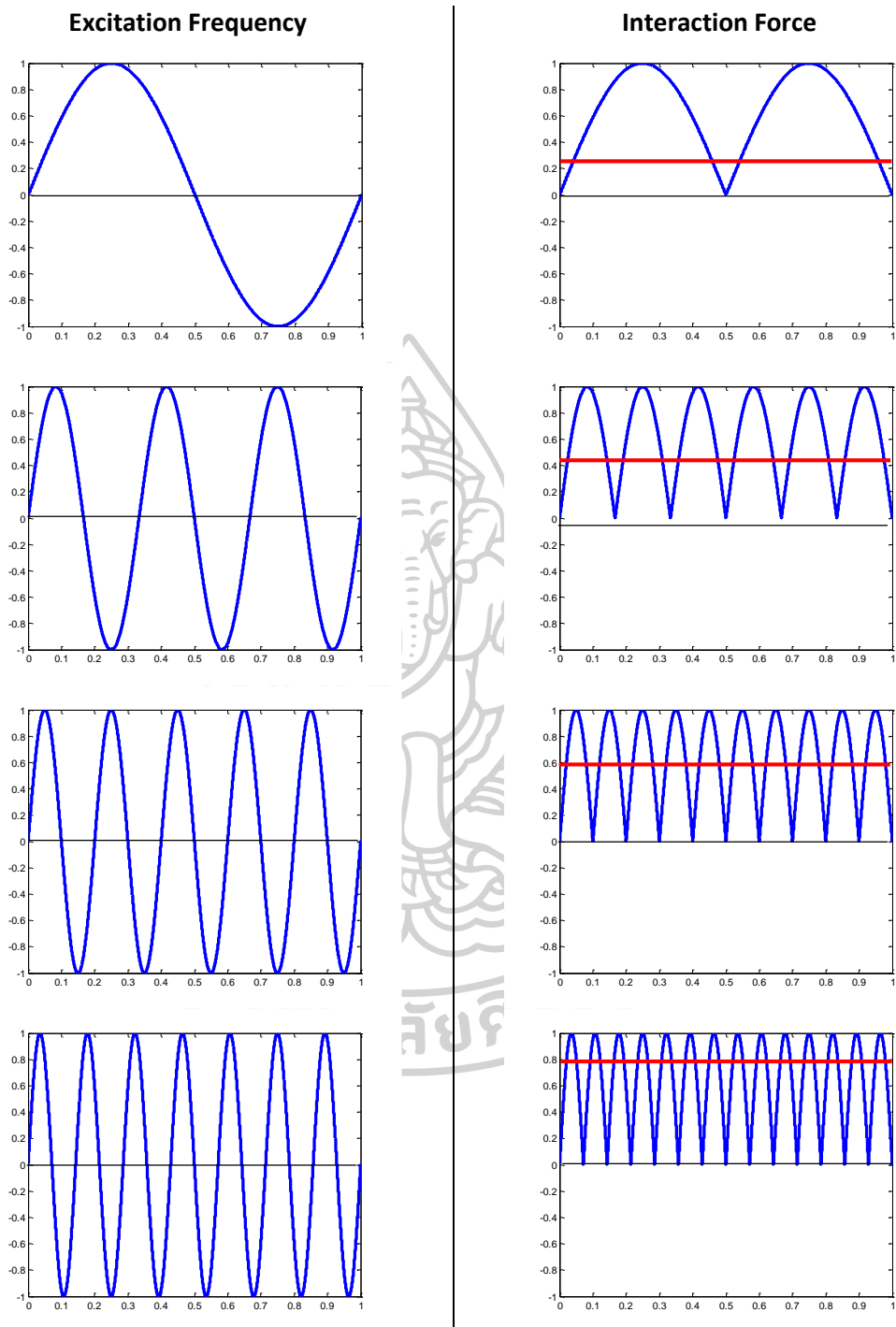


รูปที่ 4.21 เส้นการสแกนที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุดของค่าความถี่ 1kHz – 100 MHz ที่จ่ายให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo

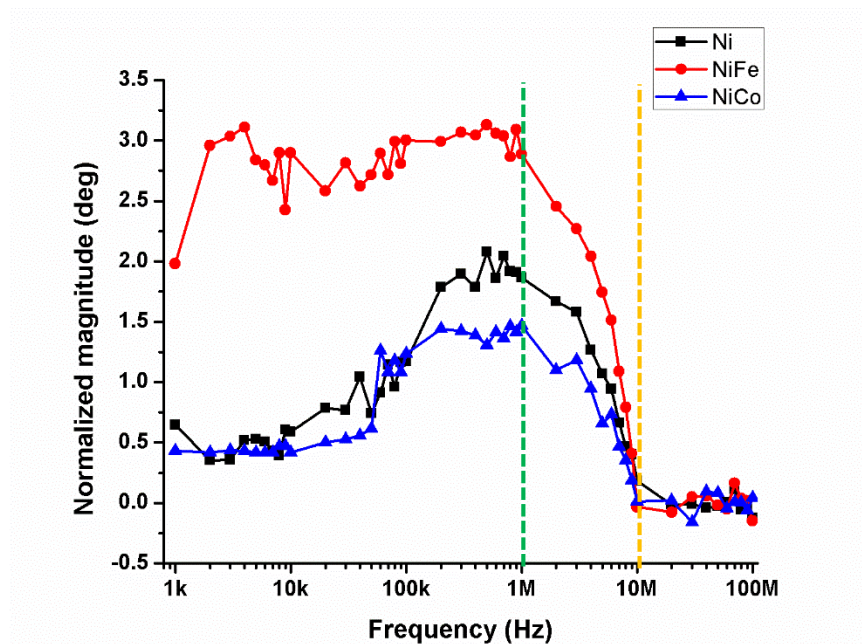


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย (ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo

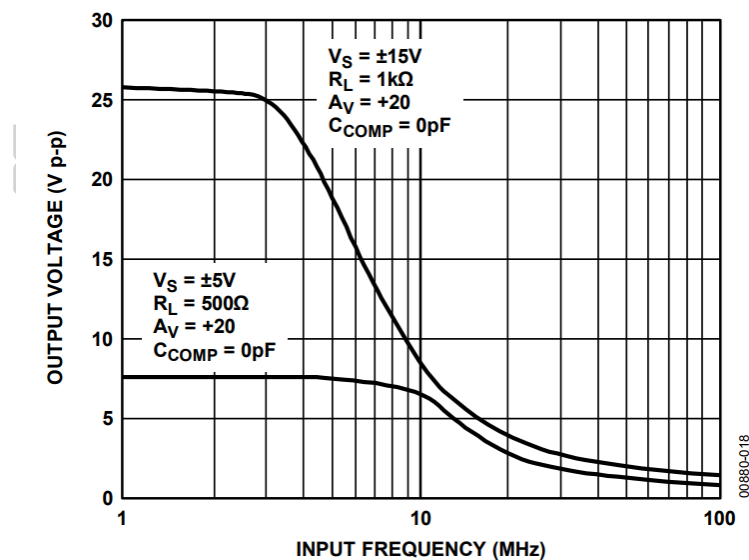




รูปที่ 4.23 ทางซ้ายมือสัญญาณความถี่ที่ป้อนให้กับหัวเขียน ทางขวามือสัญญาณที่ตรวจวัดได้ โดยเส้นสีแดงคือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลเซชันของค่าความต่างเฟสกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz โดยที่ เส้นสีดำ คือ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เส้นสีแดง คือ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe และ เส้นสีน้ำเงิน คือ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo



รูปที่ 4.25 ช่วงการทำงานของออปแอมป์ที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณอินพุต

ที่มา: (12 December 2016). *TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS*. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD829.pdf>

จากรูปที่ 4.24 คือ กราฟเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูงของ หัววัด MFM ทั้ง 3 ตัว ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของค่าความต่างเฟสในช่วง 10 MHz – 100 MHz และทำการปรับให้เป็น 0 ซึ่งจะทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองได้ดีกว่าหัววัด MFM อื่น ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะการตอบสนองค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงความถี่ 1 kHz – 1 MHz ก็ตาม ข้อสังเกตหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดก็คือ การตอบสนองของหัววัด MFM ทุกตัว เริ่มมีค่าลดลงที่ความถี่เท่ากับ 1 MHz เส้นปะสีเขียว และจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อความถี่มีค่าเท่ากับ 10 MHz เส้นปะสีเหลือง ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ขีดจำกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่บนบอร์ดของ PSD นั่นคือ ออปแอมป์ ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตเท่ากับ 1 MHz – 10 MHz ดังรูปที่ 4.25 จะเห็นว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตมีค่ามากกว่า 2 MHz จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณการตอบสนองของหัววัด MFM ทั้ง 3 มีค่าลดลง

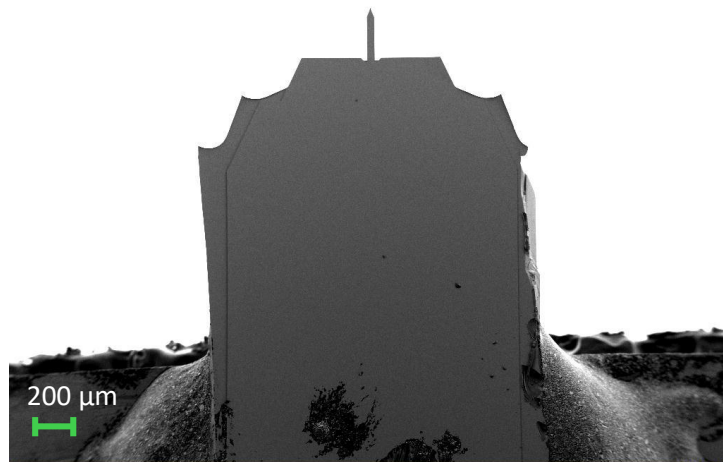
จากการศึกษาในหัวข้อนี้ พบว่าหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni มีความเหมาะสมในการใช้สำหรับตรวจวัดประสิทธิภาพของหัวเขียนแม่เหล็กเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า AC เนื่องจาก มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก AC ที่ดี แมกนีไทเซชันภายในสาร Ni สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีค่าความต่างเฟสสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัววัด MFM มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก AC ได้ดี

#### 4.5 การตรวจสอบรูปทรงและสารที่เคลือบบนหัววัด MFM

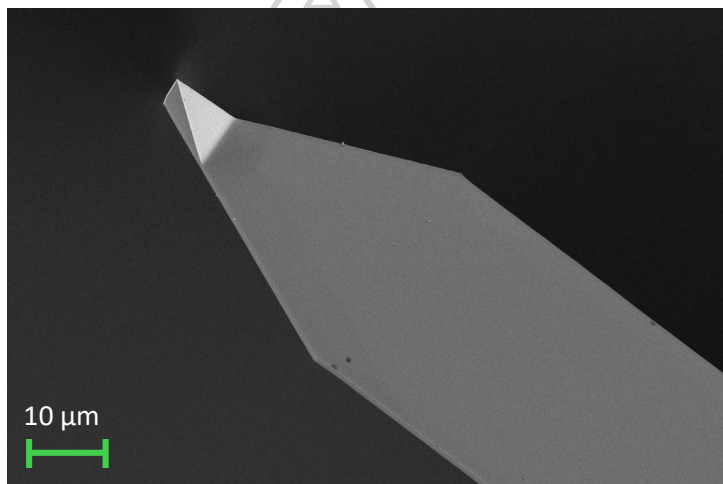
หัววัด MFM ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหัววัด MFM ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป เพื่อเป็นการยืนยันรูปทรงของหัววัด MFM และสารที่เคลือบบนหัววัด MFM ว่าตรงตามข้อมูลทางเทคนิคจากทางบริษัทหรือไม่ ดังนั้น ผู้วิจัยจะทำการถ่ายภาพหัววัด MFM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) ของบริษัท ZEISS รุ่น MERLIN โดย SEM รุ่นนี้สามารถใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในวัสดุได้ด้วย หรือที่รู้จักกันในชื่อ เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (Energy dispersive X-ray spectrometer: EDX) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วย SEM แสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.27

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ SEM

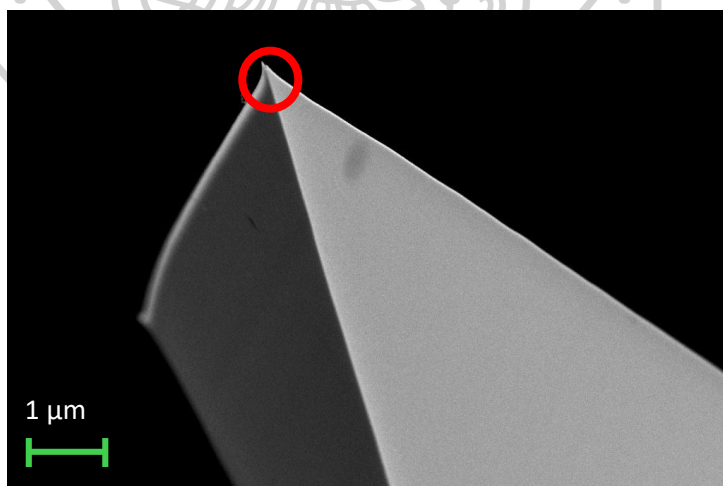
Parameters	Values
Energy	3 kV
Probe current	210 pA
Magnification	35x, 1kx, 10 kx
Working distance	5.1 mm



(ก)

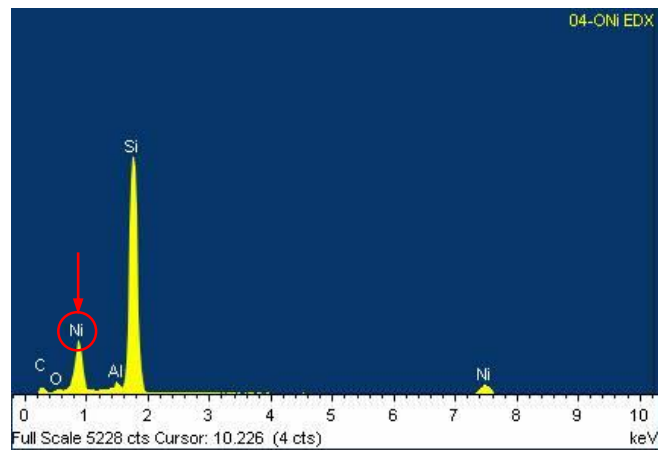


(ข)

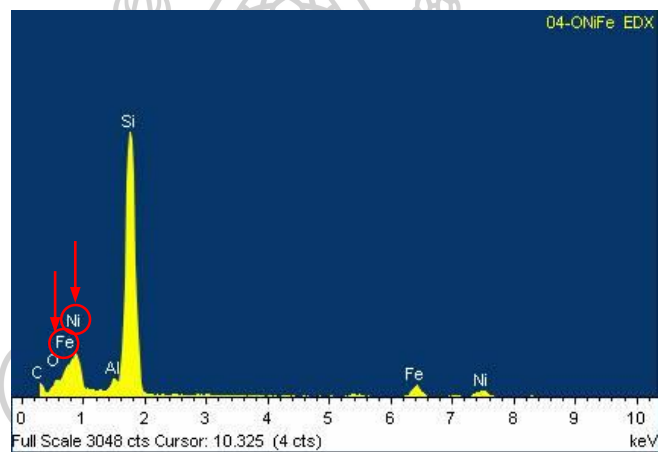


(ค)

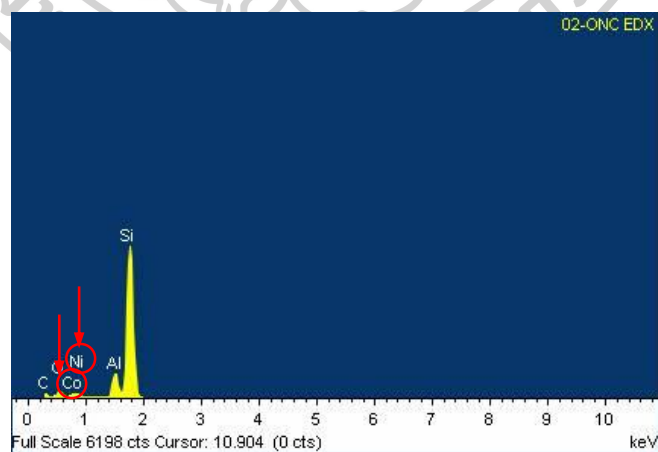
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างรูปภาพของหัววัด MFM ที่ถ่ายด้วย SEM เมื่อกำลังขยาย (ก) 35x (ข) 1kx และ (ค) 10kx



(ก)



(ข)

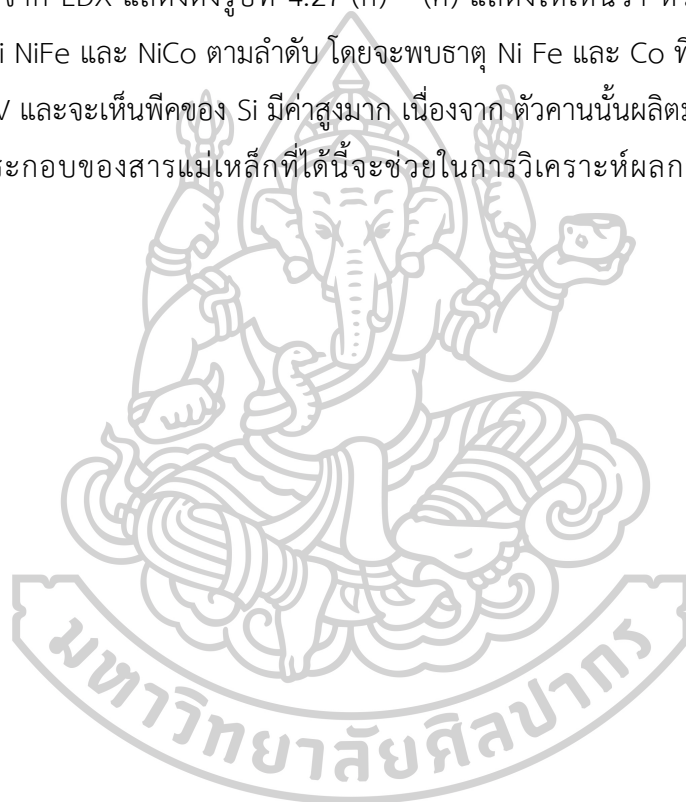


(ค)

รูปที่ 4.27 ผลการตรวจวัดธาตุและสารประกอบด้วย EDX ของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM  
(ก) Ni (ข) NiFe และ (ค) NiCo

จากรูปที่ 4.26 (ก) จะเห็นภาพรวมของหัววัด MFM ทั้งชิ้น ซึ่งจะมีคานยื่นออกมาจากฐานจับ บริเวณปลายคานจะมี tip อยู่ เมื่อซูมเข้าไปที่บริเวณคานและบริเวณหัววัด MFM ด้วยกำลังขยาย 10 kx หรือ 10,000 เท่า พบว่า รูปทรงของหัววัด MFM ทั้ง 3 ตัว เป็นทรงเดียวกับข้อมูลที่ทาง บริษัทผู้ผลิตเผยแพร่ นั่นคือ รูปทรง OPUS โดยบริเวณปลายหัววัด MFM มีลักษณะคล้ายเข็มแหลม ยื่นออกมา

ในการวิเคราะห์สารประกอบของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด MFM จะยังล้าอิล็กตรอนไป ยังตำแหน่งวงกลมสีแดง ในรูปที่ 4.26 (ค) ซึ่งเป็นบริเวณปลายหัววัด MFM ผลการวิเคราะห์ธาตุและ สารประกอบจาก EDX แสดงดังรูปที่ 4.27 (ก) – (ค) แสดงให้เห็นว่า หัววัด MFM ทั้ง 3 ตัวนั้น เคลือบด้วย Ni NiFe และ NiCo ตามลำดับ โดยจะพบธาตุ Ni Fe และ Co ที่ระดับพลังงานประมาณ 0.7 – 0.9 keV และจะเห็นพีคของ Si มีค่าสูงมาก เนื่องจาก ตัวคานนั้นผลิตมาจาก Si ซึ่งผลจากการ ยืนยันสารประกอบของสารแม่เหล็กที่ได้นี้จะช่วยในการวิเคราะห์ผลการวิจัยได้ถูกต้องยิ่งขึ้น





## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กอย่างแพร่หลาย การตรวจวัดลักษณะนี้จะต้องใช้หัววัด MFM ที่สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงซึ่งสร้างโดยหัวเขียนได้ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาการตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์โร ได้แก่ Ni NiFe NiCo ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่มีการติดตั้งหัวเขียนแม่เหล็กแบบตั้งฉากเป็นแหล่งกำเนิดแม่เหล็กภายนอก โดยศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหัววัด MFM สำหรับการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก ได้แก่ ชนิดของสารที่เคลือบบนหัววัด MFM อิทธิพลของการตอบสนองของหัววัด MFM และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง ในการวิเคราะห์การตอบสนองของหัววัด MFM นั้นจะใช้ความต่างเฟสที่ตำแหน่งสูงสุดในการตรวจวัด ซึ่งหาได้จากการนำรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดมาประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม MATLAB

การศึกษากการตอบสนองของหัววัด MFM ต่อชนิดของสนามแม่เหล็ก โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC DC+ และ DC- ให้กับหัวเขียน หัวเขียนจะสร้างสนามแม่เหล็ก AC DC+ และ DC- พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทุกชนิดได้ดีที่สุด และยังพบอีกว่า เกิดการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiFe ในการกลับกันแมกนีไทเซชันของ หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ยังคงจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางเดิม

การศึกษาอิทธิพลของการตอบสนองของ หัววัด MFM โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า DC ให้กับหัวเขียนในช่วง  $\pm 60$  mA ที่ความสูง 75 nm ซึ่งเป็นระดับความสูงทั่วไปที่ใช้ในการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก พบว่า หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีการตอบสนองดีกว่า Ni และ NiCo 2 เท่า แต่รูปภาพสนามแม่เหล็กของหัววัด MFM ทั้ง 3 ตัวมีความคมชัดน้อย และเมื่อทำการศึกษาที่ความสูง 10 nm เพื่อเพิ่มความละเอียดหรือความคมชัดของภาพ พบว่า การตอบสนองของหัววัด MFM มีค่าสูงขึ้น และยังคงเป็นหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe ที่มีการตอบสนองดีที่สุด และให้รูปภาพสนามแม่เหล็กที่มีความคมชัดที่สุดอีกด้วย นอกจากนี้ ยังพบการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni และ NiFe โดยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ที่ 10 mA ส่วน NiCo ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชัน

การศึกษากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความถี่สูง โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้า AC ที่จ่ายให้กับหัวเขียนตั้งแต่ 1 kHz – 100 MHz พบว่า การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe มีลักษณะเรียบหรือมีการตอบสนองเท่า ๆ กัน ตลอดช่วงความถี่ ในทาง

กลับกัน การตอบสนองของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 kHz ขึ้นไป ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo และจุดสังเกตที่พบอีกข้อหนึ่งคือ การตอบสนองของหัววัด MFM ทุกตัว เริ่มลดลง ที่ความถี่เท่ากับ 1 – 2 MHz เนื่องจากขีดจำกัดของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก นั่นคือ ออปแอมป์ซึ่งมีแบนด์วิดท์ในช่วง 2 MHz – 10 MHz

สำหรับการเลือกหัววัด MFM ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานนั้น ผู้วิจัยอาจจะแนะนำได้ว่า หากเป็นการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กเพื่อศึกษาลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้า DC+ ควรใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe เนื่องจากมีการตอบสนองที่ดี รูปภาพสนามแม่เหล็กมีความคมชัด แต่ถ้าหากต้องการศึกษาทิศทางของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กและหัวเขียนแม่เหล็กนั้น สามารถใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ควรจะทำการศึกษาที่ความสูงมากกว่า 70 nm หรือจะใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo ที่ความสูง 10 nm เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชัน สุดท้ายสำหรับการใช้งานเพื่อตรวจวัดสนามแม่เหล็กความถี่สูง แนะนำว่าควรจะใช้หัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในสามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ดี

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองของหัววัด MFM ในอนาคตนั้น ยังมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจเกี่ยวกับการตอบสนองของหัววัด MFM อีกหลายอย่าง เช่น ความหนาของฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบน หัววัด MFM รูปทรงของ หัววัด MFM เป็นต้น โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถเพิ่มการตอบสนอง และความละเอียดของภาพได้เช่นกัน

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่ง MATLAB ที่ใช้สำหรับเฉลี่ยข้อมูลความต่างเฟสที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรง  
แม่เหล็ก

```
clc;
clf;
close all;
clear;

%(index,head,tip)
mfmdata(1,1,1).dir = 'Input your file directory\';
mfmdata(1,1,1).name = 'Input file name';

n_tip = 1;
n_head = 1;
n_index = 1;

for tip = 1:n_tip
    for head = 1:n_head
        for index = 1:n_index

mfmdata(index,head,tip).phase = -csvread([mfmdata(index,head,tip).dir
mfmdata(index,head,tip).name '.csv']);

        end
    end
end

[sizey, size_x] = size(mfmdata(1,1,1).phase);

img_size_x = 800;
img_size_y = 800;
step_x = img_size_x/size_x;
step_y = img_size_y/size_y;

numy = 5;
numx = 7;

for tip = 1:n_tip
    for head = 1:n_head
        for index = 1:n_index
            for count = 1:sizey-numy+1

moving_data_y=mfmdata(index,head,tip).phase(count:count+numy-1,:);
mfmdata(index,head,tip).moving_y(count,:) = ((sum(moving_data_y,1)-
max(moving_data_y,[],1)-min(moving_data_y,[],1))./(numy-2));

            end

            for count = 1:size_x-numx+1
```

```
moving_data_x = mfmdata(index,head,tip).moving_y(:,count:count+numx-1);  
mfmdata(index,head,tip).moving_data(:,count) = ((sum(moving_data_x,2) -  
max(moving_data_x,[],2) - min(moving_data_x,[],2)) ./ (numx-2));  
end  
end  
end  
end
```



## ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่ง MATLAB ที่ใช้สำหรับสร้างรูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์  
แรงแม่เหล็ก

```
clc;
clf;
close all;
clear;

%%(index,head,tip)
mfmdata(1,1,1).dir = 'Input your file directory\';
mfmdata(1,1,1).name = 'Input file name';

n_tip = 3;
n_head = 1;
n_index = 3;

for tip = 1:n_tip
    for head = 1:n_head
        for index = 1:n_index

mfmdata(index,head,tip).phase = -csvread([mfmdata(index,head,tip).dir
mfmdata(index,head,tip).name '.csv']);

        end
    end
end

%% measurement info
[sizey,sizex] = size(mfmdata(1,1,1).phase);

img_size_x = 800;
img_size_y = 800;
step_x = img_size_x/sizex;
step_y = img_size_y/sizey;

numy = 5;
numx = 7;

for tip = 1:n_tip
    for head = 1:n_head
        for index = 1:n_index

            for count = 1:sizey-numy+1
moving_data_y = mfmdata(index,head,tip).phase(count:count+numy-1,:);
mfmdata(index,head,tip).moving_y(count,:) = ((sum(moving_data_y,1)-
max(moving_data_y,[],1)-min(moving_data_y,[],1))./(numy-2));

            end

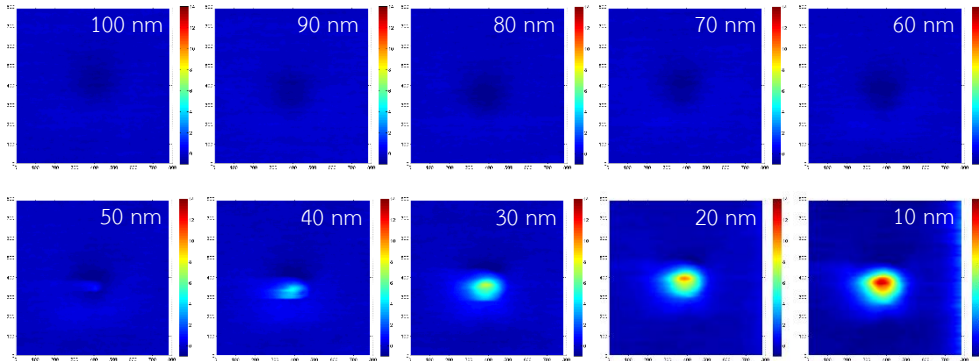
            for count = 1:sizex-numx+1
moving_data_x = mfmdata(index,head,tip).moving_y(:,count:count+numx-
1);
```



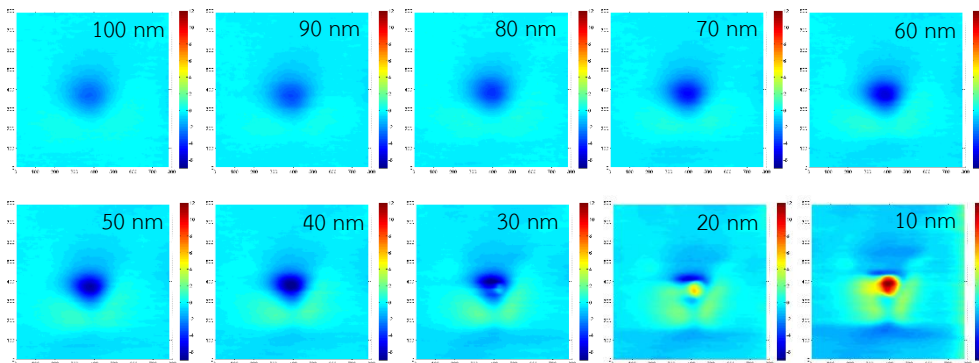


ภาคผนวก ค

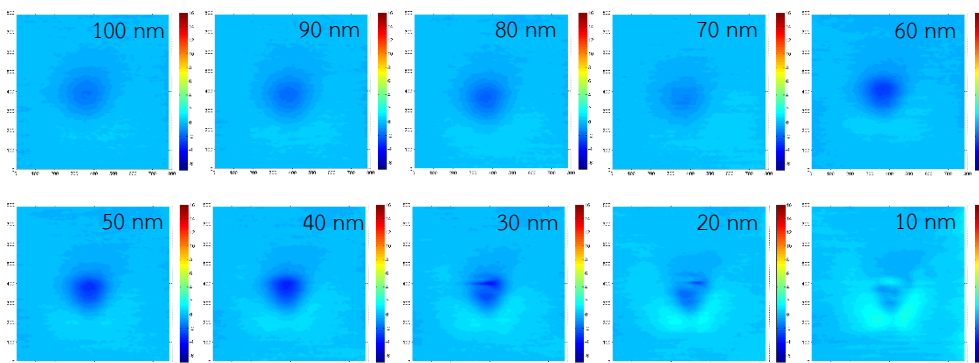
ผลการศึกษาแม่เหล็กไนโทเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM เมื่อแม่เหล็กไนโตซ์ด้วย DC+ ที่ความสูงของการสแกน 100 nm – 10 nm



รูปที่ ค.1 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni

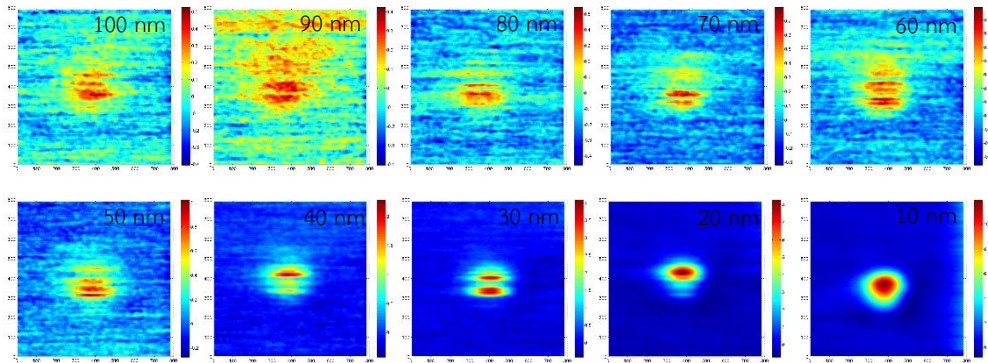


รูปที่ ค.2 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe

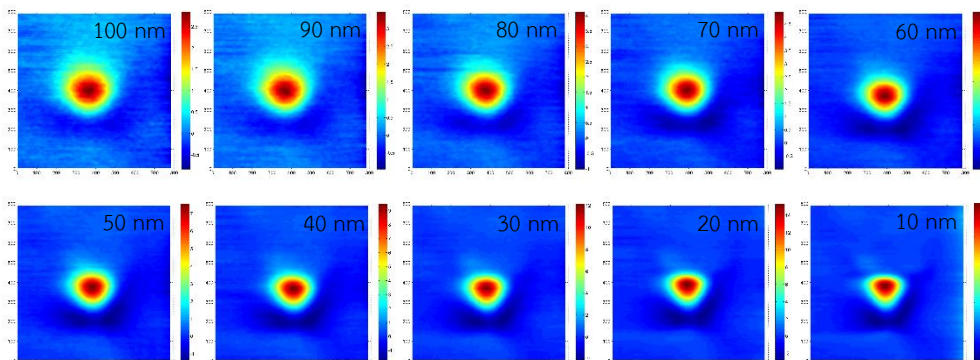


รูปที่ ค.3 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้า DC- ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo

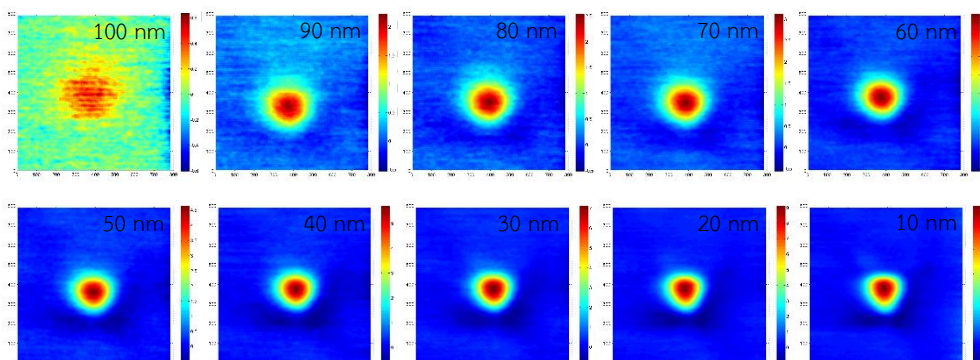
ผลการศึกษาแม่เหล็กไนเซชันเริ่มต้นของหัววัด MFM เมื่อแม่เหล็กไนซ์ด้วย DC- ที่ความสูงของการสแกน  
100 nm – 10 nm



รูปที่ ค.4 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่ย้ายกระแสไฟฟ้า DC+ ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย Ni



รูปที่ ค.5 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่ย้ายกระแสไฟฟ้า DC+ ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiFe



รูปที่ ค.6 รูปภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กขณะที่ย้ายกระแสไฟฟ้า DC+ ของหัววัด MFM ที่เคลือบด้วย NiCo

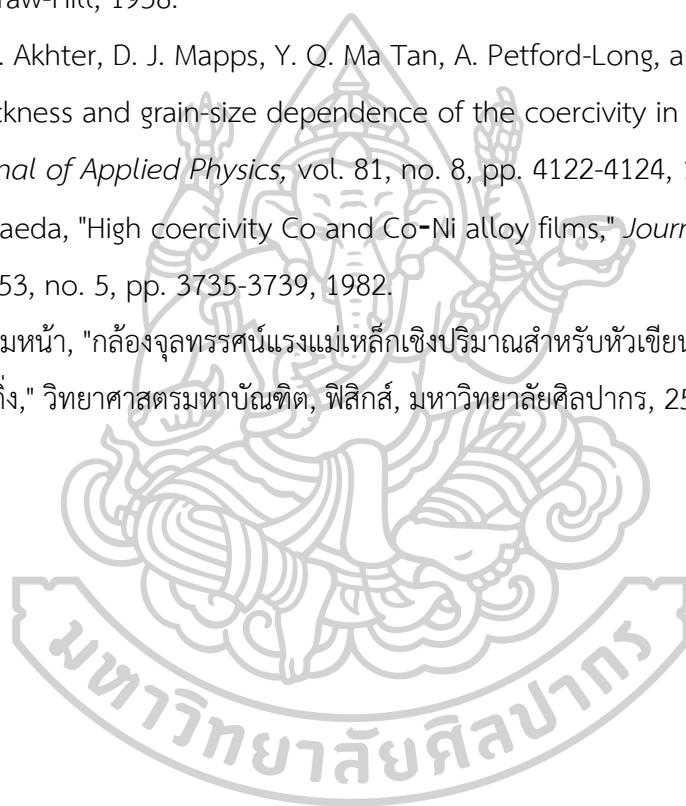
## รายการอ้างอิง

- [1] W. Szmaja, J. Grobelny, M. Cichomski, and K. Makita, "Application of MFM for studying Nd-Fe-B magnets," *Vacuum*, vol. 74, no. 2, pp. 297-300, 2004.
- [2] J. M. García, A. Thiaville, J. Miltat, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, "MFM imaging of patterned permalloy elements under an external applied field," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 242-245, pp. 1267-1269, 2002.
- [3] L. Mei, W. H. Liu, K. Ho, B. M. Lairson, and F. B. Dunning, "Magnetic force microscopy of high-density perpendicular magnetic recording media," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 187, no. 2, pp. 268-272, 1998.
- [4] K. Nagano, K. Tobar, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Effect of Magnetic Film Thickness on the Spatial Resolution of Magnetic Force Microscope Tips," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 303, p. 012014, 2011.
- [5] S. Ishihara, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Magnetic force microscope tips coated with FePd, FePt, and CoPt alloy films," *Thin Solid Films*, vol. 546, pp. 205-210, 2013.
- [6] M. Futamoto, T. Hagami, S. Ishihara, K. Soneta, and M. Ohtake, "Improvement of Magnetic Force Microscope Resolution and Application to High-Density Recording Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 6, pp. 2748-2754, 2013.
- [7] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe, "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution," *Applied Physics Letters*, vol. 50, pp. 1455-1457, 1987.
- [8] X. Liu, S. Isomura, and A. Morisako, "Magnetic Force Microscope Probes With High Resolution by Soft Magnetic Vortex," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3673-3676, 2012.
- [9] D. Niarchos, S. Ishihara, M. Ohtake, M. Futamoto, G. Hadjipanayis, and O. Kalogirou, "Switching fields of high-resolution magnetic force microscope tips coated with Co, Co<sub>75</sub>Pt<sub>10</sub>Cr<sub>15</sub>, Co<sub>75</sub>Pt<sub>25</sub>, and Co<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>films," *EPJ Web of Conferences*, vol. 75, p. 06007, 2014.
- [10] S. Porthun, L. Abelmann, and C. Lodder, "Magnetic force microscopy of thin film

- media for high density magnetic recording," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 182, pp. 238-273, 1998.
- [11] (15 May 2016). *History of IBM magnetic disk drives*. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_IBM\\_magnetic\\_disk\\_drives](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_IBM_magnetic_disk_drives)
- [12] (15 May 2016). *FILL YOUR NAS WITH RED. THEN FILL IT WITH AWESOME*. Available: <https://www.wdc.com/en-ie/products/internal-storage/wd-red.html>
- [13] R. D. Gomez, T. V. Luu, O. A. Pak, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, "Domain configurations of nanostructured Permalloy elements," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 6163-6165, 1999.
- [14] P. Rice, J. Moreland, and A. Wadas, "dc magnetic force microscopy imaging of thin-film recording head," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, no. 10, pp. 6878-6880, 1994.
- [15] N. Amos *et al.*, "Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices," *IEEE MAGNETICS LETTERS*, vol. 1, 2010.
- [16] F. Liu *et al.*, "Characteristics of magnetic force microscopy magnetics on high moment perpendicular magnetic recording writers with high coercivity probes," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, 2012.
- [17] G. N. Phillips, M. Siekman, L. Abelmann, and J. C. Lodder, "High resolution magnetic force microscopy using focused ion beam modified tips," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 5, pp. 865-867, 2002.
- [18] L. Yuan *et al.*, "Magnetic Force Microscopy Study of CoPtCrO Perpendicular Media With Superparamagnetic and Permanent Magnet Tips," presented at the INTERMAG 2006, San Diego, CA, USA, 2006.
- [19] I. Tagawa, S. Ikeda, and Y. Uehara, "High-Performance Write Head Design and Materials," *FUJITSU Science & technology journal*, vol. 37, no. 2, pp. 164-173, 2001.
- [20] X. Xing, A. Taratorin, and K. B. Klaassen, "Experimental Study of Perpendicular Write Head Field Rise Time," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, p. 2183, 2007.
- [21] P. George, K. Yamakawa, K. Ise, N. Honda, and K. Ouchi, "High-Frequency



- Inductance Measurements and Performance Projections Made for Cusp-Field Single-Pole Heads," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 4, pp. 1949-1954, 2003.
- [22] M. Stano, "CHARACTERIZATION OF MAGNETIC NANOSTRUCTURES BY MAGNETIC FORCE MICROSCOPY," Master, physical engineering, Brno University of Technology, 2014.
- [23] B. W. F, "Magnetic Materials," in *the Handbook of Chemistry and Physics*: McGraw-Hill, 1958.
- [24] M. A. Akhter, D. J. Mapps, Y. Q. Ma Tan, A. Petford-Long, and R. Doole, "Thickness and grain-size dependence of the coercivity in permalloy thin films," *Journal of Applied Physics*, vol. 81, no. 8, pp. 4122-4124, 1997.
- [25] H. Maeda, "High coercivity Co and Co-Ni alloy films," *Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 5, pp. 3735-3739, 1982.
- [26] อ. โฉมหน้า, "กล่องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงปริมาณสำหรับหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง," วิทยาสตรมหาบัณฑิต, ฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.







## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อดิวรรณ สังข์ทอง
วัน เดือน ปี เกิด	15 สิงหาคม 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 160 หมู่ที่ 4 ซอยประปา 13 ตำบล บางหญ้าแพรก อำเภอ เมืองสมุทรสาคร จังหวัด สมุทรสาคร 74000
ผลงานตีพิมพ์	A Sungthong, P Ruksakchai, K Saengkaew, I Cheowanish and B Damrongsak. "Response of Magnetic Force Microscopy Probes under AC Magnetic Field," Journal of Physics: Conference Series (JPCS). [accepted]

