



การวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



นางสาวอัจฉรา โฉมหน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขีนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

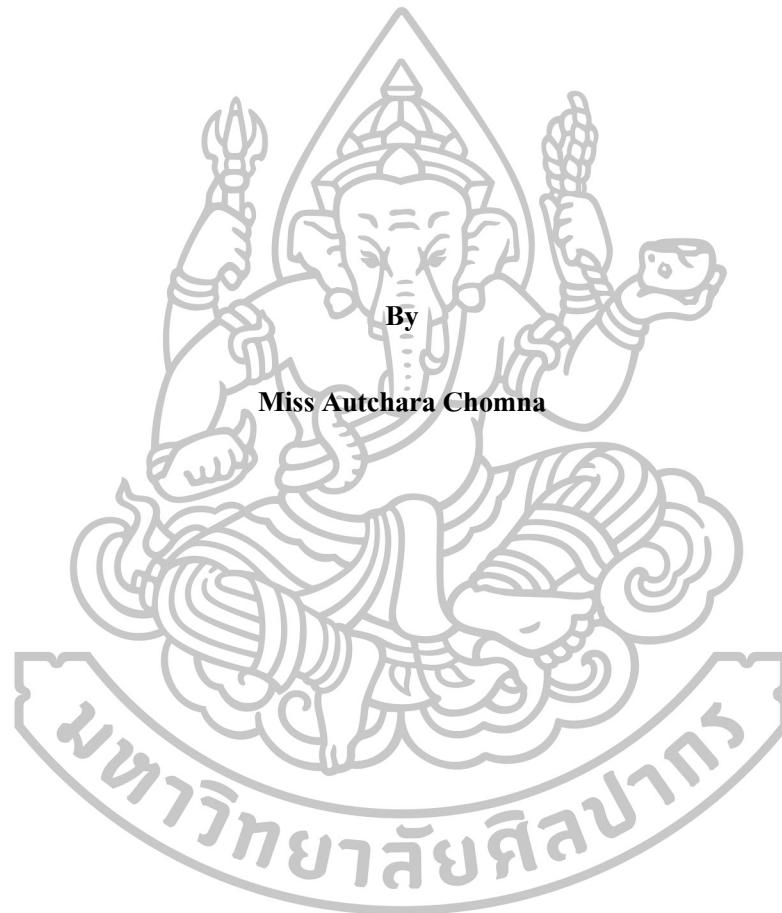
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MEASUREMENT OF MAGNETIC WRITE FIELD WITH PHASE DETECTION  
MAGNETIC FORCE MICROSCOPY**



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

**Master of Science Program in Physics**

**Department of Physics**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุญาตให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การวัด  
สนามแม่เหล็กของหัวเขียนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก” เสนอ  
โดย นางสาวอัจฉรา โฉมหน้า เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี หาญสุภาอนุสรณ์)

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

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์)

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

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)

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



55306207 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก/เกรเดียนท์สนามแม่เหล็ก/ความเข้มสนามแม่เหล็ก

อัจฉรา โฉมหน้า : การวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: อ.ดร.บดินทร์ คำรงค์ดี, 96 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงปริมาณได้ถูกพัฒนาและใช้ในการทดลองเพื่อตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยทั่วไปแล้วกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy : MFM) มีความคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy : AFM) ซึ่งหัววัดของ AFM ถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเพื่อให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของวัตถุที่ตรวจวัด ผลลัพธ์ที่ได้จาก MFM จะอยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ที่หลากหลาย ในการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของวัตถุ เราจึงทำการสอบเทียบวัตถุที่ตรวจวัดกับวัตถุที่ทราบค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยใช้ผลของการจำลองหัวเขียนแม่เหล็กจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) ในส่วนแรกเป็นการอธิบายลักษณะของหัวเขียนแม่เหล็กขนาดต่างๆ โดยใช้ MFM พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสัญญาณ MFM มีสองส่วนหลักๆ ที่ถูกตรวจสอบคือ กระแสไฟฟ้าและความสูงของการสแกน ซึ่งให้ผลในรูปแบบความต่างเฟสที่แตกต่างกันออกไป ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าขนาดของความต่างเฟสจะลดลงเมื่อระดับความสูงของการสแกนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความต่างเฟสจะแปรผันเชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้า ในส่วนสุดท้ายเป็นการสาธิตการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กในเชิงปริมาณด้วย MFM โดยทำการทดลองกับหัวเขียนแม่เหล็กสามขนาดที่แตกต่างกัน ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามจะได้รับการอินทิเกรตความต่างเฟสสองครั้งตั้งแต่ระดับความสูง 30 nm จนถึง 150 nm โดยตรวจวัดในตำแหน่งเดียวกัน ผลที่ได้จะถูกนำไปสอบเทียบกับความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับ FEM เพื่อหาความสัมพันธ์จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function)

---

ภาควิชาฟิสิกส์

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

55306207 : MAJOR: (PHYSICS)

KEY WORDS : MAGNETIC FORCE MICROSCOPY / MAGNETIC FIELD GRADIENT  
/MAGNETIC FIELD STRENGTH

AUTCHARA CHOMNA: QUANTITATIVE MAGNETIC FORCE MICROSCOPY  
FOR PERPENDICULAR MAGNETIC WRITE HEADS. THESIS ADVISOR: BADIN  
DAMRONGSAK, Ph.D. 96 pp.

In this thesis, a quantitative magnetic force microscopy was developed and demonstrated for being used to measure the magnetic field of magnetic write heads. Generally magnetic force microscopy (MFM) is similar to atomic force microscopy (AFM) in which an AFM tip is coated with magnetic materials in order to response to local magnetic field of test samples. MFM outputs, both amplitude difference and phase shift, are dependent on many parameters. In order to measure the magnetic field strength of test samples, we need a calibration sample with known magnetic field intensity. One possible solution is to employ simulation results from the finite element model of magnetic write heads. In the first section, MFM characterization of magnetic write heads with various pole widths was studied. The effect of two main parameters, a write current and a scan height, on the variation of a phase shift in MFM outputs was also investigated. Experimental results revealed that the magnitude of phase shifts significantly decreases when increasing scan heights. In contrast, it is linearly dependent on the applied write current. In the last section, the quantitative MFM of magnetic write heads was demonstrated. Three magnetic write heads with different pole widths were employed as test samples. The magnetic field strength of those magnetic heads was calculated using double integrations of the corresponding phase shifts along the scan heights, ranging from 30 nm to 150 nm. The calculation results were then calibrated with the magnetic field intensity from finite element simulations of magnetic write heads with the same design in order to find the transfer function.

---

Department of Physics

Graduate School Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทเวสเทิร์นดิจิทัล (Western Digital : WD) ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่เพื่อใช้ในการศึกษางานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคลากรในบริษัท WD ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณ Chakkrit Supavasuthi ที่ช่วยให้ความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณพี่ Karnt Saengkaew ที่ช่วยดูแลและอำนวยความสะดวกในด้านของเครื่องมือที่ใช้วิจัย ขอขอบพระคุณพี่ Ittipon Cheowanish ที่ช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมไปถึงบุคลากรในแผนก Technical Support Engineer ที่ให้คำแนะนำ สอนการใช้เครื่องมือ และคอยดูแลระหว่างการทำวิจัยเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในงานวิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เป็นอย่างดี ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามเป้าหมาย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี หาญสุภานุสรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภทริยา ดำรงค์ศักดิ์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และคอยแนะนำในทุกๆ ด้าน อีกทั้งบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นางอัมพร โคมหน้า (มารดา) และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจที่สำคัญและคอยสนับสนุนผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการทำงานและประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน .....	7
2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning tunneling microscopy : STM) ..	9
2.1.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ (scanning near – field optical microscopy : SNOM).....	9
2.1.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy : SFM).....	9
2.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง .....	10
2.2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	11
2.2.2 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก .....	12
2.2.2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก .	14
2.2.2.1.1 หัววัดแม่เหล็ก (magnetic probe).....	14
2.2.2.1.2 ตัวสแกนเพียโซ piezoscanner .....	16
2.2.2.1.3 ตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคานหรือตัวตรวจจับ ความไวแสง (photosensitive detector : PSD) .....	16



2.2.2.1.4 ระบบการสั่นของคาน (probe oscillator หรือ piezoelectric bimorph) .....	17
2.2.2.1.5 ตัวป้อนกลับระบบคาน (feedback control loop) .....	19
2.2.2.2 โหมดการตรวจวัด .....	20
2.2.2.2.1 โหมดสัมผัส (contact mode) .....	20
2.2.2.2.2 โหมดไม่สัมผัส (non - contact mode) .....	20
2.2.2.2.3 โหมดตีสัมผัส (tapping mode) .....	21
2.2.2.2.4 โหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode).....	22
2.2.2.3 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	23
2.2.2.3.1 โหมดคงที่ (static mode : DC).....	23
2.2.2.3.2 โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode : DC).....	24
2.2.2.4 ปฏิกริยาทางแม่เหล็กของหัววัดและวัตถุแม่เหล็ก.....	27
2.2.2.5 ระบบของหัววัดแม่เหล็ก .....	31
2.3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive).....	33
2.3.1 การทำงานและส่วนต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์.....	33
2.3.1.1 แขนหัวอ่าน/เขียน (actuator arm).....	33
2.3.1.2 มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (spindle motor) .....	34
2.3.1.3 แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (media).....	34
2.3.1.4 หัวอ่าน/หัวเขียน (read/write head) .....	34
2.4 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก .....	34
2.5 การเกิดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก .....	36
2.5.1 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ .....	36
2.5.2 กฎของบิโอต์ – ซาวาร์ต (Biot – savart law).....	38
2.5.3 ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) .....	39
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	40

บทที่	หน้า
3	หลักการของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ศึกษาหัวเขียนแม่เหล็ก ..... 44
3.1	การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ..... 44
3.1.1	ขั้นตอนการจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับการตรวจวัดหัวเขียน ..... 44
3.1.2	ขั้นตอนการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก..... 47
3.1.3	การพิจารณาการตอบสนองของหัววัดแม่เหล็ก..... 49
3.1.4	การสร้างรูปภาพแม่เหล็ก..... 50
3.1.5	ข้อมูลของหัวเขียนแม่เหล็ก..... 53
3.1.6	การพิจารณาข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ ..... 54
4	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก..... 56
4.1	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพ..... 57
4.1.1	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้า..... 57
4.1.2	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวเขียน ..... 61
4.1.3	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากระดับความสูงของการสแกน ..... 65
4.2	การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณ โดยการสอบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 69
5	สรุปและอภิปรายผล ..... 79
	รายการอ้างอิง ..... 83
	ภาคผนวก ..... 87
	ภาคผนวก ก ..... 87
	ภาคผนวก ข ..... 90
	ภาคผนวก ค ..... 93
	ประวัติผู้วิจัย ..... 96

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	45
4.1	หัวเขียนแม่เหล็กจำนวน 10 ขนาด.....	57
4.2	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของความต่างเฟสและขนาดความกว้างของหัวเขียนที่ ขนาดกระแสไฟฟ้าต่างๆ .....	65
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จาก MFM และ FEM ของหัวเขียนทั้งสามขนาด .....	74



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กบนหัวเขียน .....	1
1.2	การตอบสนองของคานแม่เหล็กเนื่องจากแรงแม่เหล็กของหัวเขียนกระทำต่อคาน ทำให้เฟสของคานเกิดการเปลี่ยนแปลง.....	3
2.1	ส่วนประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน .....	7
2.2	ประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนแยกตามคุณสมบัติของหัววัด ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning tunneling microscopy : STM) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy : SFM) และ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ (scanning near-field optical microscopy : SNOM).....	8
2.3	บทบาทของแรงที่ขึ้นกับระยะทาง ปฏิกริยาของแรงที่กระทำต่อคานที่ระยะห่าง จากวัตถุ.....	10
2.4	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม .....	11
2.5	กราฟของแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุ ที่แตกต่างกัน .....	12
2.6	หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	14
2.7	หัววัดแม่เหล็ก .....	15
2.8	(ก) กราฟฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กประเภทแม่เหล็กอ่อน (ข) หัววัดสแกนบน วัตถุแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าหรือออกจากวัตถุทำให้เกิดปฏิกริยาทาง แม่เหล็กกับหัววัด ส่งผลให้เมกนีไทเซชันของหัววัดเปลี่ยนแปลงทิศทาง .....	15
2.9	ตัวสแกนเพียโซ .....	16
2.10	ตัวตรวจจับความไวแสง .....	17
2.11	แผนผังหลักการทำงานของระบบการสั่นของคาน .....	19
2.12	วงจรรเฟสล็อกคูลูป (phase-lock loop : PLL).....	20
2.13	โหมดการตรวจวัดบนชิ้นงานทั้งสามแบบ (ก) การสแกนแบบสัมผัส (contact mode) (ข) การสแกนแบบไม่สัมผัส (non-contact mode) และ (ค) การสแกนแบบกึ่งสัมผัส (tapping mode).....	20

รูปที่	หน้า
2.14	การเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดเนื่องจากการสั่นของคาน (ก) ขนาดของ แอมพลิจูดเริ่มต้นจากการป้อนความถี่เรโซแนนซ์ให้แก่คาน (ข) การเปลี่ยนแปลง ของแอมพลิจูดที่เมื่อตรวจวัดบนผิวงานที่มีลักษณะลึกลง (ค) การเปลี่ยนแปลงของ แอมพลิจูดที่ลดลงเมื่อตรวจวัดบนผิวงานที่มีลักษณะนูนสูง ..... 21
2.15	เฟสของคานที่ป้อนความถี่เรโซแนนซ์ให้แก่คาน (สื่อน้ำเงิน) และการเปลี่ยนแปลงเฟส เมื่อคานตอบสนองต่อแรงจากวัตถุ (สีแดง) ด้วยการตรวจวัดแบบ tapping mode..... 22
2.16	การสแกนแบบโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode)..... 23
2.17	การสั่นของคานเมื่อมีแรงแม่เหล็กมากระทำ โดยคานแต่ละไปบนพื้นผิววัตถุ ซึ่ง เส้นทึบของคานบ่งบอกถึงตำแหน่งของคานเริ่มต้นการวัด และเส้นประของคาน บ่งบอกถึงแรงแม่เหล็กของวัตถุที่กระทำต่อหัววัดทำให้คานเกิดการโค้งงอ ..... 23
2.18	การเปรียบเทียบการทำงานของหัววัดแม่เหล็กที่มีลักษณะคล้ายหัววัดแม่เหล็ก เคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยแรงสปริงที่ถูกติดไว้กับปลายคาน ..... 24
2.19	รูปแบบคานแบบเม็ดมวล (Point mass model) (ก) การสั่นของแอมพลิจูด และ (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟส ..... 27
2.20	การจำลองการตรวจวัดวัตถุแม่เหล็ก ซึ่งระบบของคานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูก เกรเดียนต์แรงแม่เหล็ก $dF/dz$ ที่ออกจากวัตถุแม่เหล็กบริเวณ ทำให้คานที่อยู่ใน ระบบสมดุล (ตำแหน่ง $z_0$ ) เปลี่ยนตำแหน่งไปที่ระดับ $z$ ใดๆ ทำให้เกิดค่าคงที่ ยังผลของสปริง $k_{eff} = k - dF/dz$ ..... 28
2.21	รูปแบบคานแบบเม็ดมวล (ก) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลง (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟส โดยกราฟสีน้ำเงินคือการสั่นของคานที่ความถี่ เรโซแนนซ์ และกราฟสีแดงคือการสั่นของความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีแรงแม่เหล็กมากระทำ ..... 30
2.22	รูปแบบหัววัดแม่เหล็กแบบเม็ดมวล (point probe) (ก) หัววัดแม่เหล็กที่มีลักษณะ เป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (magnetic dipole moment : $m$ ) หรือโมเมนต์ขั้วเดียว (magnetic monopole moment : $q$ ) (ข) พิจารณาหัววัดแม่เหล็กในรูปแบบประจุ ซึ่งภายในสีเหลืองจะเป็นบริเวณที่มีแมกนีไทเซชันแตกต่างกันทั้งสองฝั่ง ..... 32
2.23	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์..... 33

รูปที่	หน้า
2.24	เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (ก) การบันทึกข้อมูลแบบแวนอน (ข) การบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ..... 35
2.25	ส่วนประกอบของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีชนิดรีอบด้าน (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองจากด้านล่าง ..... 36
2.26	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดโซลินอยด์ (ก) เส้นแรงแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ (ข) รูปร่างตัดขวางของขดลวด โซลินอยด์ในอุดมคติซึ่งสนามแม่เหล็กภายในจะจัดเรียงตัวกันแบบสม่ำเสมอ และสนามแม่เหล็กภายนอกขดลวดโซลินอยด์จะมีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณ สนามแม่เหล็กจะแสดงด้วยเส้นปะสีแดง ..... 37
2.27	สนามแม่เหล็กพุ่งจากหัวเขียนแม่เหล็กบริเวณ โพลหลักเนื่องจากการเหนี่ยวนำจาก การป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด ..... 38
2.28	สนามแม่เหล็ก $dB$ ที่จุด $P$ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ $Idl$ ..... 38
2.29	ฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งตั้งฉากกับพื้นผิว (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กทำมุม $\theta$ กับพื้นผิว ..... 40
2.30	รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแบบ UHC MFM ของหัวเขียนที่กระแสไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน (a) 0 mA (b) 2 mA (c) 5 mA (d) 10 mA (e) 15 mA (f) 20 mA (g) 25 mA (h) 45 mA (i) -45 mA ..... 40
2.31	วงแหวนกระแสไฟฟ้าในระดับไมโครเมตร (a) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวน เท่ากับ $1 \mu\text{m}$ และ (b) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวนเท่ากับ $5 \mu\text{m}$ (ก) วงแหวน ที่ได้จากกระบวนการสร้างด้วย EBL (ข) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ..... 42
3.1	การตั้งค่าความถี่ของคานแม่เหล็กให้สั้นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ ..... 45
3.2	การจัดตั้งอุปกรณ์ของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับตรวจวัดหัวเขียน ..... 46
3.3	เส้นการสแกนและลำดับของการสแกน จากตำแหน่งบนซ้ายไปขวาของพื้นที่ หัวเขียนในรูปเล็กคือระยะห่างของการวัดข้อมูลในแต่ละตำแหน่งทั้งใน แนวแกน x และในแนวแกน y ..... 47

รูปที่	หน้า
3.4	การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) การสแกนครั้งแรกด้วยโหมดการตรวจวัดแบบ กึ่งสัมผัส (ข) การสแกนครั้งที่สองเป็นการสร้างรูปภาพแม่เหล็กด้วยการสแกน แบบไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ โดยบริเวณสีส้มคือตำแหน่งที่มีสนามแม่เหล็ก มากและบริเวณสีเทาคือบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กน้อย ..... 47
3.5	การสั้นของคาน (ก) กรณีที่คาน ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ (ข) กรณีที่คานถูกแรง ภายนอกจากวัตถุกระทำ ..... 48
3.6	การตอบสนองของหัววัดแม่เหล็กในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟส ..... 49
3.7	การสั้นของคานที่ความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากแรงดูดและแรงผลัก (ก) การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคาน (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน..... 50
3.8	การสร้างรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียน (ก) ลักษณะการวัดหัวเขียนแม่เหล็กใน แนวแกน x โดยระยะห่างระหว่างหัววัดกับหัวเขียนห่างกัน 10 nm (ข) ค่าความต่างเฟสที่วัดได้ในแต่ละแนวการสแกน (ค) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้ จากการพล็อตค่าความต่างเฟสของหัวเขียนแม่เหล็ก (ง) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้ จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ..... 51
3.9	รูปภาพแม่เหล็ก (ก) ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยตรง (ข) ข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ย..... 52
3.10	ค่าความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ บนหัวเขียนแม่เหล็ก ..... 52
3.11	รูปภาพแม่เหล็กในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานแบบสามมิติ..... 53
3.12	ข้อมูลของหัวเขียนแม่เหล็กในแนวครอสแตรีกและคาน์แตรีก (ก) ทิศทางข้อมูลเมื่อ เทียบกับตำแหน่งของหัวเขียนแม่เหล็ก (ข) ทิศทางข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม ..... 53
3.13	การปรับตำแหน่งพื้นที่เพื่อเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแต่ละขนาด ..... 54
3.14	การเลือกข้อมูลในแนวครอสแตรีกที่มีแอมพลิจูดสูงสุด (ก) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้ จากการตรวจวัดด้วย MFM โดยเส้นประสีดำคือค่าข้อมูลในแนวครอสแตรีกที่มี ค่าแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ (ข) ข้อมูลในแนวครอสแตรีกที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด..... 55
4.1	ตัวอย่างของพื้นของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน ..... 57
4.2	แผนผังรูปภาพการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ หัวเขียนแม่เหล็กขนาด 10 mA ถึง 60 mA..... 58

รูปที่	หน้า
4.3	การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวคอสเทอริคที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน สูงสุดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในหัวเขียน แต่ละขนาด (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm (ง) 77.20 nm (จ) 73.55 nm และ (ฉ) 59.75 nm..... 59
4.3	(ต่อ) การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวคอสเทอริคที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน สูงสุดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในหัวเขียนแต่ละขนาด (ช) 59.35 nm (ซ) 53.11 nm (ฅ) 37.53 nm และ (ญ) 33.19 nm ..... 60
4.4	ค่าความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนแต่ละขนาดที่มีปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างกัน ตั้งแต่ 10 mA ถึง 60 mA..... 61
4.5	การตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนขนาดต่างๆ โดยระยะห่างของการสแกน ระหว่างหัวเขียนแม่เหล็กและหัววัดที่ระดับความสูง 10 nm..... 62
4.6	การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวคอสเทอริคที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุด ที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของหัวเขียนขนาดต่างๆ (ก) 20 mA (ข) 30 mA (ค) 40 mA (ง) 50 mA และ (จ) 60 mA..... 63
4.7	ค่าความต่างเฟสสูงสุดในหัวเขียนแต่ละขนาดที่กระแสไฟฟ้าต่างๆ ..... 64
4.8	ฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) หัวเขียนขนาดใหญ่ (ข) หัวเขียนขนาดเล็ก..... 64
4.9	การตรวจวัดสนามแม่เหล็กบนหัวเขียนที่ระดับความสูงต่างกัน โดยระดับความสูง ของการสแกนต่ำสุดที่ 10 nm ซึ่งจะตรวจวัด ไปถึงระดับความสูงของการสแกน เท่ากับ 100 nm (ระดับความสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสน้อยมากๆ การเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้ศูนย์)..... 66
4.10	การเปลี่ยนแปลงความสูงของการสแกนที่ระดับความสูงต่างๆ ของหัวเขียน แต่ละขนาด (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm (ง) 77.20 nm (จ) 73.55 nm และ (ฉ) 59.75 nm..... 67
4.10	(ต่อ) การเปลี่ยนแปลงความสูงของการสแกนที่ระดับความสูงต่างๆ ของหัวเขียน แต่ละขนาด (ช) 59.35 nm (ซ) 53.11 nm (ฅ) 37.53 nm และ (ญ) 33.19 nm..... 68
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสสูงสุดและระดับความสูงของการสแกน ..... 69



รูปที่	หน้า
4.12	รูปภาพของความต่างเฟสที่แต่ละระดับความสูงของการสแกนต่างๆ
	(ก) รูปภาพสามมิติ (ข) รูปภาพสองมิติ ..... 70
4.13	การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กที่ความสูงของการสแกนตั้งแต่ SH = 30 nm จนถึง 150 nm..... 71
4.14	การอินทิเกรตค่าความต่างเฟสเพื่อคำนวณหาแรงแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จาก การตรวจวัดด้วย MFM ที่ระดับความสูงต่างๆ ..... 72
4.15	(ก) การอินทิเกรตแรงแม่เหล็กเพื่อคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็ก ของหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM ที่ระดับความสูงต่างๆ (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ระดับความสูงต่างๆ ..... 73
4.16	สนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ความสูงของการสแกนตั้งแต่ 30 nm จนถึง 100 nm (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณผลจาก MFM (ข) ความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนด้วย FEM ..... 74
4.17	การเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จาก MFM และ FEM ของหัวเขียนทั้งสามขนาด (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm..... 75
4.18	ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบกับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 78 nm (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm..... 76
4.19	สนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณจากการตรวจวัดด้วย MFM (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm และสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนด้วย FEM (ง) 92.43 nm (จ) 85.00 nm (ฉ) 78.28 nm ..... 77
4.20	การจำลองการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน (ก) MFM (ข) FEM ..... 78
ค.1	ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบกับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 85 nm (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm..... 94
ค.2	ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบกับ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 92 nm (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm..... 95

## บทที่ 1

### บทนำ

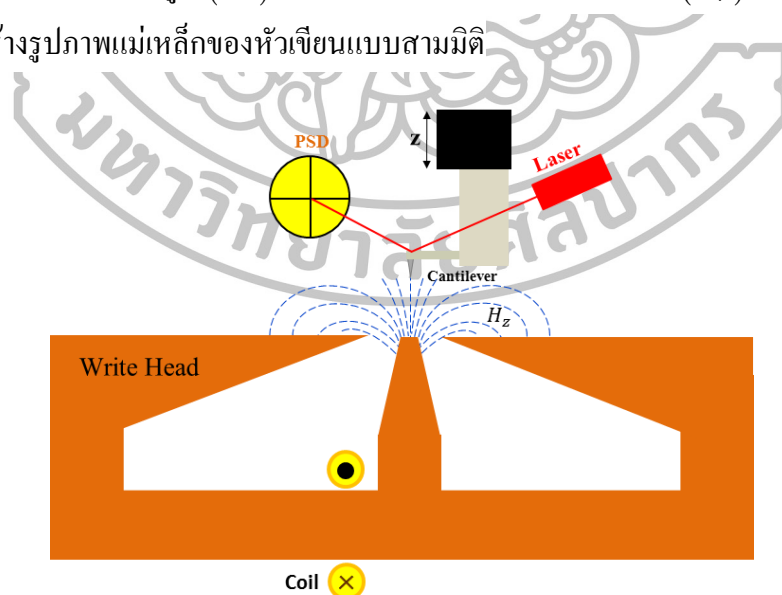
#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษา ค้นคว้า และการทำงานธุรกิจ ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้องค์กรต่างๆ นำเทคโนโลยีเหล่านี้เข้ามาช่วยในการดำเนินงานขององค์กรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive : HDD) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นและสำคัญชิ้นหนึ่งในระบบการทำงานขององค์กร เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บข้อมูลต่างๆ ของคอมพิวเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลระบบปฏิบัติการต่างๆ ที่ใช้ขับเคลื่อนคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆ ข้อมูลในรูปแบบของโปรแกรมประยุกต์ หรือแฟ้มงานต่างๆ ล้วนถูกเก็บรักษาเอาไว้ในฮาร์ดดิสก์

ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก การเพิ่มประสิทธิภาพของการบันทึกข้อมูลจะขึ้นอยู่กับระบบของหัวเขียนแม่เหล็ก การบันทึกข้อมูลในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording : PMR) ซึ่งเริ่มมีการใช้งานในปลายศตวรรษที่ 19 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ชื่อ Valdemar Poulsen [1] ผู้ซึ่งได้รับการยกย่องว่าเป็นผู้คิดค้นวิธีการบันทึกเสียงโดยใช้แม่เหล็กในรูปแบบแนวตั้ง ทำให้เทคโนโลยีดังกล่าวถูกเรียกตามรูปแบบการบันทึกบนจานแผ่นดิสก์ ซึ่งเนื่องจากมีลักษณะการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง ทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีพื้นที่ในการบันทึกข้อมูลเพิ่มมากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในเทคโนโลยีด้านการบันทึกข้อมูล

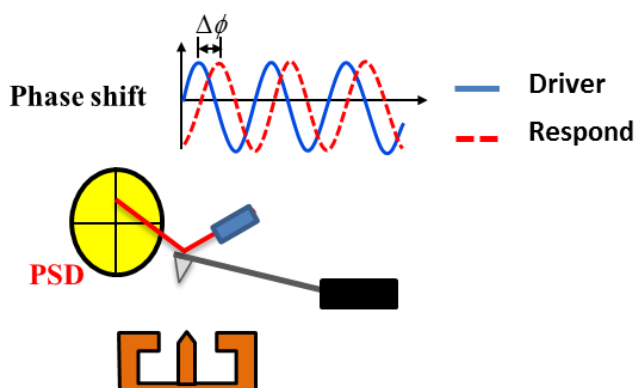
ความสะดวกในการพกพาและความสามารถในการบรรจุข้อมูลเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้หัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงไปด้วย (ในระดับนาโนเมตร) ปัญหาที่ตามมาคือขั้นตอนการตรวจสอบหัวเขียนแม่เหล็กก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ด้วยเหตุที่ว่าหัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จึงทำให้ไม่สามารถนำเครื่องมือวัดความเข้มแม่เหล็กมาวัดได้โดยตรง เนื่องจากความละเอียดในการตรวจวัดไม่สูงพอ

การตรวจสอบหัวเขียนแม่เหล็กจึงทำได้โดยการนำเอากล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy : MFM) มาประยุกต์ใช้ (การตรวจวัดหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแสดงไว้ในรูปที่ 1.1) เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องมือที่สามารถให้ความละเอียดของการตรวจวัดวัตถุแม่เหล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะอาศัยหัววัดแม่เหล็กที่ตอบสนองต่อเกรเดียนต์แรงแม่เหล็ก ( $dF/dz$ ) จากวัตถุที่มากระทำกับหัววัด ซึ่งเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนจะกระทำต่อคานในปริมาณที่ต่างกันไปทำให้หัววัดที่ยึดติดกับคานเกิดการโค้งงอในระดับที่ต่างกันไป ระบบของการตรวจวัดการตอบสนองของคานสามารถทำได้โดยปล่อยลำแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบปลายคานและสะท้อนไปยังเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งหรือเรียกว่าตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคาน (photosensitive detectors : PSD) ดังรูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของคานจะประมวลผลออกมาในรูปการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Delta A$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน ( $\Delta\phi$ ) ซึ่งสามารถนำผลดังกล่าวมาสร้างรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนแบบสามมิติ



รูปที่ 1.1 แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กบนหัวเขียน [2]

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนด้วยการตอบสนองของ หัววัดแม่เหล็กในรูปการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน เนื่องจากการพิจารณาในรูปการเปลี่ยนแปลง เฟสสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของคานได้ชัดเจนมากกว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ผลจาก การเปลี่ยนแปลงเฟสของคานจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กในรูปเกรเดียนท์ของ แรงแม่เหล็กจากหัวเขียน ดังนั้นเราสามารถหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนได้จาก การเปลี่ยนแปลงเฟสคาน ( $\Delta\phi \propto dF / dz \propto d^2H / dz^2$ )



รูปที่ 1.2 การตอบสนองของคานแม่เหล็กเนื่องจากแรงแม่เหล็กของหัวเขียนกระทำต่อคาน ทำให้เฟสของคานเกิดการเปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไปแล้วกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นเครื่องมือที่อยู่ในประเภท กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy : SPM) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ อาศัยแรงปฏิกิริยาระหว่างหัววัดและพื้นผิววัตถุกระทำต่อกัน ดังนั้นในการพิจารณา ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะทำให้ทราบ เพียงว่าความเข้มสนามแม่เหล็กในเชิงคุณภาพเท่านั้น ทำให้ผลการตรวจวัดที่ได้จาก MFM บอกได้เพียงว่าความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในแต่ละตำแหน่งที่ถูกตรวจวัดมี มากหรือน้อยเพียงเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถทราบปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กที่แท้จริงได้ แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีกลุ่มนักวิจัย Y. J. Chen และคณะ [3] ที่สามารถคำนวณหาความเข้มของ สนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณได้โดยใช้การสอบเทียบกับการจำลองหัวเขียนด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) เพื่อประมาณค่าสนามแม่เหล็ก ของวัตถุแม่เหล็ก ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณ โดยใช้การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแบบบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง โดยใช้การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งพิจารณาจากการตอบสนองของคานในรูปการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน ในการทดลองจะพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน เช่น ขนาดกระแสไฟฟ้า ขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก ระดับความสูงของคานที่ตรวจวัด และการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพ
2. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวเขียน ขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก และระดับความสูงของการสแกน
3. เพื่อศึกษากระบวนการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเชิงปริมาณ โดยใช้การสอบเทียบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาขนาดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดของหัวเขียน โดยปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นจะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ในกรณีหัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดแตกต่างกันจะส่งผลทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียน รวมไปถึงการพิจารณาระดับความสูงของการตรวจวัดที่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนที่อยู่ใกล้กันจะทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนที่อยู่ห่างกันออกไป รวมไปถึงการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณจากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่สามารถให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนโดยใช้การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (matrix laboratory : MATLAB) ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลในการทดลองจะใช้หัวเขียนแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติเดียวกัน ซึ่งกำหนดให้หัวเขียนมีขนาดที่แตกต่างกัน 10 ขนาด โดยจะศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ได้แก่ ขนาดกระแสไฟฟ้า ขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก และความสูงของการสแกน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การตรวจวัดหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพได้
2. กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณได้
3. งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสู่การวิจัยในด้านอื่นๆ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

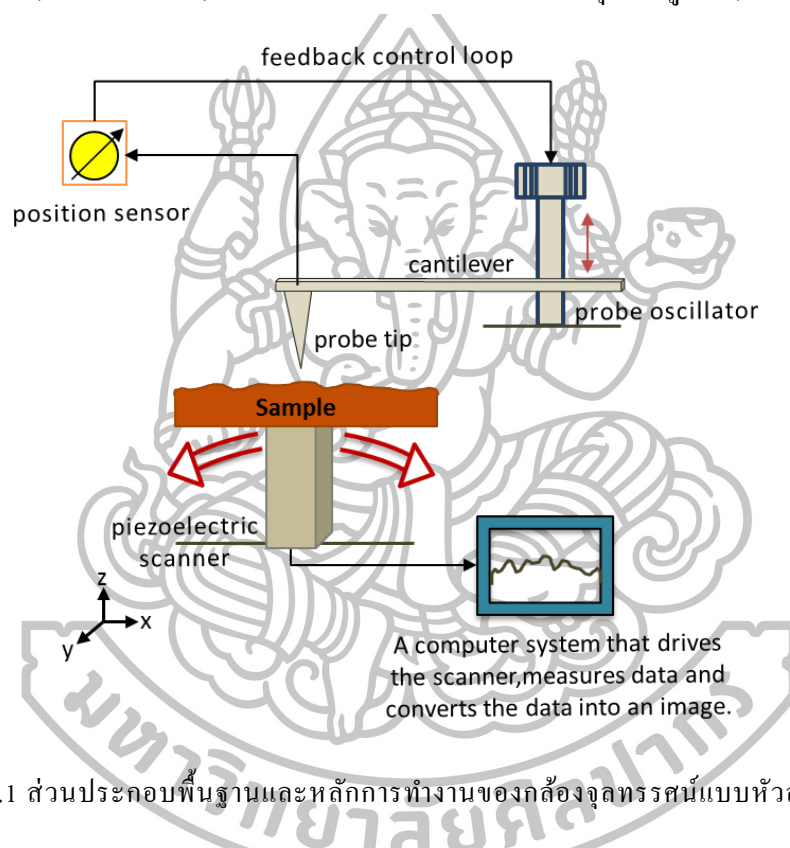
ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน คอมพิวเตอร์มีบทบาทต่อการทำงานเป็นอย่างมาก อุปกรณ์ที่ใช้เก็บหรือบันทึกข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า “ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์” ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญเช่นกัน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ให้มีขนาดเล็กและเบาลงเพื่อความสะดวกในการพกพาแต่ยังคงต้องการให้มีประสิทธิภาพในการบันทึกและบรรจุข้อมูลที่สูงอยู่ อย่างไรก็ตามความพยายามในการลดขนาดฮาร์ดดิสก์ให้เล็กลงส่งผลทำให้ขนาดของหัวเขียนที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อใช้บันทึกข้อมูลมีขนาดเล็กลง ดังนั้นการตรวจสอบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในปัจจุบัน

หัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งปัจจุบันมีขนาดความกว้างประมาณ 60 nm ดังนั้นการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงไม่สามารถทำได้โดยตรง จึงต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ผลิตจากหัวเขียนได้ นั่นคือ “กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก” การทำงานของเครื่องมือประเภทนี้จะอาศัยหลักการการโค้งงอของคานที่ตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กของหัวเขียน โดยแสดงผลออกมาในรูปการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดของคานที่มีความสัมพันธ์กับรูปของเกรเดียนท์แรงแม่เหล็ก (gradient force) ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์เพื่อหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนได้

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้น ซึ่งประกอบไปด้วยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โหมดการตรวจวัดและโหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ปฏิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดและวัตถุแม่เหล็ก องค์ประกอบของหัวเขียนแม่เหล็กและทฤษฎี หลักการการเกิดสนามแม่เหล็กของขดลวด โซลินอยด์ (solenoid) และการเกิดฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) รวมไปถึงงานวิจัยต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก

## 2.1 หลักการทำงานและประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน

กล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (scanning probe microscopy : SPM) [4] ถูกสร้างมาเพื่อใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ในระดับนาโนเมตร โดยเฉพาะและเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย กลุ่มเครื่องมือประเภทนี้ถูกนำมาใช้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายของวัตถุซึ่งให้ผลออกมาในรูปแบบภาพสามมิติ เช่น วัตถุที่พื้นผิวมีสภาพนำไฟฟ้า (surface conductivity) การกระจายของประจุไฟฟ้าสถิต (static charge distribution) แรงเสียดทาน (friction force) สนามแม่เหล็ก และสภาพยืดหยุ่นมอดูลัส (elastic moduli)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน [4]

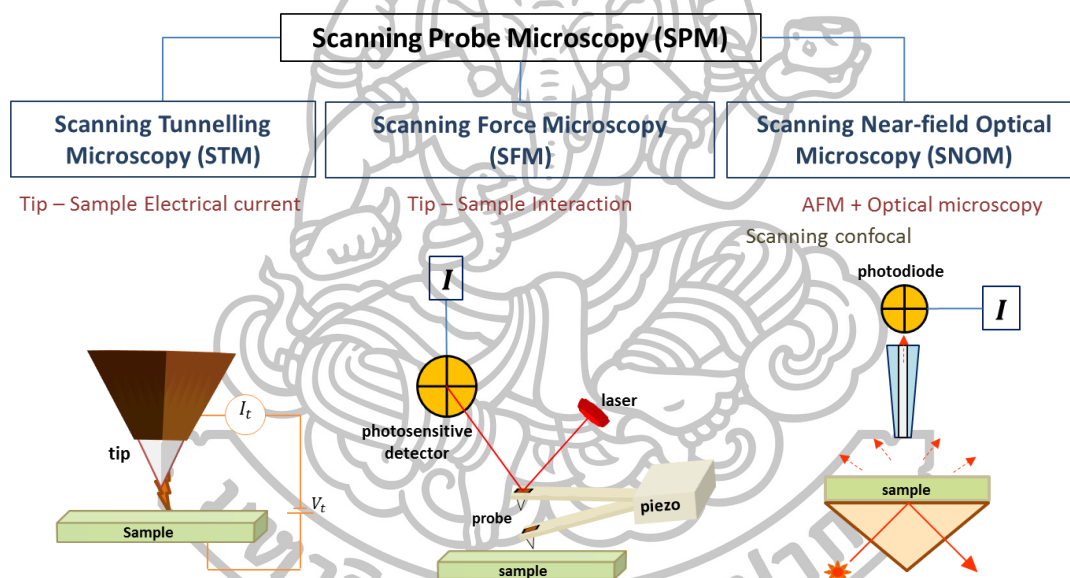
กล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนมีส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ หัววัดปลายแหลม (probe tip) ตัวสแกนเพียโซ (piezoelectric scanner) เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (position sensor) ระบบควบคุมป้อนกลับ (feedback control loop) และอุปกรณ์สั่นหัววัด (probe oscillator) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนจะใช้หัววัดปลายแหลมที่มีขนาดเล็ก ระดับนาโนยึดติดกับปลายคานที่มีความยืดหยุ่น และปลายคานอีกด้านหนึ่งถูกยึดติดกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์สั่นหัววัดเพื่อให้คานเคลื่อนที่ขึ้นลงเหนือวัตถุ ในการตรวจวัดส่วนใหญ่แล้วหัววัดจะเป็นส่วนที่ถูกเคลื่อนที่ โดยวัตถุที่ถูกตรวจวัดถูกวางไว้



บนตัวสแกนเพียโซในตำแหน่งที่คงที่ หัววัดตรวจวัดไปบนพื้นผิววัตถุซึ่งมีแรงกระทำต่อหัววัดทำให้คานเกิดการสั่น และประมวลผลจากการตอบสนองของหัววัดผ่านเซนเซอร์วัดตำแหน่งซึ่งแสดงออกมาเป็นรูปภาพสามมิติบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

เครื่องมือในหมวดของ SPM มีหลากหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน การเลือกนำไปใช้งานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่สนใจศึกษาเป็นหลัก การแบ่งประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทหลัก (ดูรูปที่ 2.2 ประกอบ) ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning tunneling microscopy : STM) [4] กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy: SFM) และกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ (scanning near-field optical microscopy : SNOM) [4]



รูปที่ 2.2 ประเภทของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกนแยกตามคุณสมบัติของหัววัด [5] ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning tunneling microscopy : STM) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy : SFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ (scanning near-field optical microscopy : SNOM)

### 2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning tunneling microscopy: STM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากหลักการทำงานของเครื่องมือประเภทนี้อาศัยการวัดกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิววัตถุที่ทะลุผ่านปลายหัววัดด้วยปรากฏการณ์ทางควอนตัมฟิสิกส์เพื่อประมวลผลออกมาเป็นค่าความสูงต่ำของพื้นผิว

### 2.1.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ (scanning near-field optical microscopy : SNOM)

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนามแสงระยะใกล้ เป็นเครื่องมือที่ผสมผสานระหว่างเทคนิคการวัดแบบกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscopy) [6] โดยใช้หัววัดที่มีลักษณะเป็นใยแก้วนำแสง (optic fiber) ซึ่งสามารถตรวจวัดวัตถุเปล่งแสงที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงได้

### 2.1.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง (scanning force microscopy: SFM)

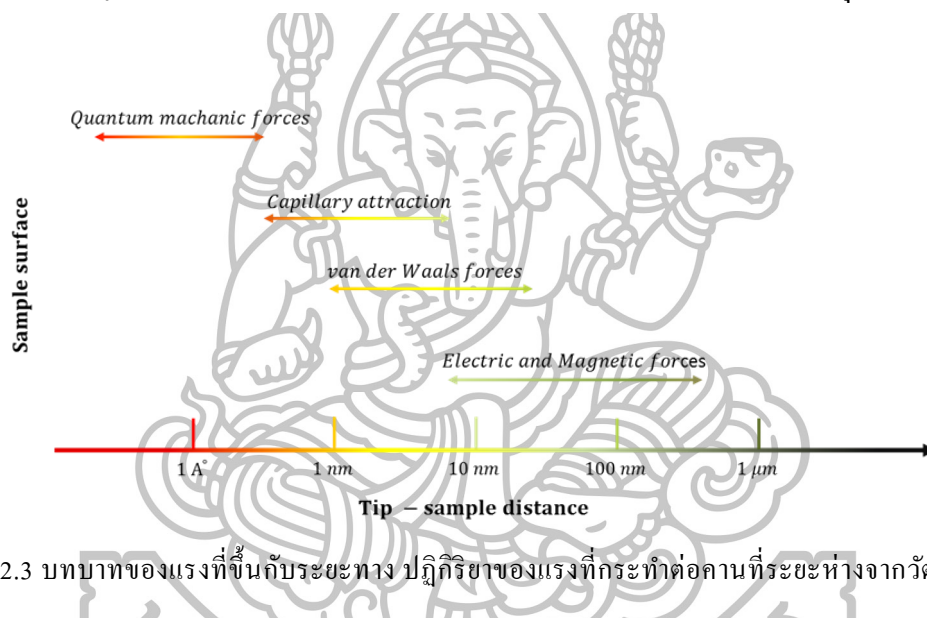
กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง เป็นเครื่องมือที่อาศัยแรงระหว่างหัววัดและวัตถุที่ทำปฏิกิริยาต่อกัน โดยสามารถตรวจวัดได้ทั้งวัตถุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือไม่นำไฟฟ้าทำให้เครื่องมือนี้เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย เครื่องมือที่อยู่ในประเภทนี้ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy : AFM) เป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนามาจาก STM การทำงานของเครื่องมือนี้จะอาศัยแรงอะตอมระหว่างหัววัดและพื้นผิววัตถุทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลัก (attractive/repulsive force) ส่งผลให้คานเกิดการโค้งงอ เครื่องมืออีกประเภทหนึ่งที่อยู่กันอย่างแพร่หลายในด้านการศึกษาวัตถุแม่เหล็กระดับนาโนเมตร นั่นคือ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เป็นเครื่องมือที่อาศัยอันตรกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดและวัตถุที่ทำให้คานเกิดการโค้งงอ การประมวลผลเพื่อสร้างรูปภาพพื้นผิวของวัตถุของเครื่องมือทั้งสองประเภทนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนคานและสะท้อนไปยังตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคาน (photosensitive detectors : PSD) เพื่อวัดตำแหน่งและแปลงค่าออกมาเป็นรูปภาพพื้นผิววัตถุ

ในกรณีของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงสามารถตรวจวัดกับวัตถุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น วัตถุที่สามารถนำไฟฟ้า วัตถุเป็นฉนวน รวมไปถึงวัตถุที่มีความเป็นแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงเพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องมือดังกล่าว

## 2.2 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงอาศัยอันตรกิริยาระหว่างหัววัดและพื้นผิววัตถุกระทำต่อกัน ซึ่งแรงดังกล่าวมีหลากหลายประเภท เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) แรงคาพิลลารี (capillary forces) แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic forces) แรงอะตอม (atomic forces) แรงแม่เหล็กสถิต (magnetostatic forces) เป็นต้น และการตรวจวัดวัตถุในบางกรณีอาจมีแรงหลายประเภทที่กระทำต่อหัววัดพร้อมกัน ซึ่งกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุหรืออาจเป็นเพราะคุณสมบัติของหัววัดที่ส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยานั้นๆ ความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างหัววัดและพื้นผิววัตถุแสดงดังรูปที่

### 2.3

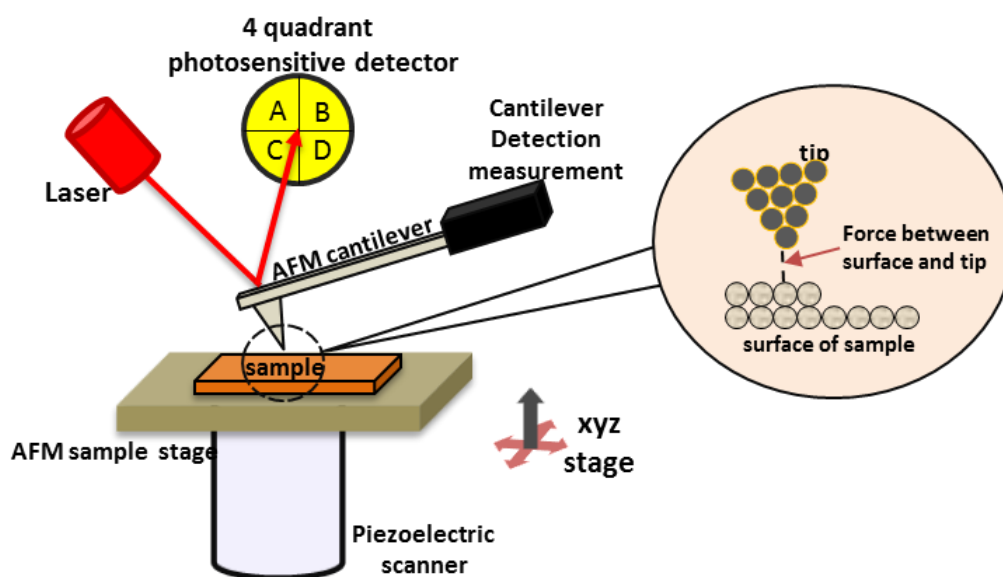


รูปที่ 2.3 บทบาทของแรงที่ขึ้นกับระยะทาง ปฏิกริยาของแรงที่กระทำต่อคานที่ระยะห่างจากวัตถุ [7]

ปฏิกริยาของแรงขึ้นกับระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุดังรูปที่ 2.3 ในกรณีที่ระยะห่างของหัววัดอยู่ในช่วงใกล้ๆ กับวัตถุ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแรงควอนตัม (quantum forces) ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม หัววัดที่เข้าใกล้วัตถุมากๆ จะมีผลกระทบของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจากแรงคาพิลลารี แต่แรงที่ทำให้คานเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยการสั่นจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์เพื่อใช้สร้างรูปภาพพื้นผิวของวัตถุ แรงประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อวัตถุทั้งสองอยู่ห่างกันประมาณ 2-3 nm ในกรณีที่ต้องการแยกแรงแม่เหล็กสถิตออกจากแรงไฟฟ้าสถิตจำเป็นต้องกำหนดระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุอยู่ในช่วง 10 nm จนถึง 100 nm โดยประมาณ ซึ่งการตรวจวัดแรงแม่เหล็กในช่วงระยะดังกล่าวสามารถตรวจวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

### 2.2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพพื้นผิววัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน ซึ่งลักษณะการทำงานของ AFM แสดงดังรูปที่ 2.4 หัววัดขนาดจิ๋วที่ถูกติดกับคานตรวจวัด ไปบนวัตถุที่ถูกวางอยู่กับที่บนเพียโซอิเล็กทริก คานถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณที่มีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ธรรมชาติของคาน (เพื่อใช้เป็นความถี่อ้างอิงในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำก่อนการตรวจวัดบนวัตถุ) เมื่อคานสแกนไปบนวัตถุด้วยการแตะบนพื้นผิววัตถุขึ้นลง แรงจากวัตถุจะกระทำต่อคานทำให้การสั่นของคานเปลี่ยนไป การวัดการตอบสนองของคานที่เปลี่ยนไป อาศัยลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนปลายคาน (ที่ถูกยึดติดกับหัววัด) สะท้อนไปยัง PSD เพื่อพิจารณาการสั่นของคานที่เปลี่ยนไป ในรูปสัญญาณของแอมพลิจูดและเฟสของคานที่เปลี่ยนแปลง สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจะนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ในลักษณะรูปภาพ 2 มิติ หรือ 3 มิติ วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถทราบความสูง-ต่ำของพื้นผิวได้โดยอาศัยแรงอะตอม

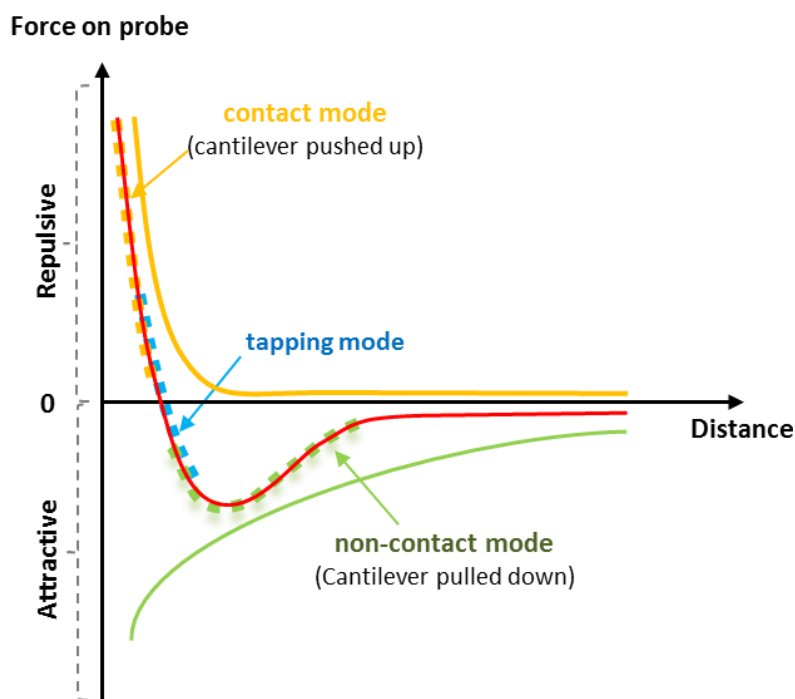


รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม [8]

แรงที่กระทำต่อหัววัดมี 2 ประเภทคือแรงดูดและแรงผลัก การเกิดแรงทั้งสองจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุตั้งเส้นกราฟสีแดง (ดูรูปที่ 2.5 ประกอบ) กรณีที่หัววัดอยู่ห่างพื้นผิววัตถุเพียงเล็กน้อยประมาณ  $1 - 2 \text{ \AA}$  อันตรกิริยาที่เกิดเป็นแรงผลัก (เส้นสีส้ม) ซึ่งระยะของการตรวจวัดอยู่ในบริเวณจุดสีส้ม เรียกโหมดการตรวจวัดนี้ว่า โหมดสัมผัส (contact mode) ในทางตรงกันข้ามเมื่อระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุอยู่

ไกลออกไปในช่วงระยะทางประมาณ  $10 - 100 \text{ \AA}$  อันตรกิริยาที่เกิดเป็นแรงดูด (เส้นสีเขียว) การตรวจวัดในช่วงระยะห่างนี้แสดงดังจุดสีเขียวเรียกว่า โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode) ดังนั้นแรงระหว่างอะตอมทั้งสองประเภทที่กล่าวมาส่งผลทำให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นรูปภาพพื้นผิวที่มีความสอดคล้องกับสภาพของพื้นผิวของวัตถุจริง (สำหรับโหมดการตรวจวัดจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4)

### Force respond curve



รูปที่ 2.5 กราฟของแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุที่แตกต่างกัน [9]

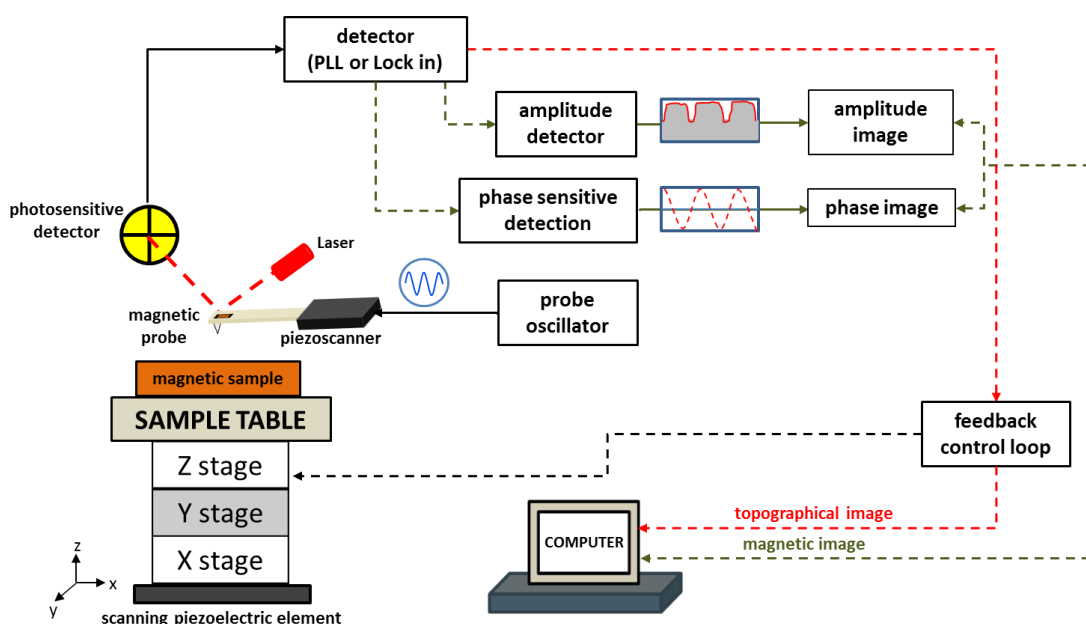
#### 2.2.2 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

หลังจากการประดิษฐ์ AFM ได้มีการพัฒนาเครื่องมือเพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดโดยการเคลือบสารแม่เหล็กบนหัววัดเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อวัตถุแม่เหล็ก และเรียกเครื่องมือที่ถูกพัฒนานี้ว่า กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เครื่องมือนี้ถูกสร้างขึ้นในปี 1987 โดยนักวิทยาศาสตร์สองท่าน ได้แก่ Martin และ Wickramasinghe [10] ซึ่งเป็นผู้ที่ได้นำเอา MFM มาศึกษารูปภาพแม่เหล็กด้วยการวัดแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัดและวัตถุแม่เหล็กขนาดเล็ก ทำให้เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันอย่างมากมาย

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างรูปภาพแม่เหล็ก ซึ่งถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีด้านการบันทึกทางแม่เหล็ก วัสดุศาสตร์ และ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคุณสมบัติของเครื่องมือที่มีความพิเศษเฉพาะตัวที่อาศัย หลักการการ โค้งงอตามแรงดูดหรือแรงผลักของหัววัดแม่เหล็กขนาดจิ๋ว ทำให้สามารถ ตรวจวัดวัตถุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กได้

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอมแต่แตกต่างกันที่การตอบสนองของหัววัด เนื่องจากหัววัดของ MFM ถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเพื่อทำให้มีคุณสมบัติในการตอบสนองวัตถุแม่เหล็ก การทำงานของ MFM แสดงดังรูปที่ 2.6 คานที่ยึดติดกับหัววัดถูกป้อนสัญญาณความถี่ ค่าหนึ่งโดยกำหนดให้คานสั้นที่มีความถี่ธรรมชาติ เมื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจวัด วัตถุแม่เหล็ก การตรวจวัดจะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน เนื่องจากการตรวจวัดด้วย MFM ต้องการวัดเพียงแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัด ดังนั้นการสแกนจึงใช้โหมด การตรวจวัดแบบโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode) (กล่าวไว้ในหัวข้อ ที่ 2.4.4) การตรวจวัดถูกแบ่งการสแกนออกสองครั้ง โดยการสแกนครั้งแรก หัววัดสแกน ไปบนวัตถุเพื่อต้องการทราบลักษณะพื้นผิวของวัตถุด้วยการสร้างรูปภาพพื้นผิว (topographical image) และนำเอาระดับของพื้นผิวที่ตรวจวัดได้มาใช้เป็นระดับอ้างอิงใน การสแกนครั้งที่สอง ซึ่งกำหนดให้หัววัดตรวจวัดบนวัตถุแม่เหล็กที่ความสูงคงที่ค่าหนึ่ง (เป็นระดับความสูงที่มีเพียงแรงแม่เหล็กกระทำต่อหัววัด) ทำให้หัววัดแม่เหล็ก ตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กเท่านั้น สนามแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากวัตถุจะทำให้คาน เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยการสั่น ทำให้ลำแสงเลเซอร์สะท้อนไปยัง PSD เปลี่ยนตำแหน่ง สัญญาณของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลง ของสัญญาณดังกล่าวจะประมวลผลผ่านวงจรมอดูเฟสล็อก (phase-lock loop : PLL) และให้ผลออกมาในรูปการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูด

การสร้างรูปภาพแม่เหล็ก (magnetic image) จะนำสัญญาณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณก่อนการตรวจวัด ทำให้สามารถสร้างรูปภาพแม่เหล็ก จากการตรวจวัดด้วยกล้อง จุลทรรศน์แรงแม่เหล็กตามการตอบสนองของหัววัดต่อสนามแม่เหล็กของวัตถุ สำหรับหน้าที่ และส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้อธิบายไว้อย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป



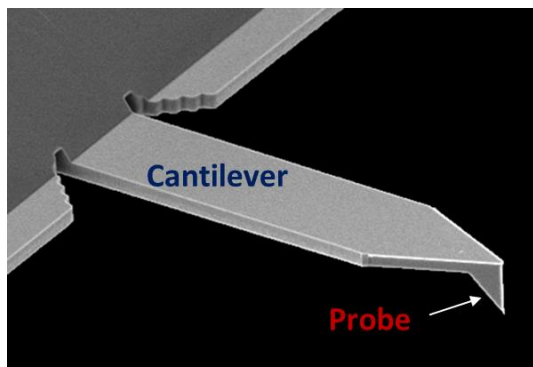
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก [11]

### 2.2.2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่สำคัญ 5 ส่วน ได้แก่ 1. หัววัดแม่เหล็ก (magnetic probe) 2. ตัวสแกนเพียโซ (piezoscanner) 3. ตัวตรวจจับความไวแสง (photosensitive detectors : PSD) 4. ระบบการสั่นของคาน (probe oscillator หรือ piezoelectric bimorph) 5. ตัวป้อนกลับระบบคาน (feedback control loop) ซึ่งแต่ละส่วนมีหน้าที่แตกต่างกันไปดังนี้

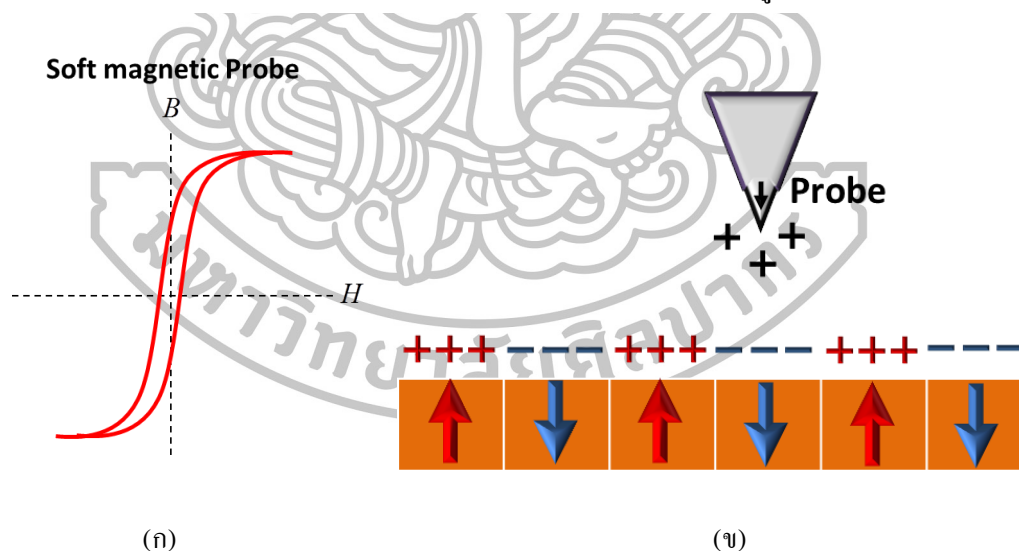
#### 2.2.2.1.1 หัววัดแม่เหล็ก (magnetic probe)

หัววัดแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดแรงแม่เหล็ก หัววัดจะยึดติดกับปลายคานที่มียืดหยุ่นเพื่อรองรับอันตรกิริยาทางแม่เหล็กจากวัตถุตั้งรูปที่ 2.7 ลักษณะของหัววัดมีรูปเป็นทรงพีระมิด รัศมีความโค้งที่ปลายหัววัดอยู่ในช่วง 2 - 3 nm จนถึงขนาด 10 nm [12] หัววัดถูกเคลือบด้วยด้วยนิกเกิล (Nickel : Ni) [12] เพื่อให้มีความเป็นแม่เหล็กและสามารถตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กได้



รูปที่ 2.7 หัววัดแม่เหล็ก [13]

คุณสมบัติของหัววัดแม่เหล็กที่ถูกเคลือบด้วยซิลิคอนซึ่งเป็นสารแม่เหล็กประเภทแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic material) ที่มีค่าฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ที่แคบ ดังรูปที่ 2.8(ก) ทำให้หัววัดเกิดสถานะแม่เหล็กหรือหมดสถานะแม่เหล็กได้ง่าย คุณสมบัติของสารแม่เหล็กดังกล่าวทำให้แมกนีไทเซชัน (magnetization) ของหัววัดเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามปริมาณของแรงแม่เหล็กที่ออกจากวัตถุได้ง่ายดังรูปที่ 2.8(ข) ซึ่งทำให้หัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถนำมาตรวัดสนามแม่เหล็กของวัตถุที่มีความเป็นแม่เหล็กได้ โดยความละเอียดของการตรวจวัดของหัวเขียนแม่เหล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร

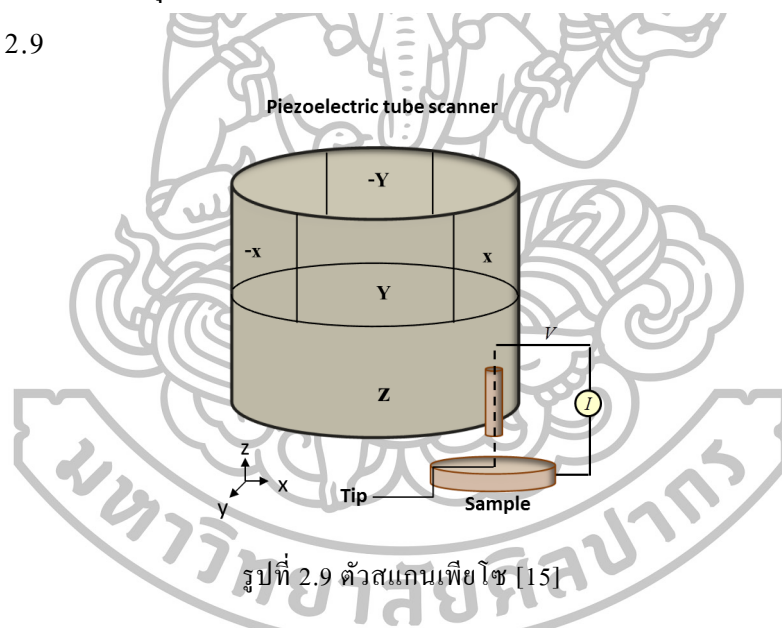


รูปที่ 2.8 (ก) กราฟฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กประเภทแม่เหล็กอ่อน (ข) หัววัดสแกนบนวัตถุแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าหรือออกจากวัตถุทำให้เกิดปฏิกิริยาทางแม่เหล็กกับหัววัด ส่งผลให้แมกนีไทเซชันของหัววัดเปลี่ยนแปลงทิศทาง [14]



### 2.2.2.1.2 ตัวสแกนเพียโซ (piezoscanner)

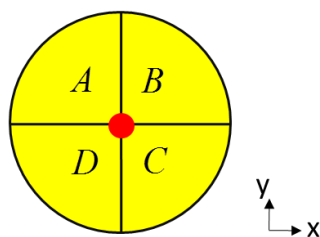
เพียโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงอื่นๆ โดยการเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซ (piezoelectric effect) หรือในทางกลับกัน เมื่อเพียโซได้รับพลังงานไฟฟ้าจะสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ เรียกว่า ปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (inverse piezoelectric effect) เนื่องจากการคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนสภาพพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลกลับไปมา จึงได้นำเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งานกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเพื่อใช้ในการเลื่อนหรือสั่นวัตถุด้วยการให้พลังงานไฟฟ้า โดยทิศทางของการเคลื่อนที่ของตัวสแกนเพียโซประกอบด้วย 3 แนว คือแนวแกน x y และ z โดยการเคลื่อนที่ของแกน x แกน y จะอยู่ในแนวระนาบกับวัตถุแม่เหล็ก และแกน z จะเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ ดังรูปที่ 2.9



### 2.2.2.1.3 ตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคานหรือตัวตรวจจับความไวแสง (photosensitive detectors : PSD)

ตัวตรวจจับความไวแสง (photosensitive detectors : PSD) เป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการบอกตำแหน่งโดยอาศัยลำแสงเลเซอร์ที่การตกกระทบบนหน้าจอบนหน้าจอบที่ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังรูปที่ 2.10 โดยแต่ละส่วนจะถูกแบ่งออกเป็นตำแหน่งเล็กๆ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนหน้าจอบ PSD จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าภายในวงจร โดยอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PSD จะบ่งบอกถึงตำแหน่งลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ ซึ่งจะทำให้สามารถทราบแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดมากน้อยเพียงใด

Photosensitive detectors



รูปที่ 2.10 ตัวตรวจจับความไวแสง

$$X_{position} = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} \quad (2.1)$$

$$Y_{position} = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $A$   $B$   $C$  และ  $D$  คือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของ PSD

#### 2.2.2.1.4 ระบบการสั่นของคาน (probe oscillator หรือ piezoelectric bimorph)

คานแม่เหล็กจะถูกป้อนความถี่เรโซแนนซ์เพื่อให้คานเกิดการสั่น ซึ่งการตรวจวัดด้วยโหมดการสั่นของคานจะใช้เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (lock-in amplifier) มาตรวจวัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากๆ ในระดับนาโนโวลต์ หลักการทำงานจะพิจารณาสัญญาณอินพุต (input signal :  $V_{input}$ ) ที่ได้จากการสั่นของคานเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ และสัญญาณอ้างอิง (reference signal :  $V_{ref}$ ) ที่ได้จากการกระตุ้นให้คานสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ขณะที่ยังไม่มีแรงอื่นมากระทำ) สัญญาณทั้งสองจะอยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PSD โดยสัญญาณที่ความถี่อื่นๆ ที่ต่ำกว่าความถี่ที่ป้อนให้แก่คานจะถูกตัดออกด้วยวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (low pass filter) ทำให้ไม่มีผลต่อการตรวจวัด ดังนั้นการตอบสนองของคานจะพิจารณาการสั่นของคานจะที่ตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  ที่ทำให้คานสั่นเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์เริ่มต้นของคานด้วยการคูณสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงที่ได้จาก PSD ดังรูปที่ 2.11 [16]

$$\text{สัญญาณอินพุต} : V_{input} = A_{osc} \cdot \sin(\omega t + \Delta\phi) \quad (2.3)$$

$$\text{สัญญาณอ้างอิง} : V_{ref} = A_{exc} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

ดังนั้น

$$x = V_{input} \cdot V_{ref} = [A_{osc} \cdot \sin(\omega t + \Delta\phi)] \cdot [A_{exc} \cdot \sin(\omega t)] = \dots$$

$$\dots = \frac{A_{osc} \cdot A_{exc}}{2} \cdot \cos(\Delta\phi) - \frac{A_{osc} \cdot A_{exc}}{2} \cdot \cos(2\omega t + \Delta\phi) \quad (2.5)$$

จากสมการ 2.5 จะใช้ตรีโกณมิติมาช่วยแก้สมการ ซึ่งทั้งสองเทอมจะมีแอมพลิจูดการสั่น ( $A_{osc}$ ) และผลต่างของเฟสที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta\phi$ ) ค่าดังกล่าวจะถูกแยกออกมาโดยผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำทำให้เทอมที่สองถูกลดทอน

$$x = \frac{A_{osc} \cdot A_{exc}}{2} \cdot \cos(\Delta\phi) \quad (2.6)$$

เมื่อสัญญาณถูกเลื่อนไป  $\pi/2$  จากสัญญาณอ้างอิง

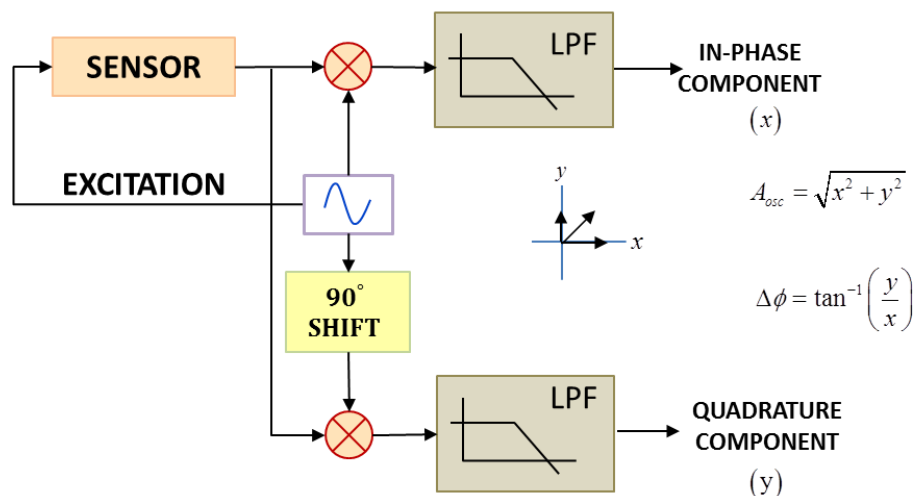
$$y = V_{input} \cdot V_{ref}^{90^\circ} = [A_{osc} \cdot \sin(\omega t + \Delta\phi)] \cdot [A_{exc} \cdot \cos(\omega t)]$$

$$= \dots = \frac{A_{osc} \cdot A_{exc}}{2} \cdot \sin(\Delta\phi) \quad (2.7)$$

วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำจะแยกสัญญาณความถี่ที่ต้องการออกจากสัญญาณอื่นๆ ดังนั้นแอมพลิจูดการสั่นและผลต่างของเฟสของคานาที่เปลี่ยนแปลงจะสามารถเขียนในรูปแบบอย่างง่ายดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

$$A_{osc} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.8)$$

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.9)$$

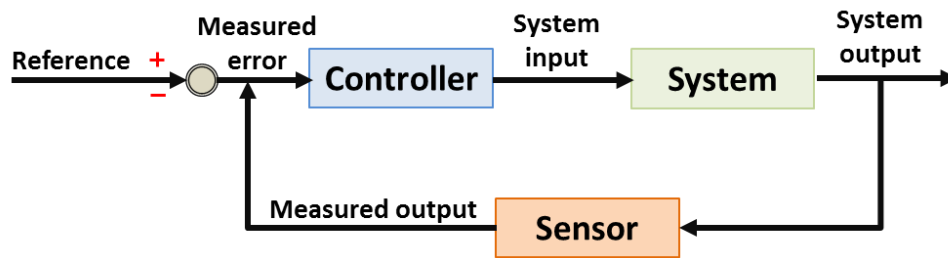


รูปที่ 2.11 แผนผังหลักการทำงานของระบบการล็อกของคาน [17]

วิธีการดังกล่าวเป็นการอธิบายการล็อกของคาน สัญญาณของคานที่เข้าใกล้ สัญญาณอ้างอิงจะถูกตรวจวัดด้วยวงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งจะกรองให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของคานผ่านไป

#### 2.2.2.1.5 ตัวป้อนกลับระบบคาน (feedback control loop)

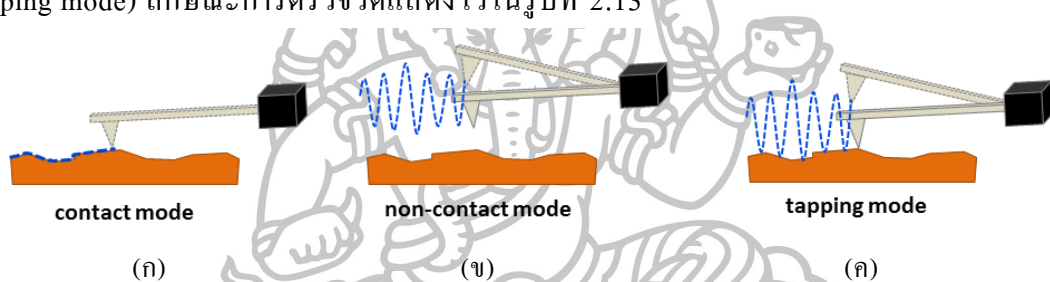
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับเป็นการส่งสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับ สัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณที่ป้อนให้แก่คาน ทำให้ทราบค่าคาดเคลื่อนเพื่อส่งไปแก้ไข ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตให้น้อยลง ซึ่งจะใช้วงจรเฟสล็อกดังรูปที่ 2.12 เป็นตัวควบคุมระบบการล็อกของคานด้วยการควบคุมความถี่ โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟส ของความถี่ทางด้านเอาต์พุตกับเฟสของความถี่อ้างอิง ในกรณีที่ PLL ถูกนำมาเปรียบเทียบกับระบบการล็อกของคานจะพิจารณาในรูปของสัญญาณเฟสซ้ำคาบ (periodic signal) ซึ่งเกิดจากการล็อกด้วยความถี่ภายในระบบของคาน โดยการป้อนกลับของระบบจะทำได้โดยการปรับเฟสที่เปลี่ยนแปลงให้มีค่าเฟสเท่ากับ  $90^\circ$  ทำให้คานถูกล็อกด้วยความถี่เริ่มต้นอีกครั้ง (ความถี่เรโซแนนซ์) ซึ่งระบบดังกล่าวเรียกว่า วงจรป้อนกลับ (feedback loop) ระบบการทำงานในส่วนนี้จะทำให้คานแม่เหล็กกลับมาสั่นที่ความถี่เดิมก่อนการ เริ่มต้นวัดข้อมูลในตำแหน่งถัดไป



รูปที่ 2.12 วงจรเฟสล็อกคูลูป (phase-lock loop : PLL) [18]

### 2.2.2.2 โหมดการตรวจวัด

การศึกษารูปภาพพื้นผิววัตถุสามารถใช้รูปแบบการตรวจวัดได้หลากหลาย ซึ่งได้แก่ โหมดสัมผัส (contact mode) โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode) และโหมดกึ่งสัมผัส (tapping mode) ลักษณะการตรวจวัดแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โหมดการตรวจวัดบนชิ้นงานทั้งสามแบบ [19] (ก) การสแกนแบบสัมผัส (contact mode) (ข) การสแกนแบบไม่สัมผัส (non-contact mode) และ (ค) การสแกนแบบกึ่งสัมผัส (tapping mode)

#### 2.2.2.2.1 โหมดสัมผัส (contact mode)

โหมดสัมผัสเป็นโหมดการตรวจวัดที่หัววัดลากไปบนพื้นผิววัตถุอย่างเบาด้วยระยะห่างของหัววัดที่ใกล้กับวัตถุมาก (ประมาณ  $1 - 2 \text{ \AA}$ ) ดังรูปที่ 2.13(ก) ซึ่งอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดและพื้นผิวจะเป็นแรงผลักระหว่างอะตอม คานจะเกิดการโค้งงอไปตามรูปทรงของพื้นผิววัตถุ แต่การใช้วิธีการตรวจวัดวัตถุด้วยโหมดนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายทั้งหัววัดและวัตถุที่ถูกรววจวัดได้ง่าย

#### 2.2.2.2.2 โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)

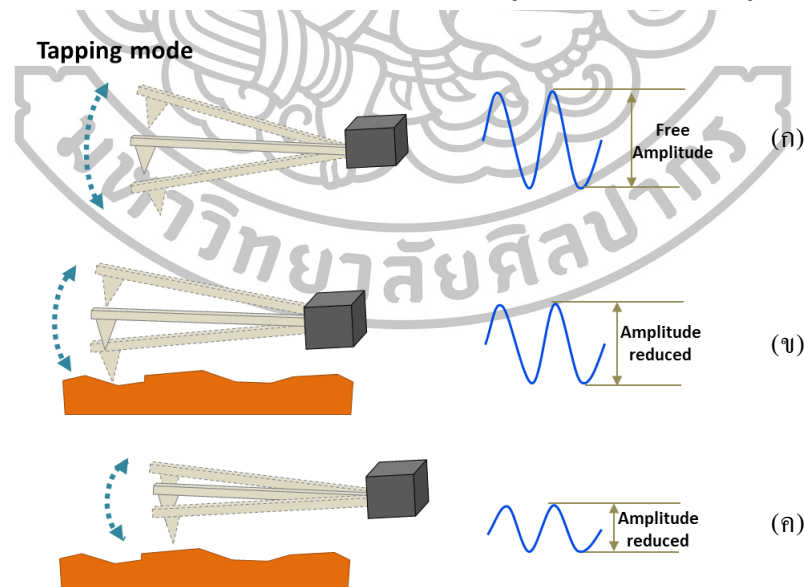
การตรวจวัดสภาพพื้นผิวในโหมดไม่สัมผัสถูกพัฒนามาจากโหมดสัมผัสเพื่อรักษาสภาพของหัววัดและผิวของวัตถุไม่ให้เสียหาย ลักษณะการตรวจวัดจะกำหนดให้คานแกว่งขึ้นลงเหนือวัตถุโดยไม่สัมผัสกับพื้นผิวดังรูปที่ 2.13(ข) ระดับความสูงของหัววัดถูกกำหนดให้มีระยะห่างจากวัตถุค่าหนึ่งซึ่งอยู่ในระยะของแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ส่งผลให้เกิด

แรงคู่ระหว่างอะตอม แต่ข้อเสียในการเลือกใช้การตรวจวัดวัตถุในโหมดนี้คือความละเอียดของภาพ เนื่องจากแรงคู่ประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับหัววัดจะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลึกทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดลดลง

### 2.2.2.2.3 โหมดกึ่งสัมผัส (tapping mode)

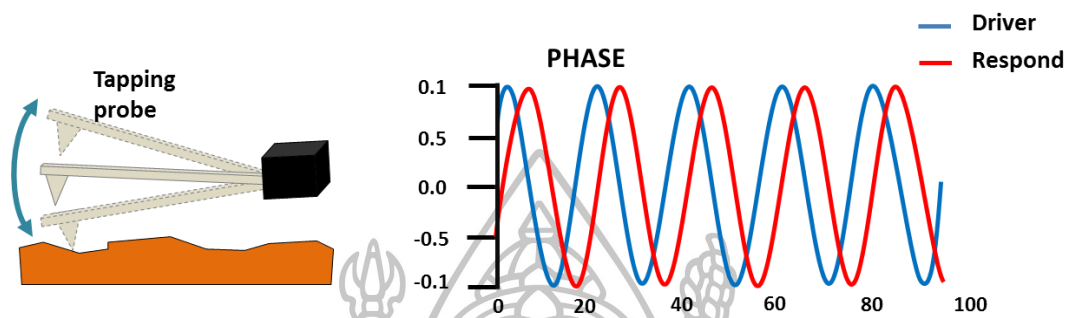
เทคนิคนี้ได้รวมการตรวจวัดสภาพพื้นผิวทั้งในแบบสัมผัสและแบบไม่สัมผัสเข้าด้วยกัน หัววัดจะแกว่งขึ้นลงโดยปลายหัววัดสัมผัสกับพื้นผิววัตถุพร้อมกับแตะไปบนพื้นผิวเป็นระยะ ดังรูปที่ 2.13(ค) การตรวจวัดในโหมดนี้ยังอยู่ในระยะของแรงแวนเดอร์วาลส์ ข้อดีของโหมดการตรวจวัดนี้คือ ช่วยลดการเสียหายของหัววัดและวัตถุ เนื่องจากไม่มีแรงอื่น (แรงเสียดทาน หรือแรงเนื่องจากการลากหัววัด) มากระทำต่อหัววัดจึงทำให้วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการตรวจวัด โดยทั่วไปแล้วจะใช้โหมดการตรวจวัดแบบโหมดกึ่งสัมผัสสำหรับวัตถุที่มีพื้นที่มาก ๆ

การพิจารณาการตอบสนองของคานเนื่องจากการตรวจวัดในโหมดกึ่งสัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.14(ก) การสั่นของคานในกรณีเริ่มต้นที่ยังไม่ตรวจวัดบนวัตถุ ในกรณีที่หัววัดแตะบนพื้นผิวที่มีความลึกลับจะทำให้พื้นที่การสั่นของคานเพิ่มขึ้นส่งผลให้แอมพลิจูดมีค่าใกล้เคียงค่าแอมพลิจูดก่อนเริ่มต้นการวัดดังรูปที่ 2.13(ข) และในกรณีที่หัววัดแตะบนพื้นผิวที่มีลักษณะนูนสูงจะทำให้คานมีพื้นที่ในการสั่นลดลงทำให้แอมพลิจูดของคานลดลงดังรูปที่ 2.14(ค)



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดเนื่องจากการสั่นของคาน [20] (ก) ขนาดของแอมพลิจูดเริ่มต้นจากการป้อนความถี่เรโซแนนซ์ให้แก่คาน (ข) การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เมื่อตรวจวัดบนผิวงานที่มีลักษณะลึกลับ (ค) การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่ลดลงเมื่อตรวจวัดบนผิวงานที่มีลักษณะนูนสูง

นอกจากนี้การตรวจวัดแบบ tapping mode ยังสามารถวิเคราะห์ในรูปภาพเฟส (phase image) ได้ด้วย ซึ่งอาศัยการสั้นของคานที่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุด้วยการแกว่งขึ้นลง ทำให้คานเกิดการหน่วง ส่งผลให้สัญญาณเฟสที่ได้จากการตอบสนองของคานเกิดการเคลื่อนเฟสดังรูปที่ 2.15

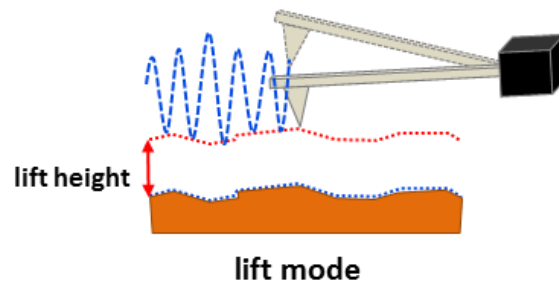


รูปที่ 2.15 เฟสของคานที่ป้อนความถี่เรโซแนนซ์ให้แก่คาน (สีน้ำเงิน) และการเปลี่ยนแปลงเฟสเมื่อคานตอบสนองต่อแรงจากวัตถุ (สีแดง) ด้วยการตรวจวัดแบบ tapping mode [21]

การตรวจวัดทั้งสามรูปแบบที่กล่าวมานิยมใช้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ในกรณีที่ต้องการตรวจวัดวัตถุที่มีความเป็นแม่เหล็กไม่สามารถตรวจวัดด้วยโหมดการตรวจวัดทั้งสามโหมด เนื่องจากมีแรงแวนเดอร์วาลส์มารบกวนทำให้ผลของการวัดแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อวัตถุมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการวัดแบบใหม่ ซึ่งเรียกว่า โหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode) เพื่อตรวจวัดอันตรกิริยาทางแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดเท่านั้น โดยกำหนดให้คานอยู่ห่างจากวัตถุแม่เหล็กที่ความสูงระดับหนึ่งที่สามารถแยกแรงแม่เหล็กออกจากแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงอื่นๆ เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้กับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเพื่อสร้างรูปภาพแม่เหล็ก

#### 2.2.2.2.4 โหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode)

การตรวจวัดในโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่แสดงดังรูปที่ 2.16 การตรวจวัดจะใช้เทคนิคการสแกนสองครั้งเพื่อแยกแรงแม่เหล็กออกจากแรงไฟฟ้า โดยหัววัดจะตะไปบนผิววัตถุเพื่อสร้างรูปภาพพื้นผิวพร้อมกับบันทึกระดับความสูงของผิววัตถุในครั้งแรกของการสแกน จากนั้นหัววัดยกขึ้นเหนือวัตถุประมาณ  $\geq 10$  nm โดยกำหนดให้ความสูงนี้เป็นค่าคงที่การสแกนในครั้งที่สอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะวัดเฉพาะแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อคานเท่านั้น ขณะการสแกนครั้งที่สอง การตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กของคานจะทำให้ความถี่และเฟสของคานเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของคานดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นรูปภาพแม่เหล็กได้

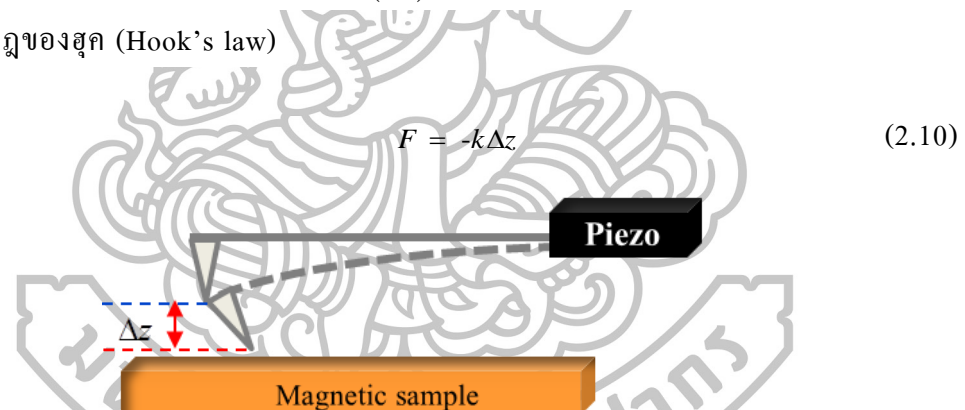


รูปที่ 2.16 การสแกนแบบโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode) [22]

### 2.2.2.3 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

#### 2.2.2.3.1 โหมดคงที่ (static mode : DC)

เนื่องจากคุณสมบัติของคานที่ทำตัวเป็นเหมือนสปริงเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กที่มากกระทำด้วยการสั่นขึ้นลงในแนวตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ เนื่องจากคานมีความยืดหยุ่นจะกำหนดให้ค่า  $k$  เป็นค่าคงที่ของสปริง โดยแรง ( $F$ ) คือปริมาณที่คานสามารถตรวจวัดได้จากระยะของคานที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta z$ ) ดังรูปที่ 2.17 การตอบสนองของคานสามารถอธิบายด้วยกฎของฮุก (Hook's law)



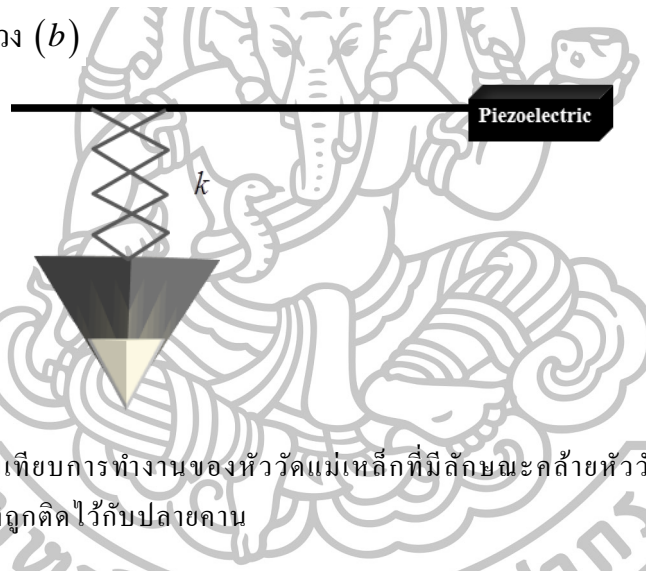
รูปที่ 2.17 การสั่นของคานเมื่อมีแรงแม่เหล็กมากกระทำ โดยคานจะไปบนพื้นผิววัตถุ ซึ่งเส้นทึบของคานบ่งบอกถึงตำแหน่งของคานเริ่มต้นการวัด และเส้นประของคานบ่งบอกถึงแรงแม่เหล็กของวัตถุที่กระทำต่อหัววัดทำให้คานเกิดการโค้งงอ [23]

การทำงานของคานในโหมดนี้เหมาะกับการศึกษาวัตถุที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิต (static field) ซึ่งหัววัดจะตอบสนองต่อวัตถุที่มีสนามแม่เหล็กที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สำหรับกรณีที่หัววัดตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (dynamic field) จะเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode : AC)



### 2.2.2.3.2 โหมดไดนามิกส์ (dynamic mode : AC)

การตรวจวัดด้วยโหมดไดนามิกส์จะพิจารณาในรูปแบบการสั่นของคานที่ถูกยึดติดกับหัววัดแม่เหล็กดังรูปที่ 2.18 ซึ่งแรงแม่เหล็กของวัตถุที่กระทำต่อหัววัดจะทำให้คานเกิดการสั่นขึ้นลงในแนวแกน  $z$  ในการตรวจวัดในโหมดนี้จะพิจารณาแรงที่กระทำต่อหัววัดให้ง่ายขึ้นโดยสมมติว่าหัววัดแม่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นเม็ดมวล (point mass) [24] ซึ่งเป็นการประมาณว่าหัววัดมีขนาดเล็กมากจนเป็นจุดจึงพิจารณาว่าไม่มีแรงภายในหัววัด คานถูกกำหนดให้สั่นในรูปแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ (simple harmonics) โดยการป้อนแรงภายนอกให้แก่คาน  $F_{drive}(t) = F_0 e^{i\omega t}$  ที่ความถี่ค่าหนึ่ง โดย  $F_0$  คือแอมพลิจูดของแรงที่ป้อนให้แก่คาน แรงยืดหยุ่นของคาน (elastic force) จะอยู่ในรูปค่าคงที่ของสปริง (spring constant :  $k$ ) และคานจะเกิดการสั่นแบบถูกหน่วง (damp harmonics oscillation) ด้วยสัมประสิทธิ์การหน่วง ( $b$ )



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบการทำงานของหัววัดแม่เหล็กที่มีลักษณะคล้ายหัววัดแม่เหล็กเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยแรงสปริงที่ถูกติดไว้กับปลายคาน

ในการตรวจวัดวัตถุแม่เหล็กจะเปรียบเสมือนว่าคานแม่เหล็กอยู่กับที่ โดยมีเพียงหัววัดที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน  $z$  โดยระยะของคานที่ตำแหน่งใดๆ  $z(t) = A_0 e^{i(\omega t - \phi)}$  โดย  $A_0$  คือแอมพลิจูดการสั่นของคาน และความถี่เรโซแนนซ์ของคาน  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของคานจะแสดงได้ดังนี้

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.11)$$

คำตอบของสมการการเคลื่อนที่จะอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (second order differential equation) ที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ชั่วขณะ (transient motion) ของคานจากจุดสมดุล ซึ่งสมการของระบบจะมีค่าคงที่ของสปริงเข้ามาเกี่ยวข้องดังนี้

จากสมการที่ 2.11 จัดรูปสมการใหม่และหารด้วย  $m$  ทั้งสมการ

$$(-\omega^2 A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} + \omega_0^2 A_0)e^{i(\omega t - \phi)} = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{m} \quad (2.12)$$

$$(-\omega_0^2 - \omega^2)A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} = \frac{F_0 e^{i\phi}}{m} \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.13) จะแสดงให้เห็นว่าเทอมด้านซ้ายจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) สามารถเขียนออกมาในรูปความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's formula) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันตรีโกณมิติกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังเชิงซ้อน  $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$

$$\cos \phi = \frac{(-\omega_0^2 - \omega^2)A_0}{\frac{F_0}{m}} \quad (2.14)$$

$$(-\omega_0^2 - \omega^2)A_0 = \frac{F_0}{m} \cos \phi \quad (2.15)$$

และ

$$\sin \phi = \frac{\frac{ib\omega A_0}{m}}{\frac{F_0}{m}} \quad (2.16)$$

$$\frac{F_0}{m} \sin \phi = \frac{b\omega A_0}{m} \quad (2.17)$$

$$(2.15)^2 ; \quad \left\{ (\omega_0^2 - \omega^2)A_0 \right\}^2 = \left( \frac{F_0}{m} \right)^2 \cos^2 \phi \quad (2.18)$$

$$(2.17)^2 ; \quad (b\omega A_0)^2 = \left( \frac{F_0}{m} \right)^2 \sin^2 \phi \quad (2.19)$$

$$(2.18) + (2.19) ; \quad (\omega_0^2 - \omega^2)^2 A_0^2 + (b\omega)^2 A_0^2 = \left( \frac{F_0}{m} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$A_0^2 \left[ (\omega_0^2 - \omega^2) + (b\omega)^2 \right] = \left( \frac{F_0}{m} \right)^2 \quad (2.21)$$

$$A_0 = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}} \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่าความถี่เรโซแนนซ์ของคานค่าประสิทธิภาพของคาน  $Q = \sqrt{mk} / b$  ลงในสมการจะได้แอมพลิจูดของการสั่นของคานดังสมการที่ 2.23

$$A_0 = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega_0 \omega}{Q}\right)^2}} \quad (2.23)$$

สำหรับเฟสของคาน

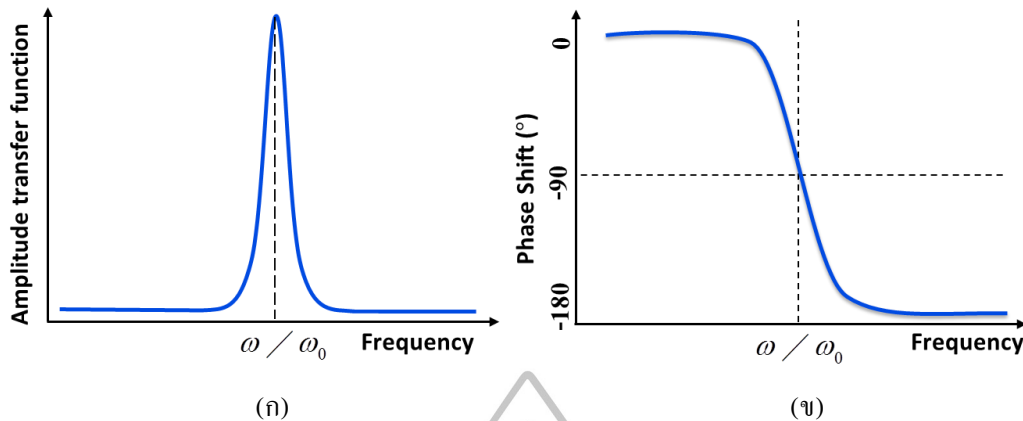
$$\tan \phi = \frac{\frac{b\omega A_0}{m}}{(\omega_0^2 - \omega^2) A_0} \quad (2.24)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\tan \phi = -\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.25)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(-\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)}\right) \quad (2.26)$$

โดยทั่วไปแล้วในโหมดไดนามิกส์เป็นการรวมแรงที่ได้จากการกระตุ้นให้คานสั่นด้วยคลื่นไซน์ร่วมกับการสั่นด้วยความหน่วงของคานเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามคานจะอยู่ในสถานะคงที่ (ก่อนเริ่มการตรวจวัด) เนื่องจากการสั่นของคานจะถูกป้อนที่ความถี่เดียว ดังนั้นระบบสมมูลของคานจะอธิบายด้วยแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.23) และ (2.26) เมื่อนำมาพล็อตจะได้ดังรูปที่ 2.19(ก) และรูปที่ 2.19(ข) ตามลำดับ

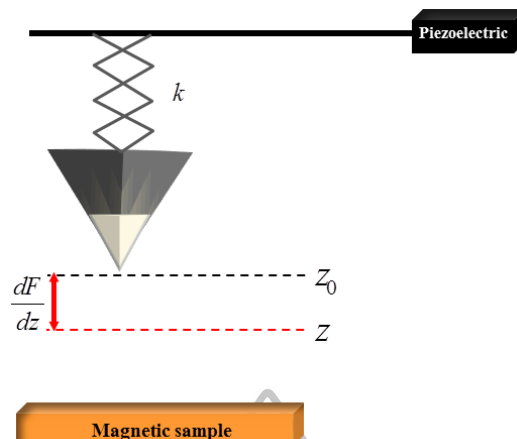


รูปที่ 2.19 รูปแบบคานแบบเม็ดมวล (Point mass model) (ก) การสั่นของแอมพลิจูด และ (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟส [25]

เมื่อคานถูกกระตุ้นด้วยความถี่ค่าหนึ่งซึ่งเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของคาน  $\omega = \omega_0$  คานจะสั่นด้วยแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุด โดยที่ตำแหน่งแอมพลิจูดสูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสเท่ากับ  $\phi = 90^\circ$  ระบบการสั่นของคานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือการกระตุ้นให้คานสั่นด้วยเพียโซอิเล็กทริกที่บริเวณปลายคาน

#### 2.2.2.4 ปฏิกริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดและวัตถุแม่เหล็ก

กรณีที่มีแรงภายนอกกระทำกับหัววัด (แรงจากวัตถุแม่เหล็ก) จะทำให้สมการของแรงที่กระทำต่อคานมีความซับซ้อนและยากต่อการตีความ ในการคำนวณจะใช้มวลยังผล (effective mass :  $m$ ) (ที่ได้จากสมการของการเคลื่อนที่เนื่องจากการสั่นของคานซึ่งมีความแตกต่างจากมวลจริงของหัววัด) เนื่องจากการพิจารณาหัววัดเป็นแบบเม็ดมวลจึงไม่สนใจแรงภายในหัววัด (แต่ในความเป็นจริงแล้ววัตถุต่างๆ ล้วนมีปริมาตร หมายความว่า มีเม็ดมวลรวมกันหลายๆ เม็ดมวลนั่นเอง ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันมากมาย ทำให้การวิเคราะห์เกิดความยุ่งยาก ดังนั้นการลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์เราจึงจำเป็นต้องพิจารณาการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มนั่นเอง) เนื่องจากระยะห่างเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างหัววัดและวัตถุ การพิจารณาจะกำหนดให้ระดับความสูงของคานเริ่มต้นที่  $z_0$  โดยกำหนดให้ตัวแปร  $F$  คือแรงที่หัวเขียนกระทำต่อหัววัดแม่เหล็กผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อคานจะทำให้เกิดค่าคงที่ยังผลของสปริง (effective spring constant :  $k_{eff}$ ) ซึ่งต่างจากค่าคงที่ของสปริง การจำลองการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.20 [26,27]



รูปที่ 2.20 การจำลองการตรวจวัดวัตถุแม่เหล็ก ซึ่งระบบของคานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกกระตุ้นที่แรงแม่เหล็ก  $dF/dz$  ที่ออกจากวัตถุแม่เหล็กบริเวณ ทำให้คานที่อยู่ในระบบสมดุล (ตำแหน่ง  $z_0$ ) เปลี่ยนตำแหน่งไปที่ระดับ  $z$  ใดๆ ทำให้เกิดค่าคงที่ยังผลของสปริง  $k_{eff} = k - dF/dz$  [27]

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + k(z(t) - z_0) = F_0 e^{i(\omega t)} + F \quad (2.27)$$

กรณีที่อันตรกิริยาระหว่างหัววัดและวัตถุแม่เหล็กมีน้อยมากๆ แต่เพียงพอที่จะไปรบกวนการสั่นของคาน ดังนั้นการพิจารณาระบบการสั่นของคานจะสมมติว่าหัววัดแกว่งด้วยแอมพลิจูดเล็กมากๆ ซึ่งจะใช้การกระจายของเทเลอร์ (Taylor expansion) มาอธิบายอันตรกิริยารอบๆ ตำแหน่งสมดุลของคาน

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + k(z - z_0) = F_0 e^{i(\omega t)} + \left[ F_{(z=z_0)} + \left( \frac{dF}{dz} \right)_{(z=z_0)} (z - z_0) \right] \quad (2.28)$$

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + \left[ k - \left( \frac{dF}{dz} \right)_{(z=z_0)} \right] (z - z_0) = F_0 e^{i(\omega t)} + F_{(z=z_0)} \quad (2.29)$$

สมการการสั่นของคานที่สถานะคงที่ (สถานะที่ทำให้คานสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์) เป็นไปตามสมการที่ 2.23 และ 2.26 แต่เนื่องจากระบบการสั่นของคานถูกรบกวนด้วยแรงแม่เหล็กจากวัตถุทำให้มีค่าคงที่ยังผลของสปริงและมีกระตุ้นที่แรงแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง (เทอมในวงเล็บของสมการที่ 2.29) ซึ่งจะทำให้คานมีความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง ( $\omega_0'$ )

$$k_{eff} = k - \frac{dF}{dz} \quad (2.30)$$

กรณีที่มี  $\left(\frac{dF}{dz}\right)_{(z=z_0)} \leq k$  ซึ่งอยู่ในเทอมที่ติดกรณฑ์ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปอนุกรมอันดับที่หนึ่งด้วยการกระจายของเทเลอร์ (Taylor polynomial) เมื่อความถี่เรโซแนนซ์ของคานเนื่องจากเกรเดียนท์แรงแม่เหล็กคือ  $\omega_0 \approx \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}}$

$$\omega_0' \approx \sqrt{\frac{k - \frac{dF}{dz}}{m}} = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{dF}{dz}}{k}} \quad (2.31)$$

$$\omega_0' \approx \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{\frac{dF}{dz}}{2k}\right) \quad (2.32)$$

ผลต่างความถี่:  $\Delta\omega_0 = \omega_0' - \omega_0$

$$\Delta\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2k} \frac{dF}{dz} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.33 ประมาณได้ว่าเกรเดียนท์ของแรง  $dF/dz$  เป็นค่าคงที่ในขณะที่คานสั่นในแต่ละรอบ ซึ่งเท่ากับว่าคานจะวัดแรงระหว่างหัววัดและวัตถุแม่เหล็กที่ขึ้นต่อกันแบบเชิงเส้น (การประมาณค่าแบบนี้ใช้ได้เพียงกรณีที่คานมีการสั่นที่น้อยมากเท่านั้น กรณีที่การสั่นมีระยะการกระจัดมากๆ ไม่สามารถนำไปอธิบายได้)

เมื่อพิจารณาแอมพลิจูดการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta A$ ) เนื่องจากแรงเกรเดียนท์แม่เหล็กของวัตถุกระทำต่อหัววัดด้วยการประมาณค่าที่การสั่นของแอมพลิจูดมากที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์

$$\Delta A \approx \frac{2A_0 Q}{3\sqrt{3}k} \frac{dF}{dz} \quad (2.34)$$

เนื่องจากคานสั่นภายใต้ความถี่เรโซแนนซ์ ( $\omega = \omega_0$ ) หรือเฟสเท่ากับ  $\pi/2$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเฟสแสดงดังสมการ 2.25 การอธิบายการสั่นของคาน จะใช้การประมาณค่าของความถี่โดยจะสมมติว่าความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ของคานเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์เดิม  $\omega_0' \approx \omega_0$  ดังนั้น  $\omega_0' + \omega_0 = 2\omega_0$  และเนื่องจากความสัมพันธ์ของผลต่างของความถี่ที่เปลี่ยนแปลง  $\Delta\omega_0 = \omega_0' - \omega_0$

$$\tan\phi = -\frac{\omega_0' \omega}{Q((\omega_0')^2 - \omega^2)} \approx -\frac{\omega^2}{Q(\omega_0' + \omega)(\omega_0' - \omega)} = \frac{\omega}{2Q\Delta\omega} = \frac{k}{Q \frac{dF}{dz}} \quad (2.35)$$

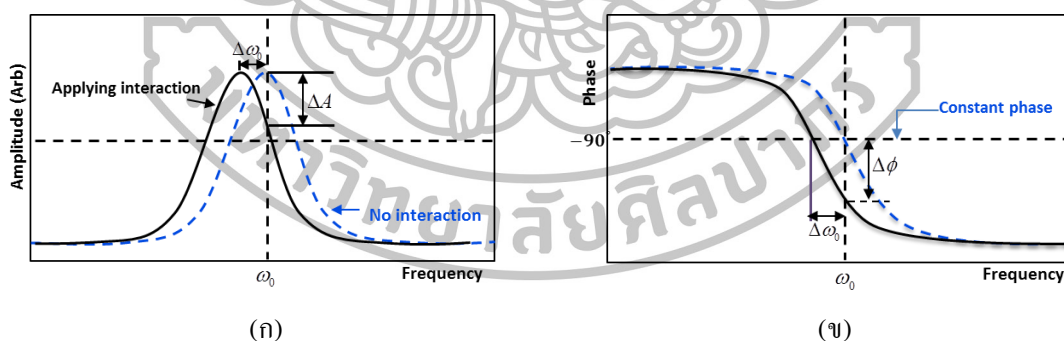
เมื่อคานสั้นเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ จะทำให้เฟสเปลี่ยนไปด้วย  $\phi = -\pi/2 + \Delta\phi$  ทำให้สมการที่ 2.35 ประมาณการด้วยฟังก์ชันอาร์กแทน (arctan approximation) ซึ่งในกรณีนี้คือ  $\arctan x \approx -\pi/2 - 1/x$

$$\phi = -\frac{\pi}{2} + \Delta\phi = \arctan\left(\frac{k}{Q \frac{dF}{dz}}\right) \approx -\frac{\pi}{2} - \frac{Q \frac{dF}{dz}}{k} \quad (2.36)$$

ดังนั้นผลต่างของเฟสที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta\phi$ ) จะสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ของคาน  $90^\circ$  ดังนี้

$$\Delta\phi = -\frac{Q \frac{dF}{dz}}{k} = -\frac{Q}{k} \frac{dF}{dz} \quad (2.37)$$

จากสมการที่ 2.34 และ 2.37 เมื่อนำมาพล็อตกราฟของแอมพลิจูดและเฟสที่แปลงจะได้ดังรูปที่ 2.21(ก) และ 2.21(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 รูปแบบคานแบบมีควม (ก) แอมพลิจูดของการสั้นที่เปลี่ยนแปลง (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟส โดยกราฟสีน้ำเงินคือการสั้นของคานที่ความถี่เรโซแนนซ์ และกราฟสีดำคือการสั้นของความถี่เรโซแนนซ์ ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีแรงแม่เหล็กมากระทำ [28]

### 2.2.2.5 ระบบของหัววัดแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างรูปภาพแม่เหล็ก ซึ่งได้จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันของหัววัดที่ได้รับผลจากปฏิกิริยาทางแม่เหล็กของวัตถุในรูปแรงเกรเดียนท์ โดยอธิบายจากพลังงานศักย์แม่เหล็ก (magnetostatic energy) ในรูปของพลังงานซีแมน (zeeman energy :  $E$ ) ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของวัตถุนั้นพยายามเรียงตัวไปตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อพิจารณาพลังงานดังกล่าวจะได้ดังสมการที่ 2.38

$$E = -\mu_0 \int \vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample} dV_{tip} \quad (2.38)$$

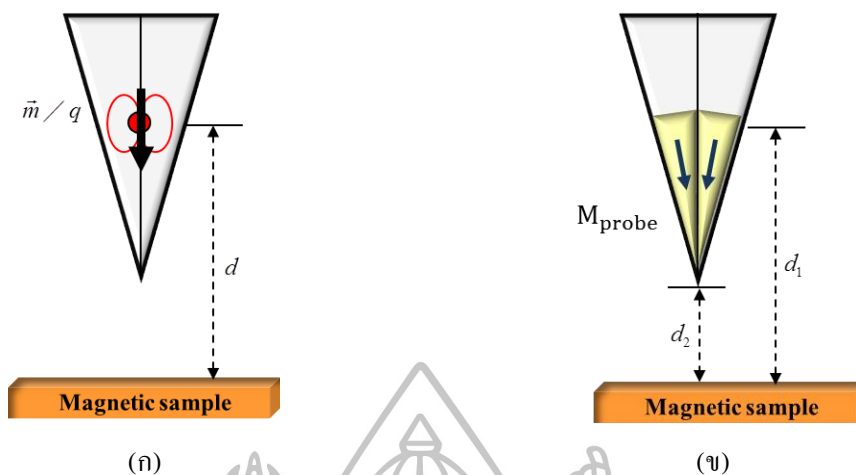
เมื่อ  $\mu_0$  คือค่าซึมซาบแม่เหล็กในอากาศ  $\vec{M}_{tip}$  คือแมกนีไทเซชันของหัววัด  $\vec{H}_{sample}$  คือสนามแม่เหล็กที่ออกจากวัตถุ และ  $dV_{tip}$  คือปริมาตรของหัววัด

เนื่องจากการตรวจวัดในโหมดไดนามิกส์จะสมมติว่าหัววัดเป็นแบบเม็ดมวล ซึ่งพิจารณาแรงแม่เหล็กในรูปอนุพันธ์เทียบกับระยะของคานที่เปลี่ยนแปลง โดยระบบของหัววัดแม่เหล็กจะอยู่ในรูปของแรงแม่เหล็กสถิต

$$F = -\vec{\nabla} \cdot E = \mu_0 \int \vec{\nabla} \cdot (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} = \mu_0 (-q_{tip} + \vec{m}_{tip} \cdot \nabla) \vec{H}_{sample} \quad (2.39)$$

เนื่องจากหัววัดแม่เหล็กเป็นแบบเม็ดมวล ซึ่งรูปแบบของหัวเขียนแม่เหล็กจะพิจารณาจากระยะห่างระหว่างหัววัดและวัตถุ โดยผลของหัววัดในรูปแบบโมเมนต์แม่เหล็กขั้วคู่ (magnetic dipole moment :  $\vec{m}$ ) จะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของปริมาตรของหัววัด ซึ่งห่างจากวัตถุแม่เหล็กเป็นระยะทาง  $d$  ดังรูปที่ 2.22(ก) ในกรณีของโมเมนต์แม่เหล็กขั้วเดียว (magnetic monopole moment :  $q$ ) จะพิจารณาที่บริเวณปลายหัววัดที่มีระยะห่างจากพื้นผิววัตถุ  $d_2$  ดังรูปที่ 2.22(ข)





รูปที่ 2.22 รูปแบบหัววัดแม่เหล็กแบบเข็มคาวล (point probe) (ก) หัววัดแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็น โมเมนต์ขั้วคู่ (magnetic dipole moment :  $\vec{m}$ ) หรือ โมเมนต์ขั้วเดียว (magnetic monopole moment :  $q$ ) (ข) พิจารณาหัววัดแม่เหล็กในรูปแบบประจุซึ่งภายในสีเหลืองจะเป็นบริเวณที่มีแมกนีไทเซชัน แตกต่างกันทั้งสองฝั่ง

เมื่อรวมโมเมนต์แม่เหล็กของหัววัดเข้าด้วยกัน ซึ่งส่วนมากแรงแม่เหล็กจากวัตถุ จะกระทำต่อหัววัดในแนวเดียว (แนวแกน  $z$ ) จะได้ดังสมการที่ 2.40

$$F = \mu_0 \left( -qH_z + m_x \frac{dH_x}{dz} + m_y \frac{dH_y}{dz} + m_z \frac{dH_z}{dz} \right) \quad (2.40)$$

$$\frac{dF}{dz} = \mu_0 \left( -q \frac{dH_z}{dz} + m_x \frac{d^2 H_x}{dz^2} + m_y \frac{d^2 H_y}{dz^2} + m_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} \right) \quad (2.41)$$

เนื่องจากแรงที่กระทำต่อหัววัดมีเพียงแรงในแนวแกน  $z$  และประมาณว่าหัววัดเป็น แบบไดโพลแท้ (pure dipole) จะมีค่า  $q=0$

$$\frac{dF}{dz} = \mu_0 \left( m_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} \right) \quad (2.42)$$

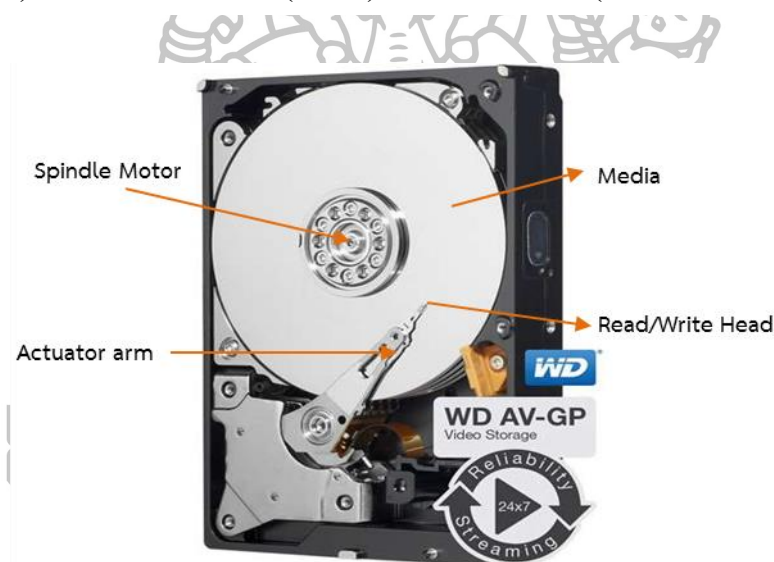
เมื่อ  $m_x$   $m_y$  และ  $m_z$  คือโมเมนต์แม่เหล็กขั้วคู่ ของหัววัดแม่เหล็กในแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ตามลำดับ โดยสมมติว่ามีเพียงโมเมนต์แม่เหล็กของหัววัด  $m_z$  ในแนวแกน  $z$  เท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของ  $H_z$  เมื่อ  $H_z$  คือ สนามแม่เหล็กที่พุ่งตั้งฉากกับวัตถุแม่เหล็ก

## 2.3 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive : HDD)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่าเป็นแหล่งจัดเก็บ บริหารข้อมูล ในระบบคอมพิวเตอร์ ลักษณะเป็นจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก สามารถจัดเก็บหรือลบข้อมูลได้อย่างถาวรด้วยระบบไฟฟ้าโดยสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อบันทึกข้อมูลลงแผ่นบันทึกแม่เหล็กแล้วข้อมูลจะคงอยู่ไม่สูญสลาย ดังนั้นฮาร์ดดิสก์จึงถูกจัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บระบบปฏิบัติการ ข้อมูล และโปรแกรมต่างๆ

### 2.3.1 การทำงานและส่วนประกอบต่างๆ ของฮาร์ดดิสก์

ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะแสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วน ได้แก่ แขนหัวอ่าน/เขียน (actuator arm) มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (spindle motor) แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (media) หัวอ่าน/หัวเขียน (read/write head)



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [29]

#### 2.3.1.1 แขนหัวอ่าน/เขียน (actuator arm)

อุปกรณ์ชิ้นนี้มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กยาวๆ มีหน้าที่เคลื่อนแขนของตัวมันเอง ซึ่งปลายด้านหนึ่งของแขนจะติดกับหัวอ่าน/เขียนเพื่อเลื่อนตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนไปยังตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก เรียกว่าอุปกรณ์ชิ้นนี้เป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญที่สุดในตัวฮาร์ดดิสก์อีกทั้งเป็นตัวที่ใช้บ่งบอกความเร็วในการทำงานของตัวไดรฟ์

### 2.3.1.2 มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (spindle motor)

หน้าที่ของมอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กจะเป็นตัวควบคุมแผ่นบันทึกแม่เหล็กแม่เหล็กให้หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูล ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อความเร็วในการหมุนของฮาร์ดดิสก์ เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์จะช่วยให้การอ่าน/เขียนข้อมูลเร็วขึ้น ซึ่งความเร็วถูกวัดเป็นรอบต่อนาที (revolution per minute : RPM) ปกติความเร็วในการหมุนประมาณ 7200 รอบต่อนาที แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมทำให้ปัจจุบันตัวมอเตอร์สามารถเพิ่มความเร็วได้ถึง 1 หมื่นรอบต่อนาที

### 2.3.1.3 แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (media)

แผ่นบันทึกแม่เหล็กแม่เหล็กมีลักษณะเป็นจานกลมๆ ที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก การบันทึกข้อมูลจะใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กให้มีสถานะเป็น 0 และ 1 เพื่อจัดเก็บข้อมูล เหมือนกับข้อมูลดิจิทัลอื่นๆ ในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจานแม่เหล็กนี้ติดกับมอเตอร์ที่ทำหน้าที่หมุนแผ่นจานแม่เหล็กนี้และสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้ง 2 ด้าน

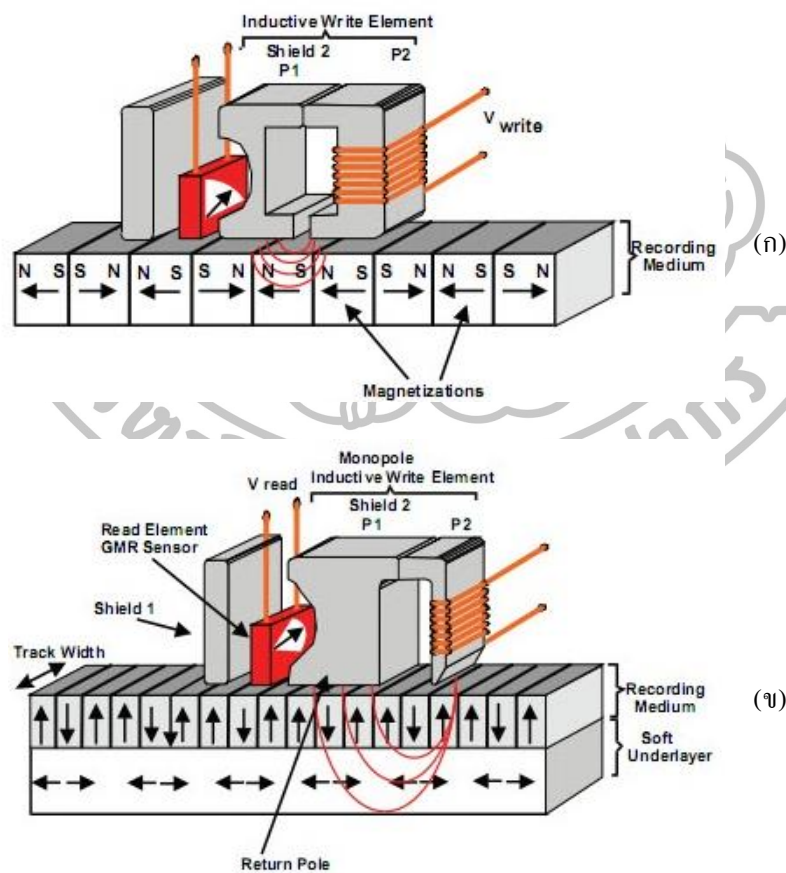
### 2.3.1.4 หัวอ่าน/หัวเขียน (read/write head)

หัวอ่าน/เขียนมีหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลลงบนแผ่นแม่เหล็ก ภายในหัวอ่านเขียนมีลักษณะเป็นขดลวด การทำงานของหัวอ่าน/เขียนจะรับคำสั่งจากตัวคอนโทรลเลอร์ (controller) นำไปแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าสู่ขดลวดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก การเขียนข้อมูลลงในแผ่นบันทึกแม่เหล็กสัญญาณแม่เหล็กจะถูกแปลงจากสัญญาณดิจิทัลทางไฟฟ้าในระบบคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณแม่เหล็กนี้จะถูกจัดกลุ่มของแม่เหล็กบนผิวหน้าแผ่นบันทึกแม่เหล็กเพื่อเก็บข้อมูลทั้งหมด ในกรณีของการอ่านข้อมูล หัวอ่าน/เขียนจะค้นหาข้อมูลทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ถูกเรียงไว้เมื่อตอนเขียนข้อมูล หลังจากนั้นตัวแผงวงจรที่อยู่บนฮาร์ดดิสก์จะแปลงสัญญาณแม่เหล็กนั้นกลับไปเป็นสัญญาณดิจิทัลทางไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งเพื่อส่งต่อไปยังส่วนการทำงานอื่นๆ ในเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป

## 2.4 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมุ่งเน้นไปในด้านความสามารถในการบรรจุข้อมูลด้วยเทคโนโลยีต่างๆ เทคโนโลยีที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ กระบวนการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording : PMR) [30] ซึ่งพัฒนามาจากการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน (longitudinal magnetic recording : LMR) [30] (ดูรูปที่ 2.24(ข) และ (ก) ประกอบ)

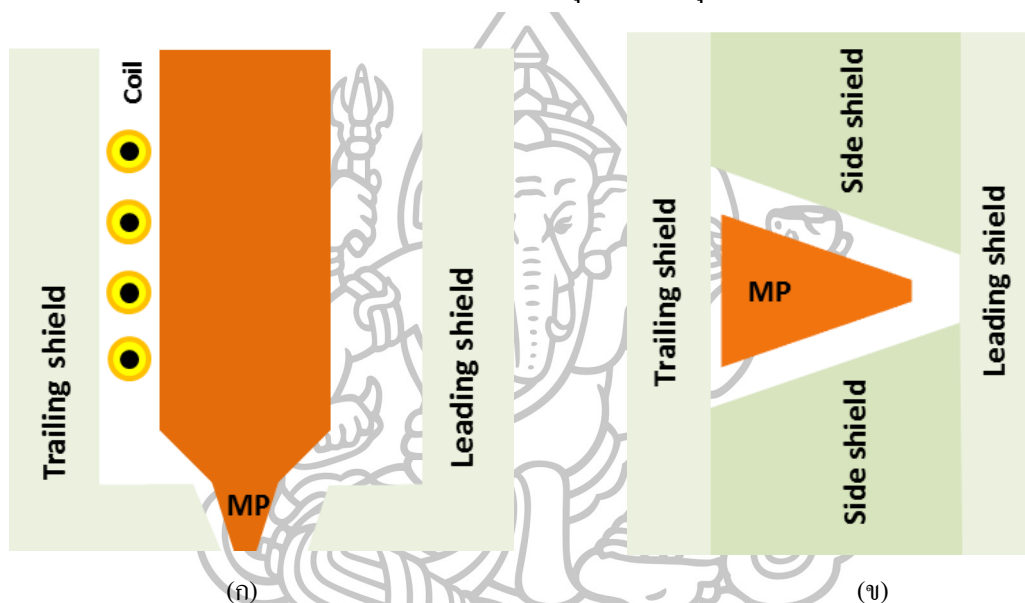
การบันทึกข้อมูลแบบแวนดิงเป็นการเขียนข้อมูลลงในแผ่นบันทึกแม่เหล็กแบบตั้งฉาก แมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกแม่เหล็กจะมีทิศขึ้นหรือลงทำให้พื้นที่ของการบันทึกข้อมูลเพิ่มขึ้น ซึ่งการบันทึกข้อมูลแบบแวนดิงประกอบด้วยชั้นแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic underlayer : SUL) รวมเข้ากับชั้นของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ชั้น SUL ทำหน้าที่เหนี่ยวนำทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้บันทึกข้อมูลให้อยู่ในแนวตั้งฉาก เมื่อหัวเขียนแม่เหล็กถูกกระตุ้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ภายใต้บริเวณโพลหลัก (main pole : MP) (อยู่ในตำแหน่ง P2 ของรูปที่ 2.24(ข)) ทำให้ SUL หนาแน่นไปด้วยสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ชั้นบันทึกข้อมูลเต็มไปด้วยสนามแม่เหล็กที่มีค่าสนามโคเออร์ซิวิตี (coercive field :  $H_c$ ) ที่สูง ดังนั้นการบันทึกข้อมูลลงในแผ่นบันทึกแม่เหล็กต้องใช้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กที่มีค่ามากพอ เพื่อไปเปลี่ยนทิศทางแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ด้วยหลักการดังกล่าวจึงทำให้การบันทึกข้อมูลแบบแวนดิงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน



รูปที่ 2.24 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (ก) การบันทึกข้อมูลแบบแวนดิง (ข) การบันทึกข้อมูลแบบแวนดิง [30]

## 2.5 การเกิดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้หัวเขียนแม่เหล็กมีชิลด์ (shield) ล้อมรอบบริเวณ โพลหลัก (ดูรูปที่ 2.25 ประกอบ) เพื่อช่วยให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนไม่กระจายตัว เป็นวงกว้าง เนื่องจากหัวเขียนแม่เหล็กที่มีชิลด์ล้อมรอบจะมีเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กที่ออก จากปลายโพลในบริเวณขอบของหัวเขียนมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับหัวเขียนที่ไม่มีชิลด์ โดยสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวด ทำให้สนามแม่เหล็กไป เหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพลของหัวเขียน



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีชิลด์รอบด้าน (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมอง จากด้านล่าง

### 2.5.1 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

การเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กของหัวเขียน เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า ให้แก่ขดลวด ทำให้เกิดการกระจายของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ เนื่องจาก ขดลวดที่พันกันเป็นรูปเกลียวบริเวณปลายหัวเขียนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงสุดภายในขดลวด โดยสนามแม่เหล็กคือผลรวม เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อยๆ ของแต่ละเกลียวเข้าด้วยกันทั้งหมด สนามแม่เหล็กภายใน ขดลวด โซลินอยด์มีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงและสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.26(ก) การคำนวณหาขนาดสนามแม่เหล็กจะใช้กฎของแอมแปร์ซึ่งกล่าวว่า “การอินทิเกรตเชิงเส้น รอบเส้นปิดใดๆ มีค่าแปรผันตรงกับกระแสสุทธิภายในผิวปิดนั้น” นั่นคือ  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{net}$

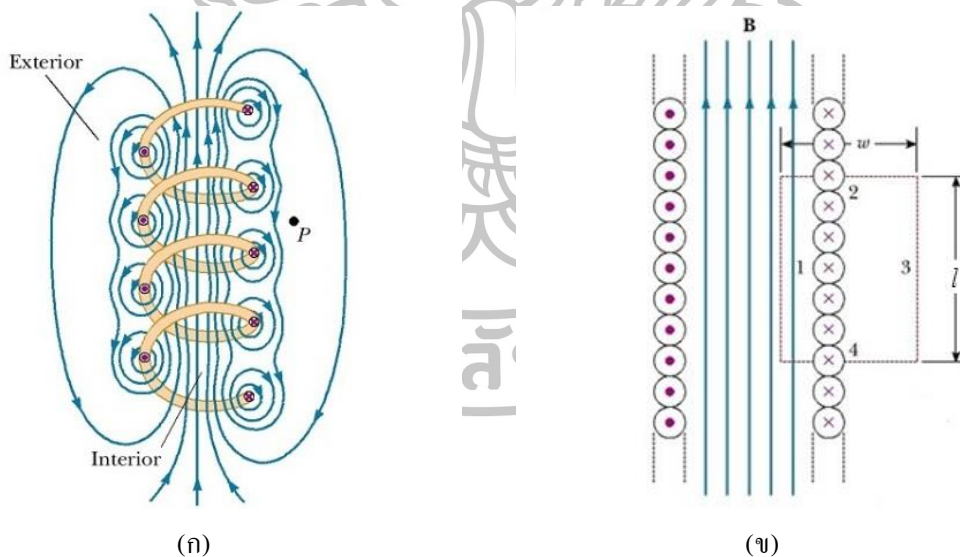
การพิจารณาจะกำหนดเส้นทางการอินทิเกรตเชิงเส้น โดยแบ่งเส้นทางปิด (closed path) ออก 4 ส่วน พิจารณาจากรูปที่ 2.26(ข) สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นทาง 2 และ 4 มี  $\vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$  เพราะ  $\vec{B}$  กับ  $d\vec{l}$  ตั้งฉากกัน และเส้นทางที่ 3 มีสนามภายนอกเท่ากับศูนย์ ทำให้  $\vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$  ดังนั้นสนามแม่เหล็กของขดลวดจะแสดงดังสมการด้านล่าง

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{path\ 1} \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot \int_{path\ 1} d\vec{l} = Bl \quad (2.43)$$

$$\vec{B}l = \mu_0 NI \quad (2.44)$$

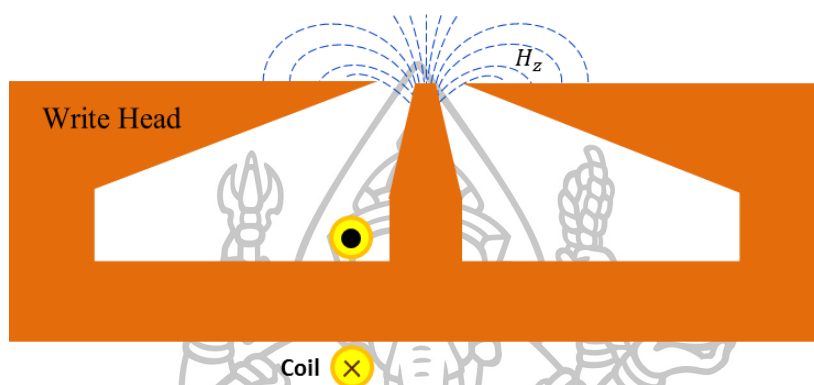
$$\vec{B} = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI \quad (2.45)$$

เมื่อ  $\vec{B}$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) มีหน่วยเป็นเวเบอร์ ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) หรือเทสลา (Tesla, T)  $N$  คือ จำนวนขดลวดทั้งหมดภายในเส้นปิด  $I_{net}$  คือ กระแสสุทธิบนเส้นปิดคลุมซึ่งเท่ากับ  $NI$  โดยที่  $n = N/l$  คือจำนวนรอบต่อความยาว และ  $d\vec{l}$  คือ ความยาวของขดลวดเล็กๆ



รูปที่ 2.26 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดโซลินอยด์ (ก) เส้นแรงแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ (ข) รูปภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติซึ่งสนามแม่เหล็กภายในจะจัดเรียงตัวกันแบบสม่ำเสมอ และสนามแม่เหล็กภายนอกขดลวดโซลินอยด์จะมีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณสนามแม่เหล็กจะแสดงด้วยเส้นปะสีแดง [31]

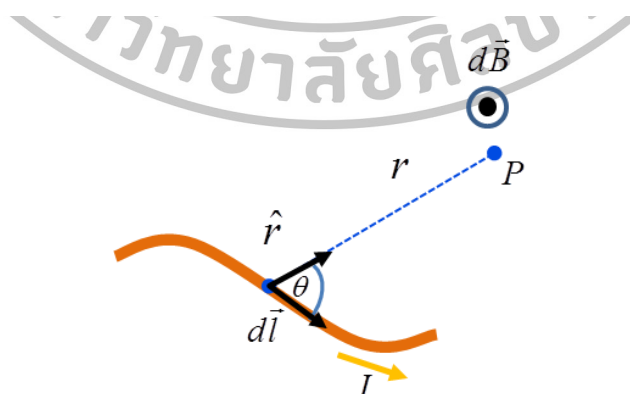
ขนาดของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) คือ  $B = \mu_0 H$  (เมื่อ  $\mu_0$  คือค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็ก (permeability) ของอากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} T.m^2 / A$ ) เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สนใจอยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับหัวเขียนแม่เหล็กดังนั้นจะพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $z$  ( $H_z$ ) ที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนแม่เหล็กบริเวณโพลหลักซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 สนามแม่เหล็กพุ่งจากหัวเขียนแม่เหล็กบริเวณโพลหลักเนื่องจากการเหนี่ยวนำจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด [2]

### 2.5.2 กฎของบิโอต์ - ซาวาร์ต (Biot - savart law)

กฎของบิโอต์ - ซาวาร์ตกล่าวว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ หรือมีการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในเส้นลวดตัวนำจะทำให้มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบบริเวณนั้นๆ และสามารถหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ ความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุด  $P$  จากขดลวดตัวนำยาว  $d\vec{l}$  เมื่อมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านลวดตัวนำ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 สนามแม่เหล็ก  $d\vec{B}$  ที่จุด  $P$  เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ  $I d\vec{l}$  [32]



ปริมาณเวกเตอร์ของความยาวเส้นลวดในรูปที่ 2.28 จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเท่ากับ  $I d\vec{l}$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $d\vec{B}$  เป็นส่วนของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา  $\hat{r}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศชี้จาก  $d\vec{l}$  ไปจุด  $P$  และ  $r$  คือระยะทางจากส่วนของลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล  $d\vec{l}$  ของตัวนำไปถึงจุด  $P$

เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.46 จะได้

$$\vec{B} = \int_{\text{wire}} d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\text{wire}} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $\vec{B}$  คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่จุด  $P$  ซึ่งเกิดจากส่วนของลวดตัวนำที่มีกระแสคงที่  $I$  ไหลผ่าน และทิศของ  $\vec{B}$  จะตั้งฉากกับระนาบของ  $d\vec{l}$  กับ  $\hat{r}$

### 2.5.3 ฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux)

ฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\Phi$ ) คือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ผิววัตถุ มีหน่วยเป็นเวเบอร์ ( $Wb$ ) เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ดังรูปที่ 2.29(ก)

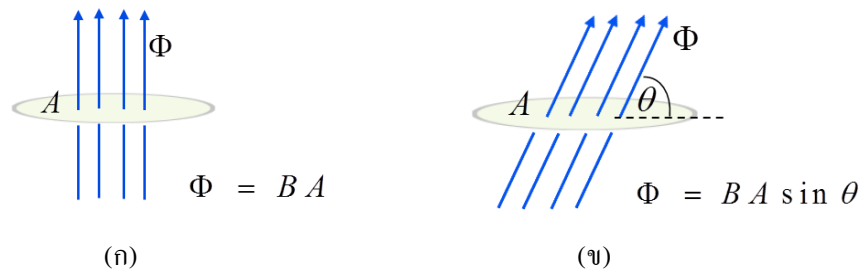
$$\Phi = \vec{B}A \quad (2.48)$$

เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ที่มีหน่วยเป็น ( $m^2$ )

กรณีที่สนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่จะทำให้สนามแม่เหล็กทำมุม  $\theta$  กับพื้นที่ดังรูปที่ 2.29 (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กจะหาได้จากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือขนาดของสนามแม่เหล็กคูณด้วยพื้นที่ที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งผ่านในแนวตั้งฉาก

$$\Phi = \vec{B}A \sin \theta \quad (2.49)$$

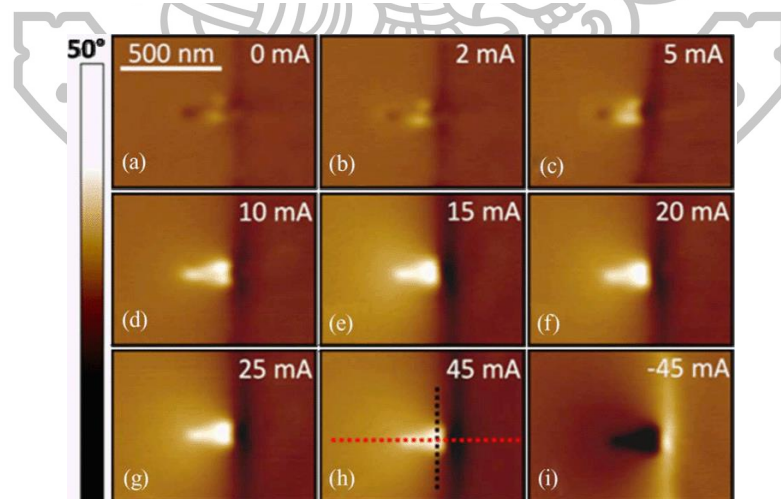




รูปที่ 2.29 ฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งตั้งฉากกับพื้นผิว (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กทำมุม  $\theta$  กับพื้นผิว [33]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

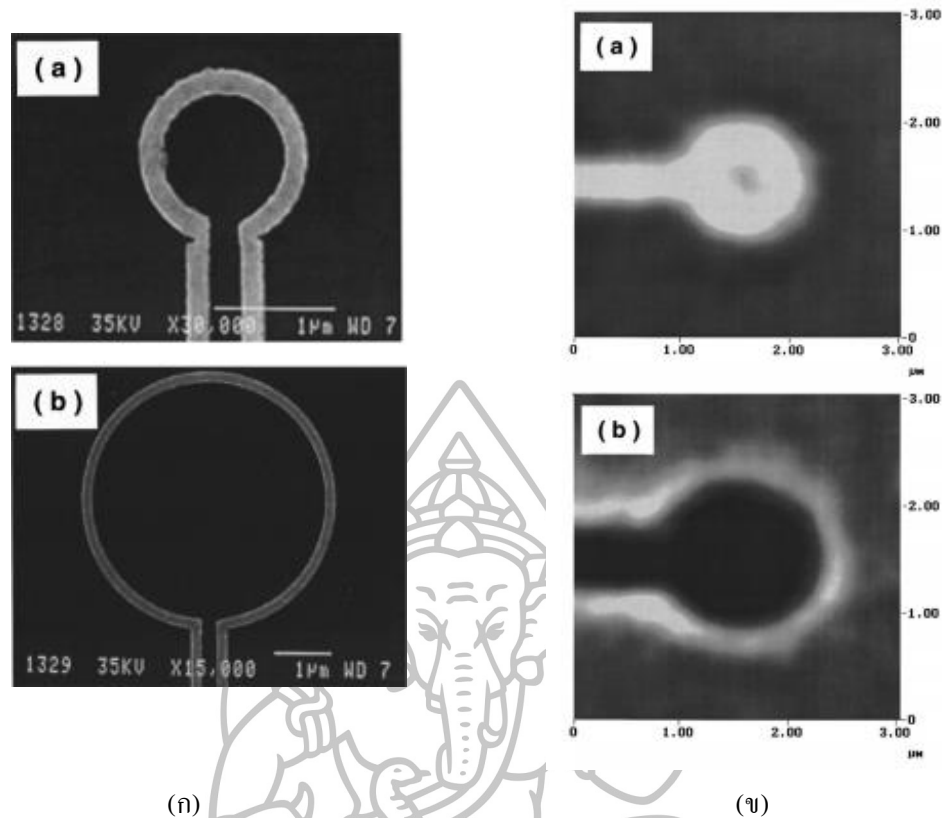
จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แม่เหล็กในเชิงคุณภาพ ในปี ค.ศ. 2010 นักวิจัยชื่อ Nissim Amos และคณะ [34] ได้ศึกษาหัววัดแม่เหล็กที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูง โดยใช้ไอรอนแพททินัม (iron platinum : FePt) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทแม่เหล็กแข็ง (hard magnetic material) เคลือบหัววัด MFM ซึ่งเครื่องมือที่ใช้หัววัดประเภทนี้จะถูกเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โคเออร์ซิวิตีสูง (ultrahigh coercivity magnetic force microscopy : UHC MFM) ที่มีคุณสมบัติทนต่อสนามแม่เหล็กสูง (ประมาณ 9 – 10 kOe) ในงานวิจัย นักวิจัยได้นำ UHC MFM มาศึกษาหัวเขียนแม่เหล็กในบริเวณโพลหลัก โดยการทดลองจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้แก่หัวเขียนตั้งแต่ขนาด 0 - 45 mA ซึ่งจะให้รูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนออกมาดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแบบ UHC MFM ของหัวเขียนที่กระแสไฟฟ้าขนาดแตกต่างกัน (a) 0 mA (b) 2 mA (c) 5 mA (d) 10 mA (e) 15 mA (f) 20 mA (g) 25 mA (h) 45 mA (i) -45 mA [34]

ในปี ค.ศ. 1997 ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กในเชิงปริมาณด้วย กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยใช้วงแหวนกระแสไฟฟ้า (current ring) โดยนักวิจัย ชื่อ Linshu Kong และ Stephen Y. Chou [35] ระดับไมโครเมตร 2 ขนาดดังรูปที่ 2.31(ก) ที่ สักระยะห่างจากลำอิเล็กตรอน (electron-beam lithography : EBL) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิต โครงสร้างนาโนเมตร โดยให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวนเท่ากับ  $1\ \mu\text{m}$  และ  $5\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด  $\pm 25\ \text{mA}$  ตามลำดับให้แก่วงแหวนขนาด  $1\ \mu\text{m}$  เพื่อทำให้แรงแม่เหล็กกระทำต่อหัววัดของ MFM เมื่อหัววัดตรวจวัดไปบนวงแหวนทำให้เกิด รูปภาพแม่เหล็กดังรูปที่ 2.33(ข) ซึ่งในรูป (a) คือจ่ายกระแส  $+25\ \text{mA}$  ให้แก่วงแหวน ทิศทาง ของสนามแม่เหล็กจากวงแหวนจะมีทิศตรงข้ามกับทิศของแมกนีไทเซชันของหัววัด และรูป (b) คือจ่ายกระแส  $-25\ \text{mA}$  ให้แก่วงแหวน ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศเดียวกันกับทิศ ของแมกนีไทเซชันของหัววัด ซึ่งภายนอกวงแหวนจะมีแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ และพื้น รูปภาพแม่เหล็กสีดำคือบริเวณที่มีแรงแม่เหล็กเป็นลบ ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กของวง แหวนจะขึ้นกับทิศของกระแสไฟฟ้า

การสอบเทียบสนามแม่เหล็กของวงแหวนจะทำได้โดยพิจารณาวงแหวนที่มี เส้นผ่าศูนย์กลาง  $5\ \mu\text{m}$  โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่วงแหวน  $5\ \text{mA}$  เพื่อแทนระยะห่างระหว่าง หัววัดและวงแหวน ซึ่งเป็นระยะที่ไม่ทราบค่าคงที่ของสปริงและค่าประสิทธิภาพของคาน MFM โดยการใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานและระยะห่างระหว่างหัววัดและ วงแหวน ทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กยังผล (effective magnetic moment :  $m_z$ ) และ ประจุแม่เหล็กยังผล (effective magnetic charge :  $q$ ) เท่ากับ  $m_z/q = 11\ \mu\text{m}$  โดยจะ พิจารณาระยะห่างระหว่างหัววัดและวงแหวนตั้งแต่  $0.2\ \mu\text{m}$  ขึ้นไปเนื่องจากต้องการพิจารณา หัววัด MFM ในรูปแม่เหล็กขั้วคู่ และจะทำการตรวจสอบ  $m_z$  ด้วยการตอบสนองต่อสัญญาณ MFM ที่ตำแหน่งกึ่งกลางวงแหวนซึ่งสัญญาณ MFM ที่ได้จะขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงแหวนในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งกล่าวได้ว่าแมกนีไทเซชันของหัววัดจะคงที่เมื่อสนามแม่เหล็ก ของวงแหวนเพิ่มขึ้น โดยจะแทนค่าตัวแปรที่ได้หาสนามแม่เหล็กออกมา และนำค่า สนามแม่เหล็กที่ได้ไปสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์กับสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM



รูปที่ 2.31 วงแหวนกระแสไฟฟ้าในระดับไมโครเมตร [35] (a) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวนเท่ากับ 1 μm และ (b) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในวงแหวนเท่ากับ 5 μm (ค) วงแหวนที่ได้จากการกระบวนการสร้างด้วย EBL (ง) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

แต่อย่างไรก็ตาม การสอบเทียบสนามแม่เหล็กของวงแหวนไม่สามารถนำมาสอบเทียบสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กได้ เนื่องจากรูปทรงของวงแหวนและหัวเขียนไม่เหมือนกัน ดังนั้นการสอบเทียบสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจึงต้องอาศัยวิธีการจำลองหัวเขียนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกับสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจริง ซึ่งวิธีการสอบเทียบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นจากนักวิจัยชื่อ Y.J. Chen และคณะ [3] ในปี ค.ศ. 2008 ได้ทำการศึกษาการกระจายของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ใช้บันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีขั้วและไม่มีขั้วในเชิงปริมาณ โดยการทดลองจะใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคาน ( $\Delta f$ ) ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองของคานในรูปของความถี่กับแรงแม่เหล็กของหัวเขียน  $\left( F \propto \int_z (\Delta f)^* dz \right)$  และยังมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก  $\left( H_z \propto \int_z (\Delta f)^* dz \propto \int_z F^* dz \right)$  ซึ่งนักวิจัยได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ความสูงทุกระดับตั้งแต่ระดับความสูงของการตรวจวัดหัวเขียนที่ 20 nm จนถึงระดับ

ความสูงที่การเปลี่ยนแปลงความถี่ของคานเท่ากับศูนย์ (ซึ่งอยู่ในระดับความสูง 200 nm) การคำนวณหาปริมาณของสนามแม่เหล็กจะทำได้โดยคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูง 20 nm เพื่อนำไปสอบเทียบกับสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตรวจวัดในระดับความสูงเดียวกัน ซึ่งการสอบเทียบดังกล่าวสามารถทำให้ทราบถึงสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณ

การทบทวนงานวิจัยต่างๆ ทำให้ผู้วิจัยศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน โดยการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กทั้งในเชิงคุณภาพและในเชิงปริมาณ ซึ่งหลักการการตรวจวัดหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะกล่าวไว้ในบทต่อไป



### บทที่ 3

#### หลักการของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ศึกษาหัวเขียนแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในรูปแบบเกรเดียนท์แรงแม่เหล็ก

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย ซึ่งจะอธิบายถึงการตรวจวัดหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ขั้นตอนการจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับการตรวจวัดหัวเขียน พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย โหมดการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก การพิจารณาการตอบสนองของหัววัดแม่เหล็ก การสร้างรูปภาพแม่เหล็ก ข้อมูลของหัวเขียนแม่เหล็ก และการพิจารณาข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

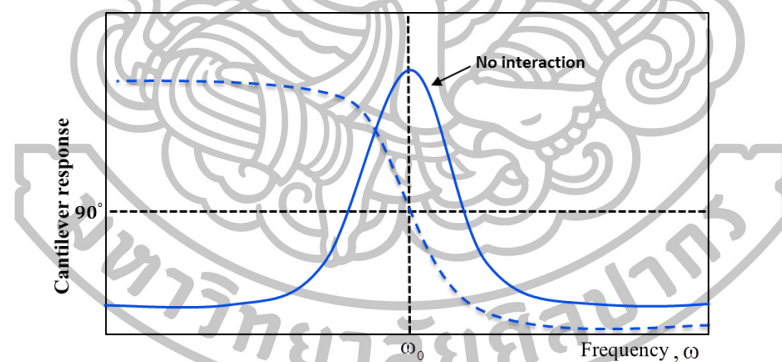
#### 3.1 การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

##### 3.1.1 ขั้นตอนการจัดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับการตรวจวัดหัวเขียน

การจัดตั้งเครื่องมือเพื่อศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทำได้โดยกำหนดการสั่นของคานด้วยการป้อนความถี่ให้เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของคาน ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 61.967 kHz เพื่อให้คานสั่นที่แอมพลิจูดสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงเฟสสามารถสังเกตได้ง่าย (ในกรณีที่ยังไม่มีแรงภายนอกมากระทำ) ถ้าแสงเลเซอร์ที่ถูกปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบบนปลายคานและสะท้อนไปยังหน้าจอ PSD ในตำแหน่งกึ่งกลางโดยวัดสัญญาณออกมาในรูปโวลต์ซึ่งจะสัมพันธ์กับแอมพลิจูดของการสั่นดังรูปที่ 3.1 พารามิเตอร์อื่นๆ จะถูกกำหนดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

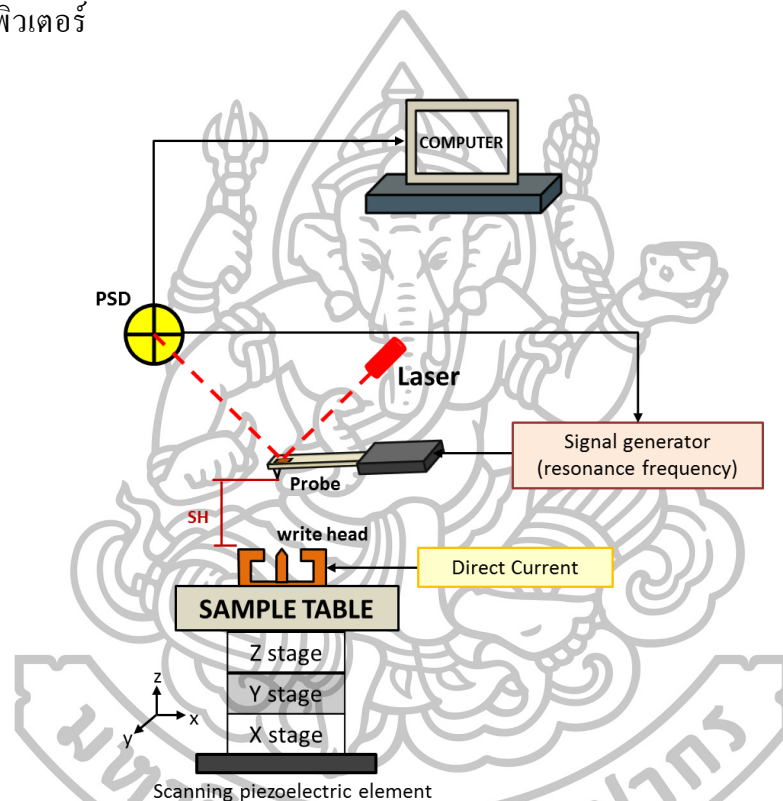
Parameter	Value
Scan height (nm)	$\geq 10$
Resonance frequency (kHz)	61.967000
MFM Oscillation amplitude (mV)	$200 \pm 1\%$
MFM Speed x (V/sec)	70.72909
MFM Speed y (V/sec)	76.29139
Scan size x (nm)	3.125
Scan size y (nm)	6.25
Resolution x (pixel)	256
Resolution y (pixel)	64
Area (nm)	$800 \times 400$
Current (mA)	10-60
Piezo step x (mV)	4.911742
Piezo step y (mV)	2.649007



รูปที่ 3.1 การตั้งค่าความถี่ของคานแม่เหล็กให้สั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์

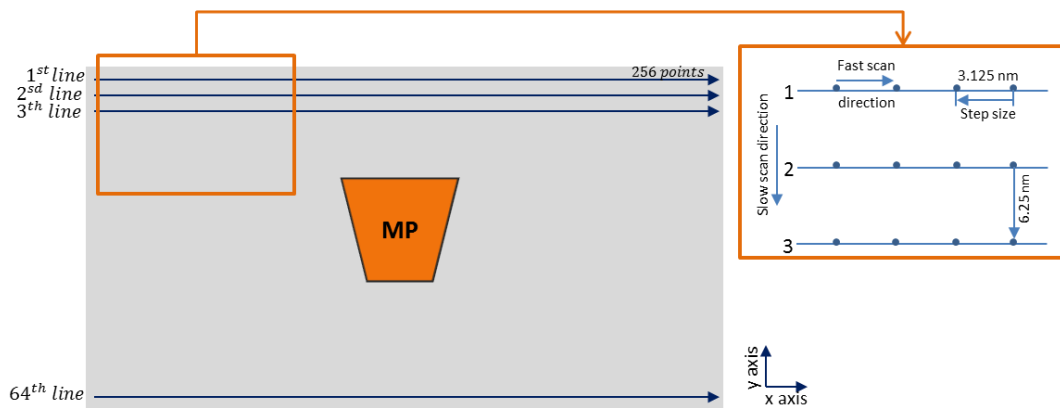
การตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กในหัวเขียน ให้มีทิศพุ่งเข้าหรือออกภายในขดลวดตามทิศทางของกระแสไฟฟ้า การทดลองจะกำหนดให้หัวเขียนแม่เหล็กอยู่ในตำแหน่งคงที่ หัววัดแม่เหล็กที่สั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์จะถูกวางไว้บนหัวเขียนแม่เหล็กในระยะห่างคงที่ เรียกระยะห่างดังกล่าวว่า ความสูงของการสแกน (scan height : SH) ในที่นี้เท่ากับ 10 nm การจัดตั้งการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 หัววัดเคลื่อนที่ตรวจวัดไป

บนหัวเขียนแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนจะกระทำต่อหัววัด ทำให้คานเกิดการโค้งงอ ลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนปลายคานจะสะท้อนไปยัง PSD ทำให้ลำแสงเลเซอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปในแนวแกน z ส่งผลให้สัญญาณที่ตรวจวัดเปลี่ยนแปลงไปจากสัญญาณเดิม โดยสัญญาณที่วัดได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของแรงแม่เหล็กในบริเวณที่ตรวจวัดซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีการตอบสนองของคานที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถนำผลที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM มาสร้างเป็นรูปภาพแม่เหล็กโดยแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.2 การจัดตั้งอุปกรณ์ของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับตรวจวัดหัวเขียน

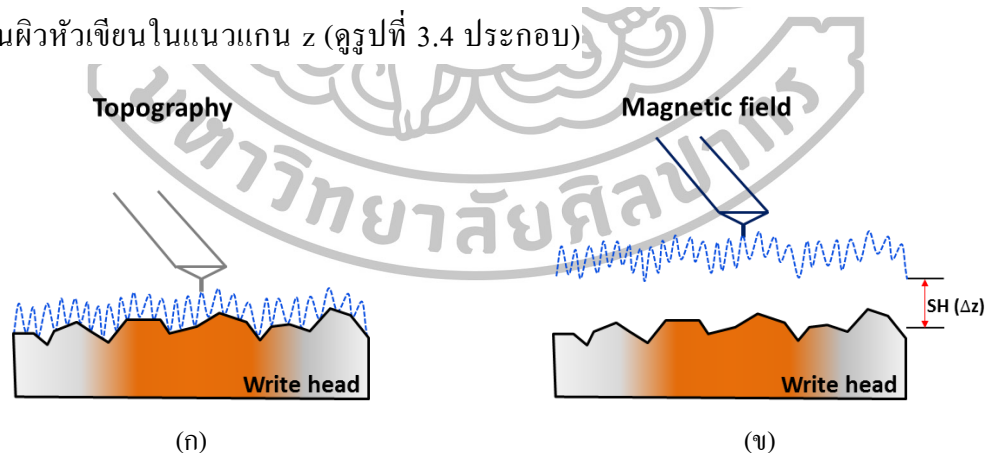
ขั้นตอนการสร้างรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนทำได้โดยกำหนดพื้นที่ของหัวเขียนให้มีขนาด  $800 \times 400 \text{ nm}$  เพื่อให้ครอบคลุมตำแหน่งของโพลหลักของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยแบ่งความละเอียดของข้อมูลที่ถูกตรวจวัดบนหัวเขียนในแนวแกน x และ y เป็น 256 pixel และ 64 pixel ตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่างตำแหน่งข้อมูลที่ถูกตรวจวัดในแนวแกน x และ y เท่ากับ  $3.125 \text{ nm}$  และ  $6.25 \text{ nm}$  ตามลำดับ เส้นทางการสแกนของคานแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เส้นการสแกนและลำดับของการสแกน จากตำแหน่งบนซ้ายไปขวาของพื้นที่หัวเขียน ในรูปเล็กคือระยะห่างของการวัดข้อมูลในแต่ละตำแหน่งทั้งในแนวแกน x และในแนวแกน y

### 3.1.2 ขั้นตอนการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก

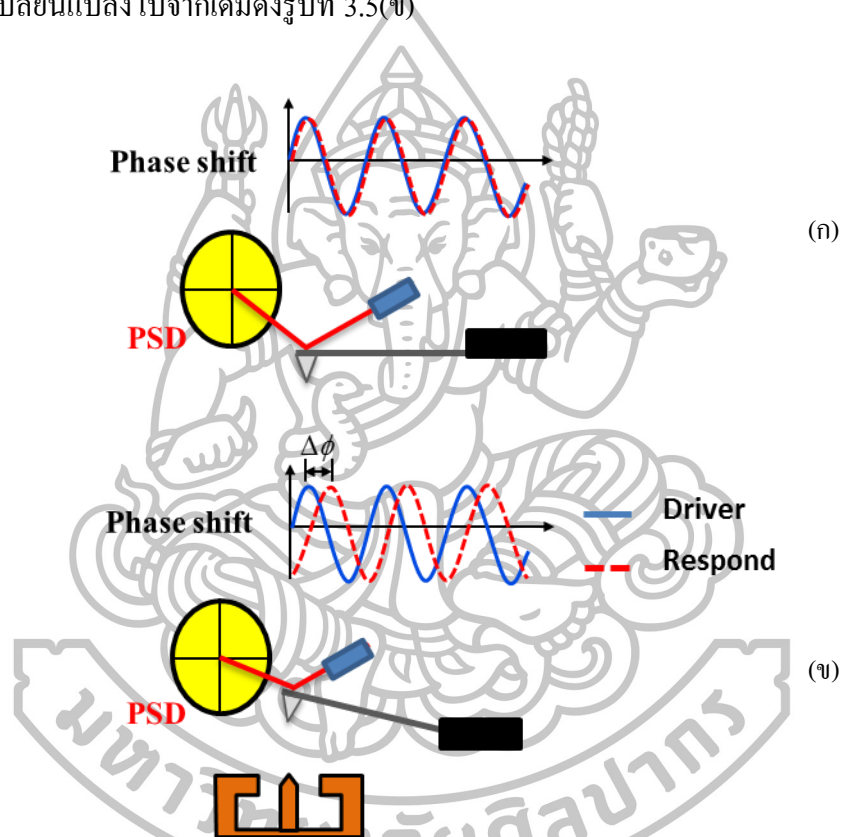
การตรวจวัดด้วย MFM จะใช้โหมดการตรวจวัดแบบการสแกนควบคู่ (Duo scan) ซึ่งประกอบด้วยการสแกนในโหมดกึ่งสัมผัสและโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ โดยการสแกนครั้งแรกจะสแกนแบบ AFM ด้วยโหมดกึ่งสัมผัส หัววัดจะไปบนพื้นผิวของหัวเขียนแม่เหล็กและบันทึกระดับความสูงของพื้นผิว โดยนำเอาระดับความสูงของพื้นผิวดังกล่าวมาใช้อ้างอิงระดับความสูงของการสแกน ในการสแกนครั้งที่สองซึ่งจะใช้โหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ ในโหมดนี้หัววัดยกขึ้นเหนือหัวเขียนที่ระยะห่างจากพื้นผิวหัวเขียนในแนวแกน z (ดูรูปที่ 3.4 ประกอบ)



รูปที่ 3.4 การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) การสแกนครั้งแรกด้วยโหมดการตรวจวัดแบบกึ่งสัมผัส (ข) การสแกนครั้งที่สองเป็นการสร้างรูปภาพแม่เหล็กด้วยการสแกนแบบไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ โดยบริเวณสีส้มคือตำแหน่งที่มีสนามแม่เหล็กมาก และบริเวณสีเทาคือบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กน้อย [36]



ในขณะที่ทำการสแกนครั้งที่สอง หัววัดจะสแกนไปทั่วทั้งหัวเขียนเพื่อสร้างรูปภาพแม่เหล็กคานจะโค้งงอตามการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ซึ่งให้ผลออกมาในรูปแบบแอมพลิจูดและเฟสของคานที่เปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นการสั่นของคานก่อนการตรวจวัดบนหัวเขียนแม่เหล็ก คานจะสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ตลอดเวลาทำให้แอมพลิจูดและเฟสของคานมีค่าคงที่ดังรูปที่ 3.5(ก) เมื่อหัววัดสแกนไปบนหัวเขียนแม่เหล็กในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กคานจะเกิดการตอบสนองต่อแรงเกรเดียนท์แม่เหล็กด้วยการสั่นที่เปลี่ยนไป ทำให้แอมพลิจูดและเฟสของคานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังรูปที่ 3.5(ข)

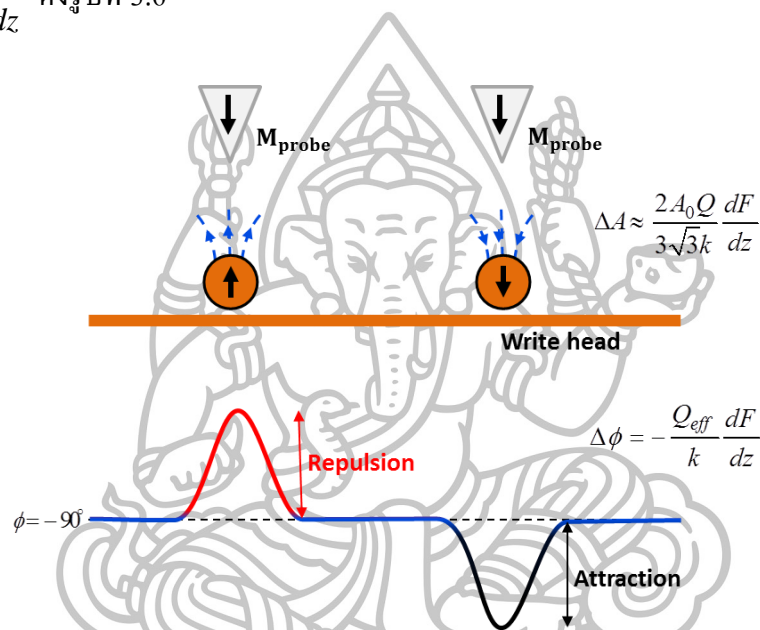


รูปที่ 3.5 การสั่นของคาน (ก) กรณีที่คานไม่มีแรงภายนอกมากระทำ (ข) กรณีที่คานถูกแรงภายนอกจากวัตถุกระทำ

### 3.1.3 การพิจารณาการตอบสนองของหัววัดแม่เหล็ก

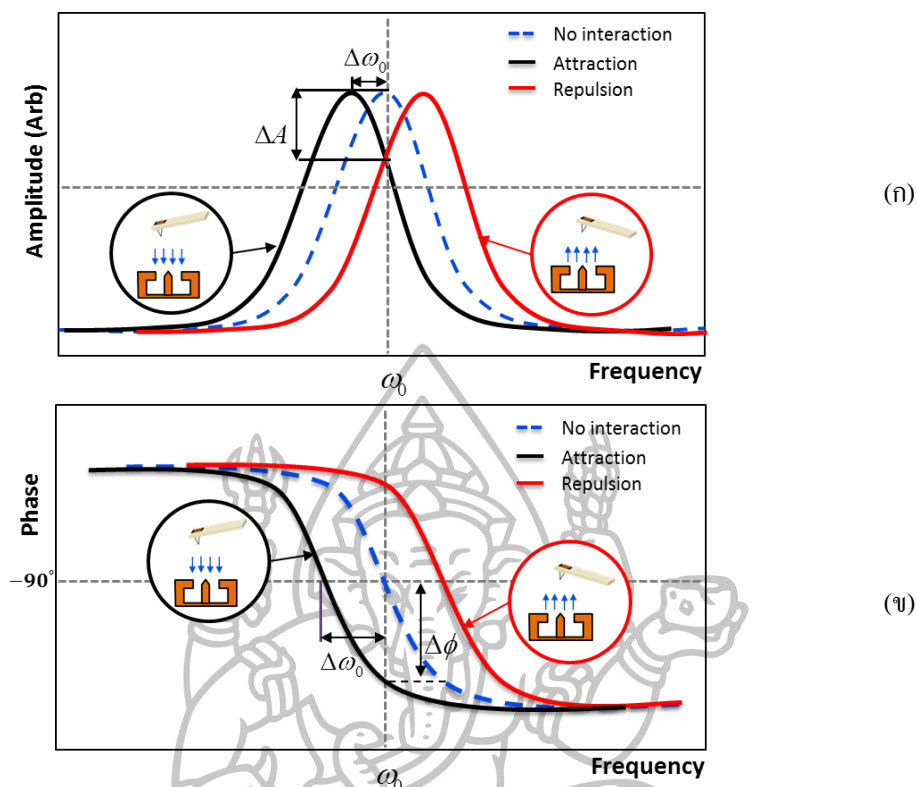
เมื่อพิจารณาแต่ละตำแหน่งการตรวจวัดของหัววัดที่มีแรงแม่เหล็กจากหัวเขียนมากระทำ ทิศของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนกระทำต่อหัววัดจะเปลี่ยนแปลงเมกนีโทเซชันของหัววัดเนื่องจากแรงดูดและแรงผลักทำให้คานเกิดการโค้งงอ เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูด เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับเกรเดียนต์ของแรงแม่เหล็ก

$$\Delta\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2k} \frac{dF}{dz} \quad \text{ดังรูปที่ 3.6}$$



รูปที่ 3.6 การตอบสนองของหัววัดแม่เหล็กในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟส [37]

เมื่อพิจารณาการตอบสนองของคานต่อเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กในรูปของความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง  $\Delta\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2k} \frac{dF}{dz}$  จะเห็นว่ากรณีเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อคานเป็นบวก  $dF/dz > 0$  อันตรกิริยาของหัวเขียนกระทำต่อหัววัดจะเป็นแรงดูดทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ใหม่เลื่อนไปทางด้านลบ ( $\Delta\omega_0 < 0$ ) และกรณีที่เกรเดียนต์แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อคานเป็นลบ  $dF/dz < 0$  อันตรกิริยาของหัวเขียนกระทำต่อหัววัดจะเป็นแรงผลักทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ใหม่เลื่อนไปทางด้านบวก ( $\Delta\omega_0 > 0$ ) ดังรูปที่ 3.7(ก) และ 3.7(ข) ตามลำดับ

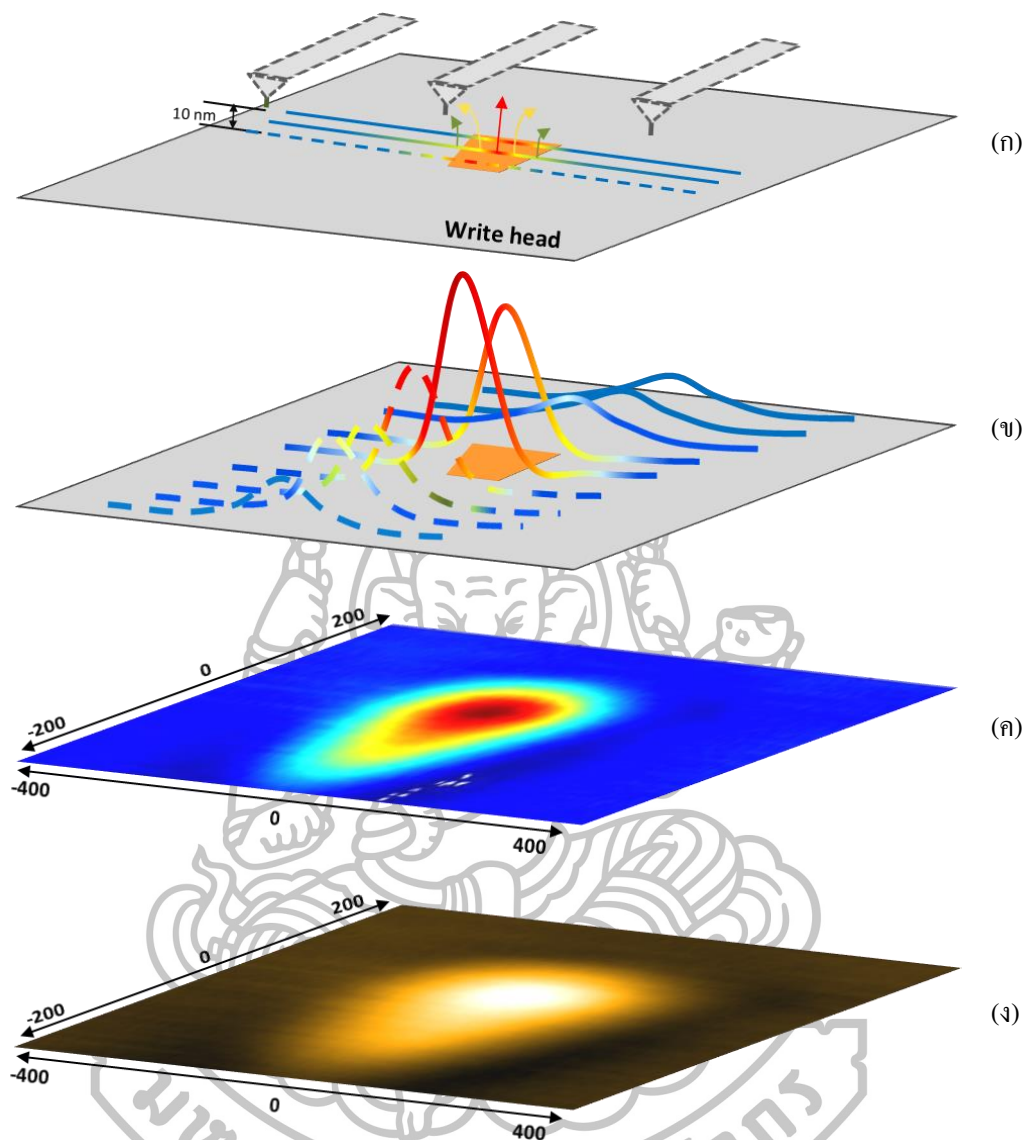


รูปที่ 3.7 การสั่นของคานที่ความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากแรงดูดและแรงผลัก (ก) การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคาน (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน [38]

### 3.1.4 การสร้างรูปภาพแม่เหล็ก

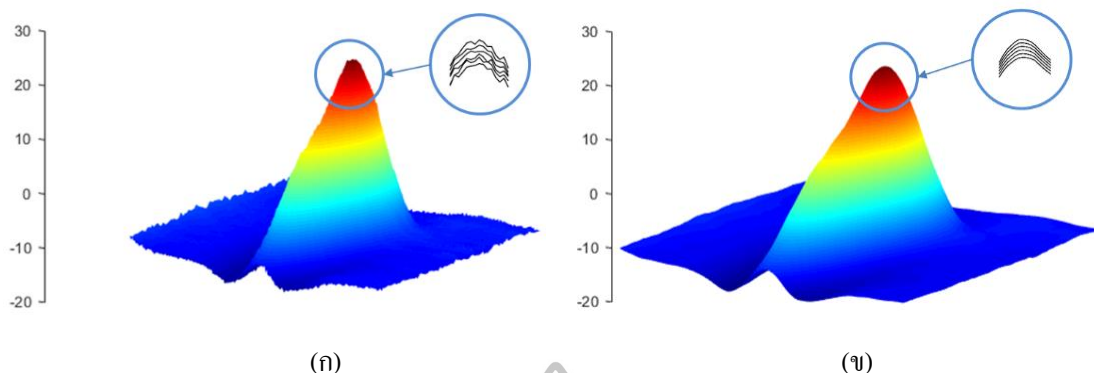
เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของคานกับความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นคานดังรูปที่ 3.7 จะเห็นว่ากรณีที่พิจารณาอันตรกิริยาระหว่างหัววัดและหัวเขียนทั้งแรงดูดและแรงผลักจะทำให้ค่าแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเท่ากับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานซึ่งสามารถแยกประเภทของแรงได้

เมื่อหัววัด สแกนไปบนหัวเขียนแม่เหล็กทั่วทั้งพื้นที่จะได้เฟสที่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.8(ข) ซึ่งจะเห็นว่าเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีค่ามากในบริเวณที่มีหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อเฟสที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนมาพล็อต โครงร่างพื้นผิว (surface plot) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) เพื่อสร้างรูปภาพแม่เหล็กจะได้ดังรูปที่ 3.8(ค) ซึ่งมีความสอดคล้องกับตำแหน่งและลักษณะของหัวเขียนแม่เหล็ก



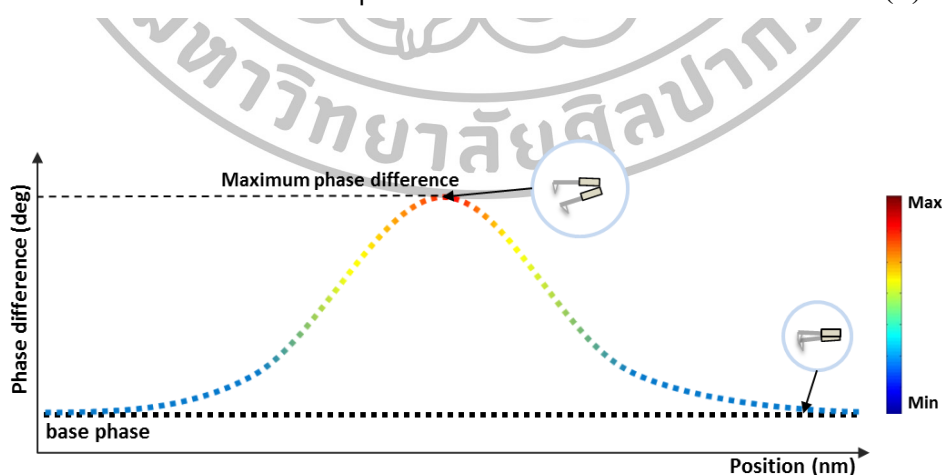
รูปที่ 3.8 การสร้างรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียน (ก) ลักษณะการวัดหัวเขียนแม่เหล็กในแนวแกน x [39] โดยระยะห่างระหว่างหัววัดกับหัวเขียนห่างกัน 10 nm (ข) ค่าความต่างเฟสที่วัดได้ในแต่ละแนวการสแกน (ค) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการพล็อตค่าความต่างเฟสของหัวเขียนแม่เหล็ก (ง) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจะพิจารณาในตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุด โดยในการวิเคราะห์ ข้อมูลดิบจะถูกนำมาเฉลี่ยเพื่อลดปัญหาการวัดที่คลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรม MATLAB แสดงไว้ในภาคผนวก (ก)



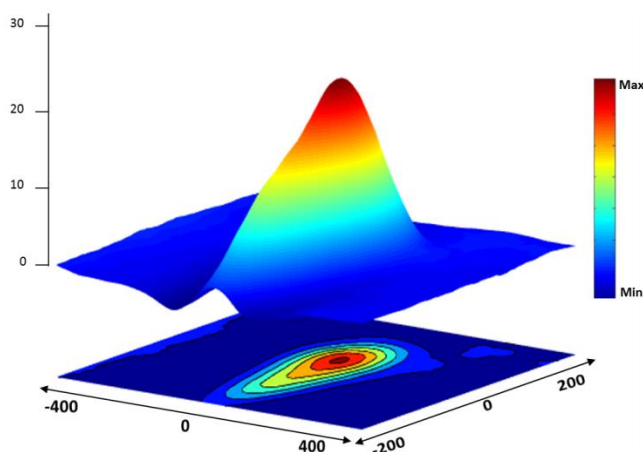
รูปที่ 3.9 รูปภาพแม่เหล็ก (ก) ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยตรง (ข) ข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ย

การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานจะอยู่ในรูปค่าความต่างเฟส (phase difference) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงให้เห็นถึงแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อคาน โดยกำหนดให้คานที่สั้นที่ความถี่เรโซแนนซ์เริ่มต้น ( $\phi = -90^\circ$ ) มีค่าความต่างเฟสเท่ากับศูนย์เรียกว่าค่าเฟสอ้างอิง (base phase) ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงด้วยจุดสีดำ เส้นของเฟสอ้างอิงสร้างขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของคานเมื่อหัววัดตรวจวัดบนหัวเขียนแม่เหล็ก ดังนั้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคานในรูปเฟสที่เปลี่ยนแปลงจึงพิจารณาจากค่าความต่างเฟส โดยค่าความต่างเฟสที่ใกล้เคียงกับค่าเฟสอ้างอิงจะบ่งบอกถึงบริเวณของการตรวจวัดนั้นมีแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดมีค่าน้อยมากๆ หรือไม่มีแรงแม่เหล็กเลย ซึ่งค่าความต่างเฟสในตำแหน่งการตรวจวัดนี้จะแสดงด้วยจุดข้อมูลสีน้ำเงิน กรณีที่มีการตรวจวัดที่ตำแหน่งที่ให้ค่าความต่างเฟสมากๆ จะแสดงด้วยจุดข้อมูลสีแดง ซึ่งระดับของค่าความต่างเฟสจะแสดงด้วยเฉดสีต่างๆ รายละเอียดของโปรแกรมไว้ในภาคผนวก (ข)



รูปที่ 3.10 ค่าความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆ บนหัวเขียนแม่เหล็ก

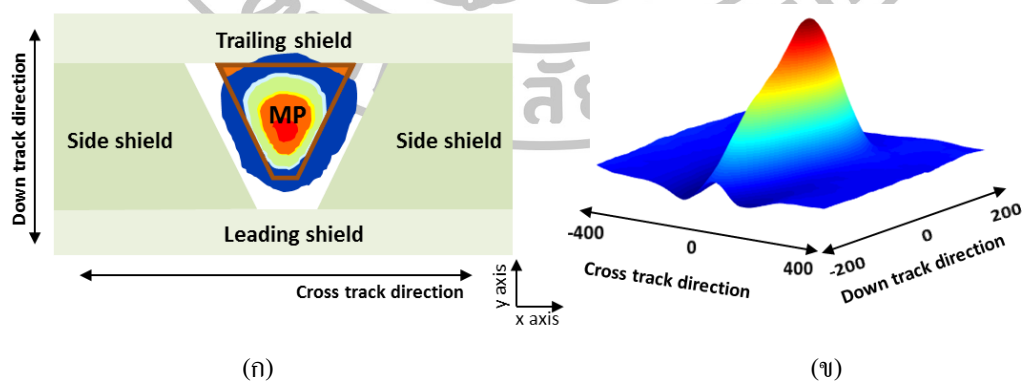
เมื่อนำค่าความต่างเฟสที่แต่ละตำแหน่งมาพล็อตรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนแบบสามมิติจะได้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณที่ค่าความต่างเฟสมีค่ามากจะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางเมื่อเทียบกับตำแหน่งจริงของหัวเขียน หมายความว่าบริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่าตำแหน่งอื่น



รูปที่ 3.11 รูปภาพแม่เหล็กในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานแบบสามมิติ

### 3.1.5 ข้อมูลของหัวเขียนแม่เหล็ก

การพิจารณาข้อมูลแม่เหล็กของหัวเขียนจะแบ่งออกเป็นสองแนวได้แก่ ข้อมูลในแนวครอสแทร็ค (Cross track direction) และข้อมูลในแนวดาวน์แทร็ค (Down track direction) ซึ่งเป็นข้อมูลที่อยู่ในแนวแกน x และแนวแกน y ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.12 ประกอบ)



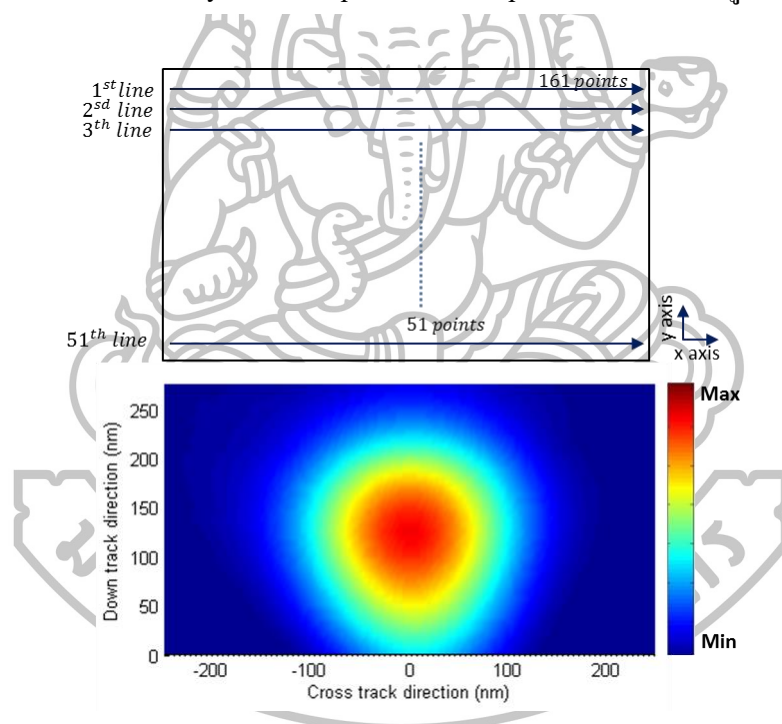
รูปที่ 3.12 ข้อมูลของหัวเขียนแม่เหล็กในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค (ก) ทิศทางข้อมูลเมื่อเทียบกับตำแหน่งของหัวเขียนแม่เหล็ก (ข) ทิศทางข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม



การพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนจะพิจารณาจากตำแหน่งที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุด ดังนั้นในการวิเคราะห์สามารถเลือกข้อมูลในแนวครอสแทร็คหรือคาน์แทร็คมาพิจารณาก็ได้ (ในการวิจัยนี้เลือกใช้การพิจารณาจากข้อมูลในแนวครอสแทร็ค)

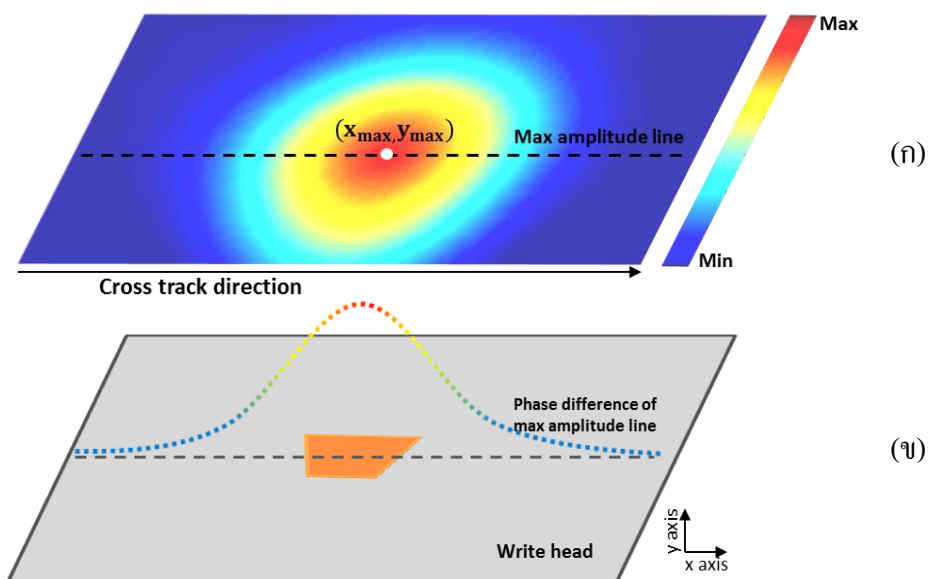
### 3.2 การพิจารณาข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

การตรวจวัดด้วย MFM ในแต่ละครั้งจะมีตำแหน่งของค่าความต่างเฟสสูงสุดไม่ตรงกัน ดังนั้นจึงต้องปรับตำแหน่งค่าเฟสสูงสุดของข้อมูลให้ตรงกัน โดยจะกำหนดพื้นที่ของหัวเขียนแม่เหล็กให้มีขนาด  $503.125 \times 318.75$  nm (ขนาดของหัวเขียนที่ถูกปรับพิจารณาจากพื้นที่ของหัวเขียนที่ต่ำสุดที่ครอบคลุมรูปภาพแม่เหล็กบริเวณหัวเขียน) และความละเอียดของข้อมูลในแนวแกน x และ y เป็น 161 pixel และ 51 pixel ตามลำดับดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การปรับตำแหน่งพื้นที่เพื่อเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแต่ละขนาด

การเลือกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้พิจารณาข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแทร็คซึ่งอยู่ในตำแหน่งจุดสีขาว ( $x_{\max}, y_{\max}$ ) โดยดึงเอาข้อมูลตามเส้นปะมาเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความต่างเฟสที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 3.14 (ข)



รูปที่ 3.14 การเลือกข้อมูลในแนวครอสแทร็คที่มีแอมพลิจูดสูงสุด (ก) รูปภาพแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM โดยเส้นประสีดำคือค่าข้อมูลในแนวครอสแทร็คที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ (ข) ข้อมูลในแนวครอสแทร็คที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด

ข้อมูลของความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแทร็คที่ตรวจวัดได้ จะนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ในการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็ก เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ผลในบทต่อไป





## บทที่ 4

### การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวใจเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ตลาดในปัจจุบันของการเก็บบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording) เริ่มถูกแย่งชิงพื้นที่ทางการค้าจากการเก็บบันทึกข้อมูลแบบโซลิดสเตต (solid state recording) [40] ที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพลังงาน และสะดวกในการใช้งาน ส่งผลให้อุตสาหกรรมผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ได้รื้อฟื้นพัฒนาเทคโนโลยีในการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นความจุข้อมูลให้มีขนาดสูงขึ้นเพื่อรักษาส่วนแบ่งทางการตลาดด้านการเก็บรักษาข้อมูล ดังนั้นนักวิจัยและนักพัฒนาจึงได้มีการพัฒนาหัวใจเขียนแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กลง แต่ยังคงสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงเพียงพอ ปัญหาที่ตามมา คือ ขั้นตอนการตรวจสอบหัวใจเขียนที่มีขนาดเล็กในกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

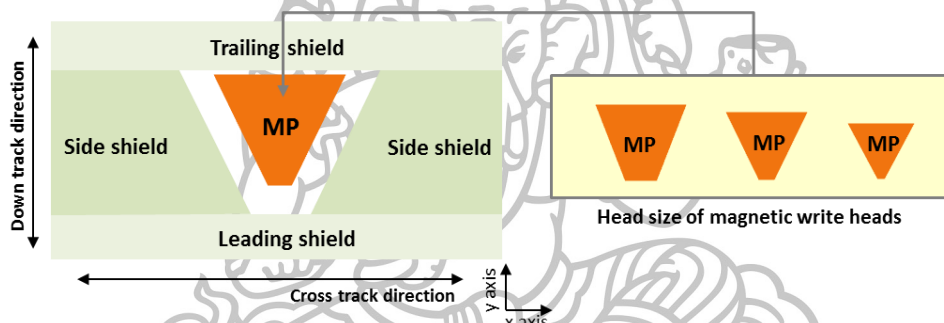
จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้ผ่านมา พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวใจเขียนขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ ตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดของหัวใจเขียน ความสูงของการสแกนหรือระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวใจเขียน รวมไปถึงขนาดของหัวใจเขียนแม่เหล็ก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมาใช้เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กของหัวใจเขียน ซึ่งจากที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ความต่างเฟสของคานเมื่อถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกกับสัญญาณที่ใช้กระตุ้นให้คานสั่นสามารถนำมาใช้บ่งบอกขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กเชิงคุณภาพที่ผลิตจากหัวใจเขียนได้ ในการทดลองนี้เราใช้ตัวอย่างหัวใจเขียนที่มีขนาดต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในส่วนแรก เราทำการศึกษาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กของหัวใจเขียนเมื่อถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ กัน หลังจากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของขนาดหัวใจเขียนที่มีผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในส่วนที่สอง ส่วนที่สามเป็นการพัฒนาเทคนิคในการหาความเข้มสนามแม่เหล็กเชิงปริมาณด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

#### 4.1. การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพ

หัวเขียนแม่เหล็กที่ศึกษาจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาขนาดของหัวเขียนที่แตกต่างกันจำนวน 10 ขนาดดังแสดงในตารางที่ 4.1 (การจำลองตัวอย่างของหัวเขียนที่มีขนาดแตกต่างกัน) โดยพารามิเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 4.1 หัวเขียนแม่เหล็กจำนวน 10 ขนาด

ขนาดของหัวเขียน (nm)	33.19	37.53	53.11	59.35	59.75	73.55	77.20	78.28	85.00	92.43
----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

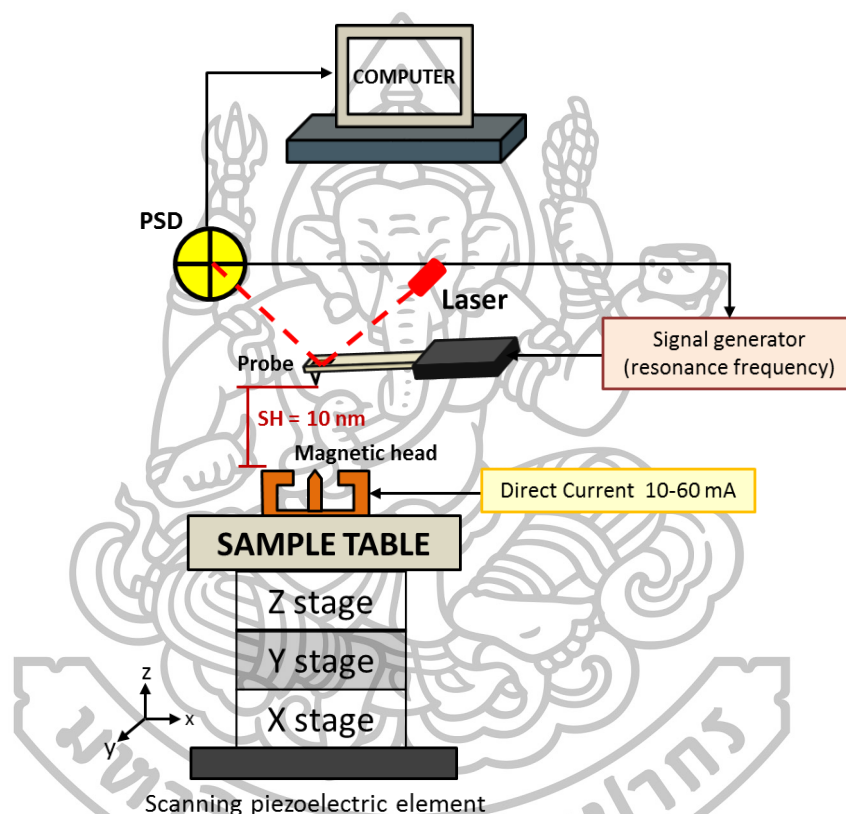


รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของพื้นของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน

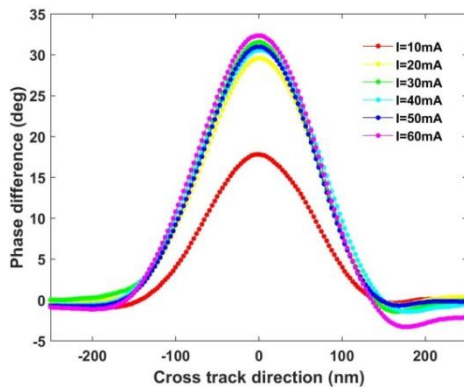
##### 4.1.1 การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้า

การเกิดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก หรือ แมกนีไทเซชันในวัสดุของหัวเขียนให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพลของหัวเขียน ในทางทฤษฎีปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดโซลินอยด์จะแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียนจึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวด

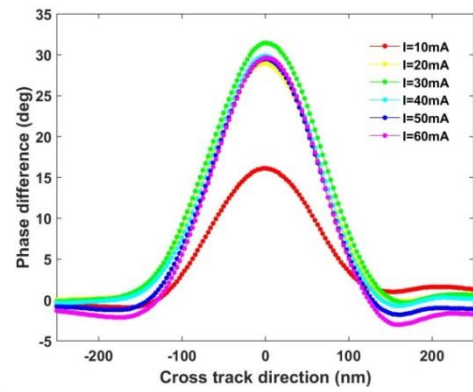
ในการทดลองนี้จะศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนตัวอย่างจำนวน 10 ขนาดด้วยการวัดค่าความต่างเฟสเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดของหัวเขียนในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 mA ถึง 60 mA โดยเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าทีละ 10 mA และกำหนดให้ความสูงของการสแกนให้อยู่ในระดับ 10 nm ดังรูปที่ 4.2 ข้อมูลที่พิจารณาอยู่ในแนวครอสแตรีกที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุด ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสไฟฟ้าของหัวเขียนทั้ง 10 ขนาดแสดงดังรูปที่ 4.3



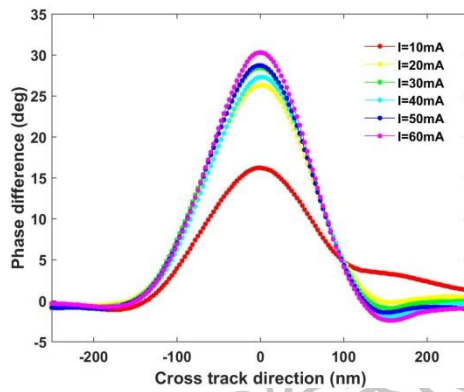
รูปที่ 4.2 แผนผังรูปภาพการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กขนาด 10 mA ถึง 60 mA



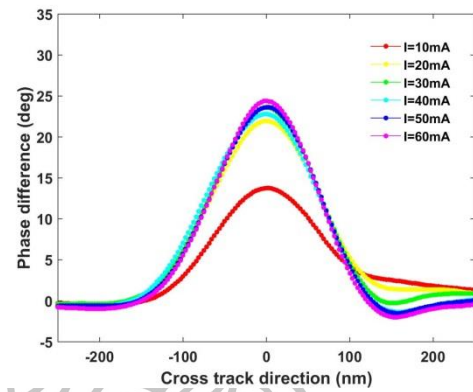
(ก)



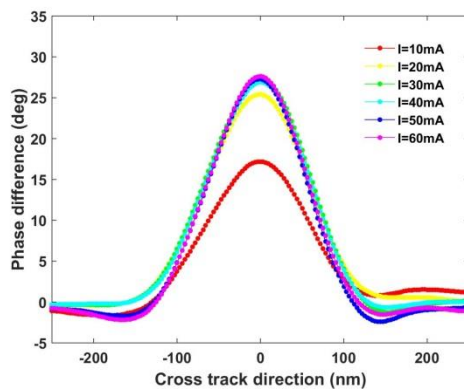
(ข)



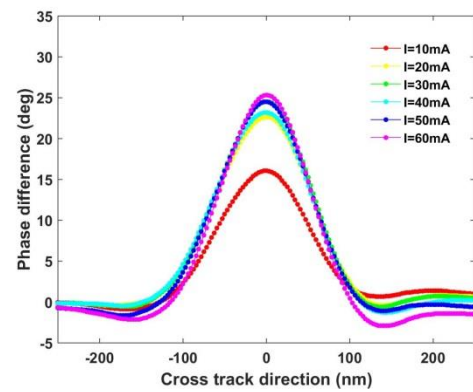
(ค)



(ง)

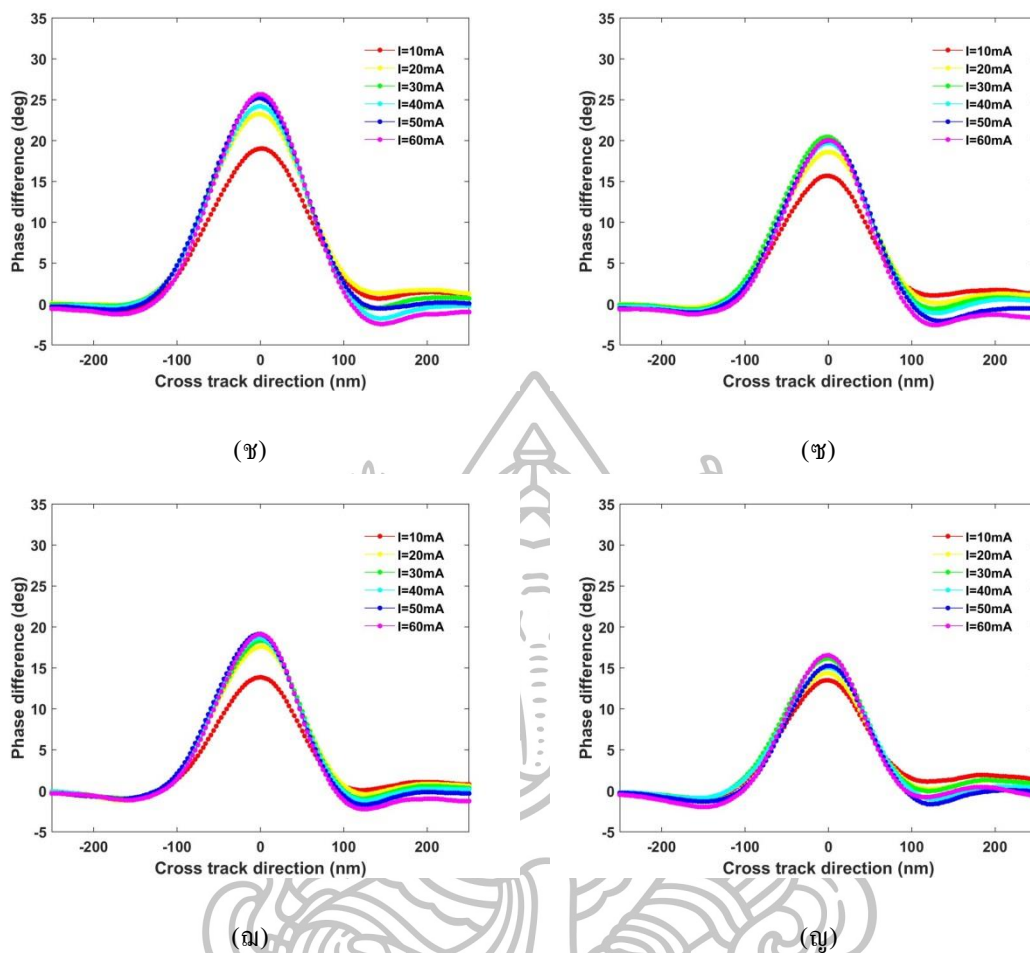


(จ)



(ฉ)

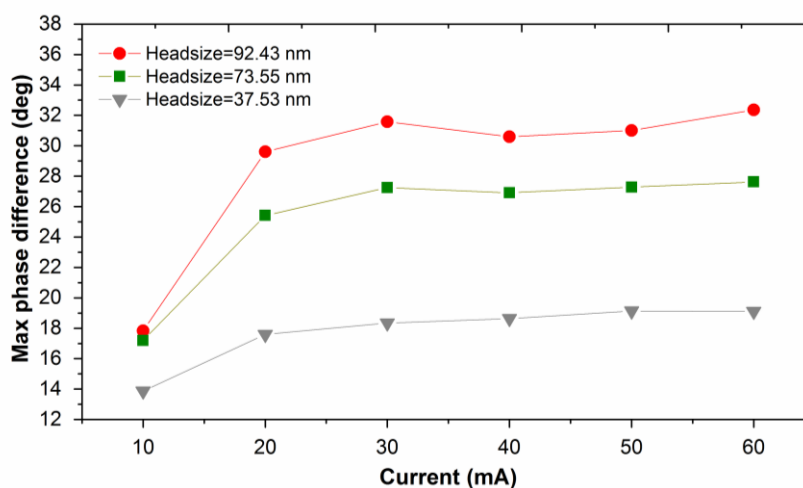
รูปที่ 4.3 การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในหัวเขียนแต่ละขนาด (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm (ง) 77.20 nm (จ) 73.55 nm และ (ฉ) 59.75 nm



รูปที่ 4.3 (ต่อ) การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของกระแสไฟฟ้าต่างๆ ในหัวเขียนแต่ละขนาด (ข) 59.35 nm (ค) 53.11 nm (ฅ) 37.53 nm และ (ง) 33.19 nm

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง โดยนำค่าความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนแม่เหล็กทั้งสามขนาด ได้แก่ หัวเขียนขนาด 92.43 73.55 และ 37.53 nm ที่กระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ มาวิเคราะห์ผลดังรูปที่ 4.4 พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขดลวดของหัวเขียนขนาด 10 mA มีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากกระแสไฟฟ้าขนาดอื่น ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\Phi$ ) ที่ออกจากหัวเขียนยังไม่อิ่มตัว ทำให้สนามแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดเกิดแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการตอบสนองของคานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดอื่นๆ ผลของความต่างเฟสที่วัดได้จึงมีค่าน้อย เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กตั้งแต่ขนาด 20 mA จนถึง 60 mA พบว่าความต่างเฟสของหัวเขียนแต่ละขนาดให้ผลใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสถานะที่หัวเขียนแม่เหล็ก

ยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มๆ ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าไม่สามารถสร้างฟลักซ์แม่เหล็กได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สภาวะแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization) ดังนั้นในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กของหัวเขียนเริ่มอิ่มตัวที่กระแสไฟฟ้าขนาด 20 mA



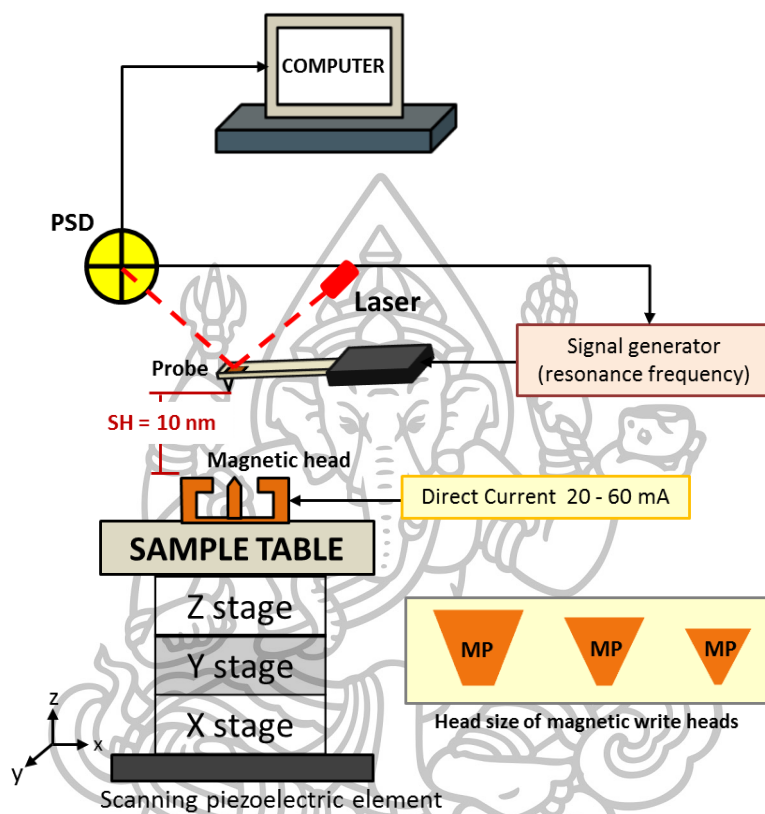
รูปที่ 4.4 ค่าความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างกัน ตั้งแต่ 10 mA จนถึง 60 mA

#### 4.1.2 การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวเขียน

จากการทบทวนงานวิจัยที่ศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนขนาดต่างๆ พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียน [41] เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนบริเวณปลายโพลจะมีปริมาณแตกต่างกันซึ่งจะขึ้นกับขนาดของหน้าตัดของหัวเขียนแม่เหล็ก ดังนั้นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนคือขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก ในหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนกับขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก

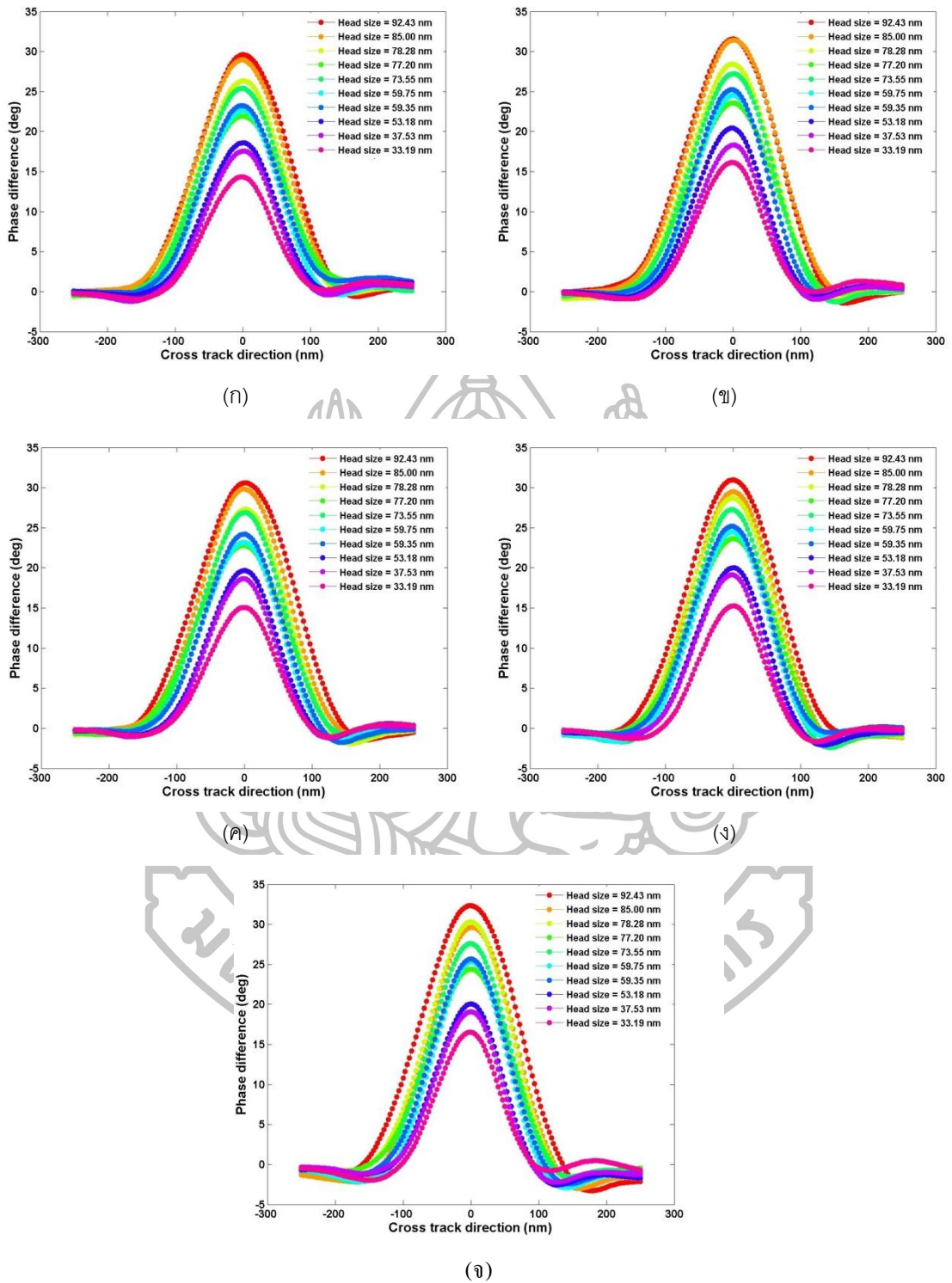
ในการทดลองนี้จะศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจำนวน 10 ขนาด ด้วยการวัดค่าความต่างเฟส โดยกำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดของหัวเขียนแม่เหล็กเท่ากับ 20 mA ถึง 60 mA (พิจารณาเฉพาะผลของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้หัวเขียนแม่เหล็กมีสภาวะแม่เหล็กอิ่มตัว เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กของกระแสไฟฟ้าขนาด 10 mA ที่จ่ายให้แก่หัวเขียนยังไม่อิ่มตัว จึงไม่พิจารณากระแสไฟฟ้าขนาด 10 mA) และระดับความสูง

ของการสแกนเท่ากับ 10 nm ดังรูปที่ 4.5 ข้อมูลที่พิจารณาอยู่ในแนวครอสแตร็คที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุด โดยผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวเขียนแม่เหล็กทั้ง 10 ขนาดที่ส่งผลต่อค่าความต่างเฟสที่กระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การตรวจวัดสนามแม่เหล็กของหัวเขียนขนาดต่างๆ โดยระยะห่างของการสแกนระหว่างหัวเขียนแม่เหล็กและหัววัดที่ระดับความสูง 10 nm

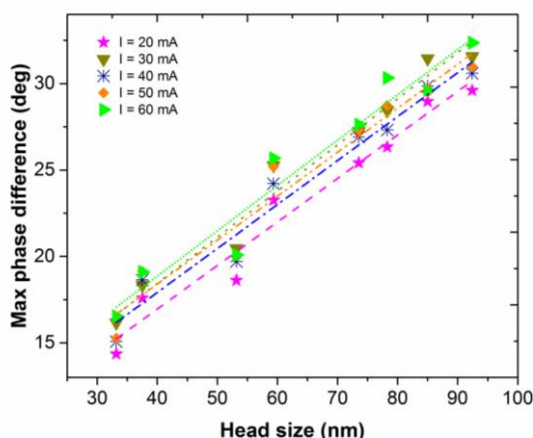




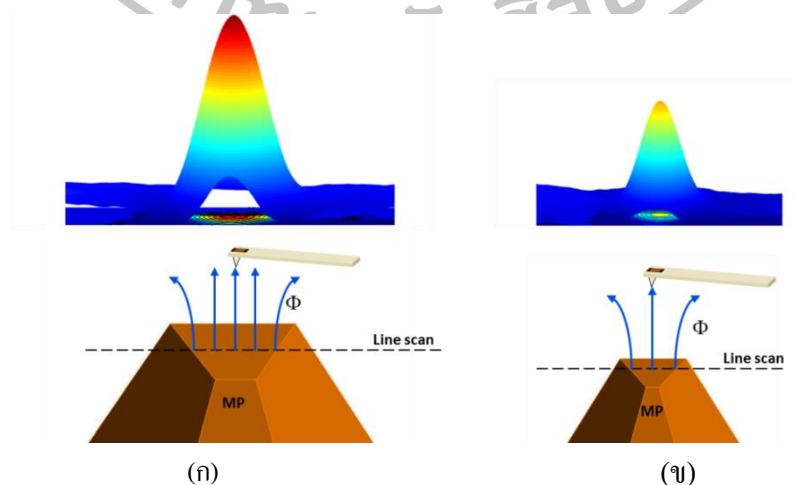
รูปที่ 4.6 การตรวจวัดความต่างเฟสในแนวครอสแทร็คที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุดที่ความสูงของการสแกน 10 nm ของหัวเขียนขนาดต่างๆ (ก) 20 mA (ข) 30 mA (ค) 40 mA (ง) 50 mA และ (จ) 60 mA



ผลการเปรียบเทียบความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนแต่ละขนาดที่กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 20 mA จนถึง 60 mA แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หัวเขียนแต่ละขนาดจะมีค่าความต่างเฟสแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียนแม่เหล็กในลักษณะเชิงเส้น โดยหัวเขียนที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความต่างเฟสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับหัวเขียนแม่เหล็กขนาดใหญ่ ผลของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวเขียนแม่เหล็กและค่าความต่างเฟสของคานนี้สามารถอธิบายได้จากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ของหัวเขียนแม่เหล็ก ( $A$ ) ในแนวตั้งฉาก ตามความสัมพันธ์  $B = \Phi/A$  ซึ่งอธิบายได้ว่าหัวเขียนที่มีพื้นที่มากจะทำให้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนมากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนที่มีขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4.8(ก) และ 4.8(ข) เมื่อหัววัดตรวจวัดบนหัวเขียนจึงทำให้ค่าความต่างเฟสของหัวเขียนขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าหัวเขียนที่มีขนาดเล็กนั่นเอง



รูปที่ 4.7 ค่าความต่างเฟสสูงสุดในหัวเขียนแต่ละขนาดที่กระแสไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.8 ฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) หัวเขียนขนาดใหญ่ (ข) หัวเขียนขนาดเล็ก

เมื่อวิเคราะห์เส้นแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมดพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าขนาด 20 mA ถึง 60 mA มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r-square) ที่ใกล้เคียง 1 ซึ่งบ่งบอกว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับค่าที่สังเกตได้ (ในเส้นแนวโน้มของข้อมูล) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.2 โดย  $x$  คือขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก (head size) และ  $y$  คือความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียน (phase difference)

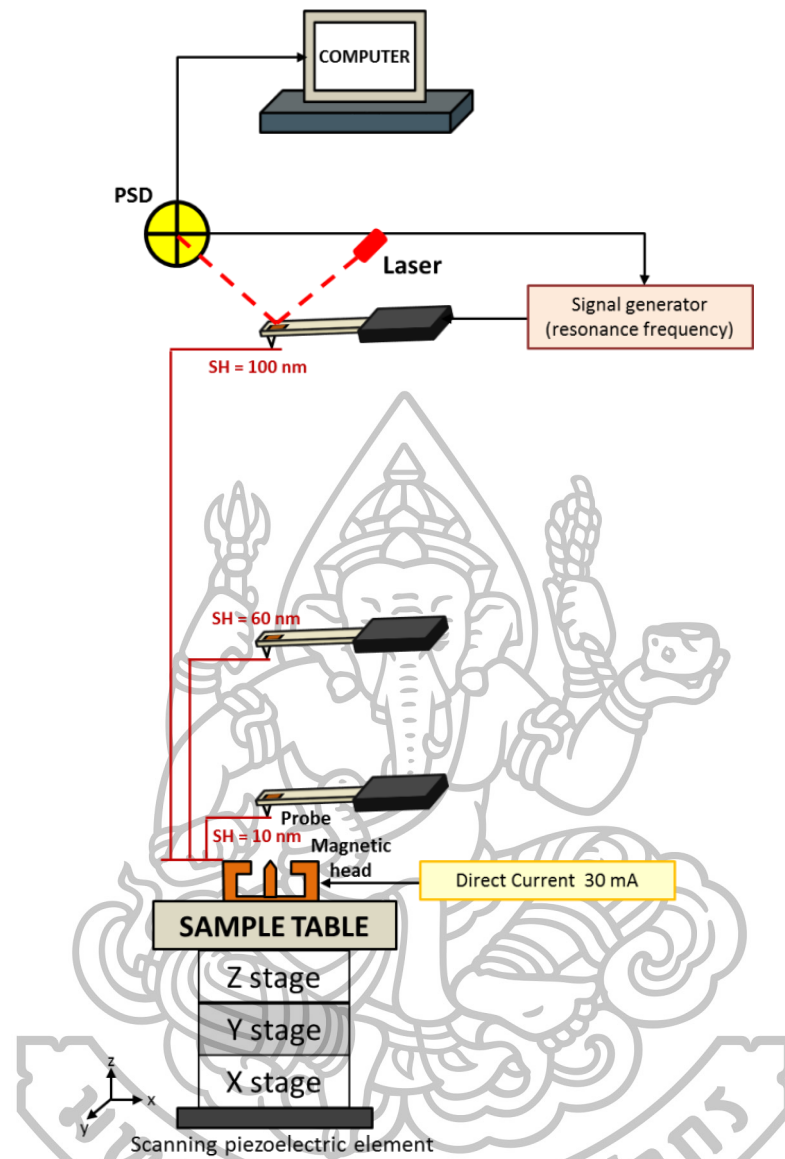
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของความต่างเฟสและขนาดความกว้างของหัวเขียนที่ขนาดกระแสไฟฟ้าต่างๆ

กระแสไฟฟ้า (mA)	ความสัมพันธ์สมการเชิงเส้น	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
20	$y = 0.2518x + 6.8822$	0.9576
30	$y = 0.2668x + 7.7739$	0.9651
40	$y = 0.2544x + 7.7405$	0.9563
50	$y = 0.2545x + 8.2162$	0.9413
60	$y = 0.2624x + 8.3624$	0.9407

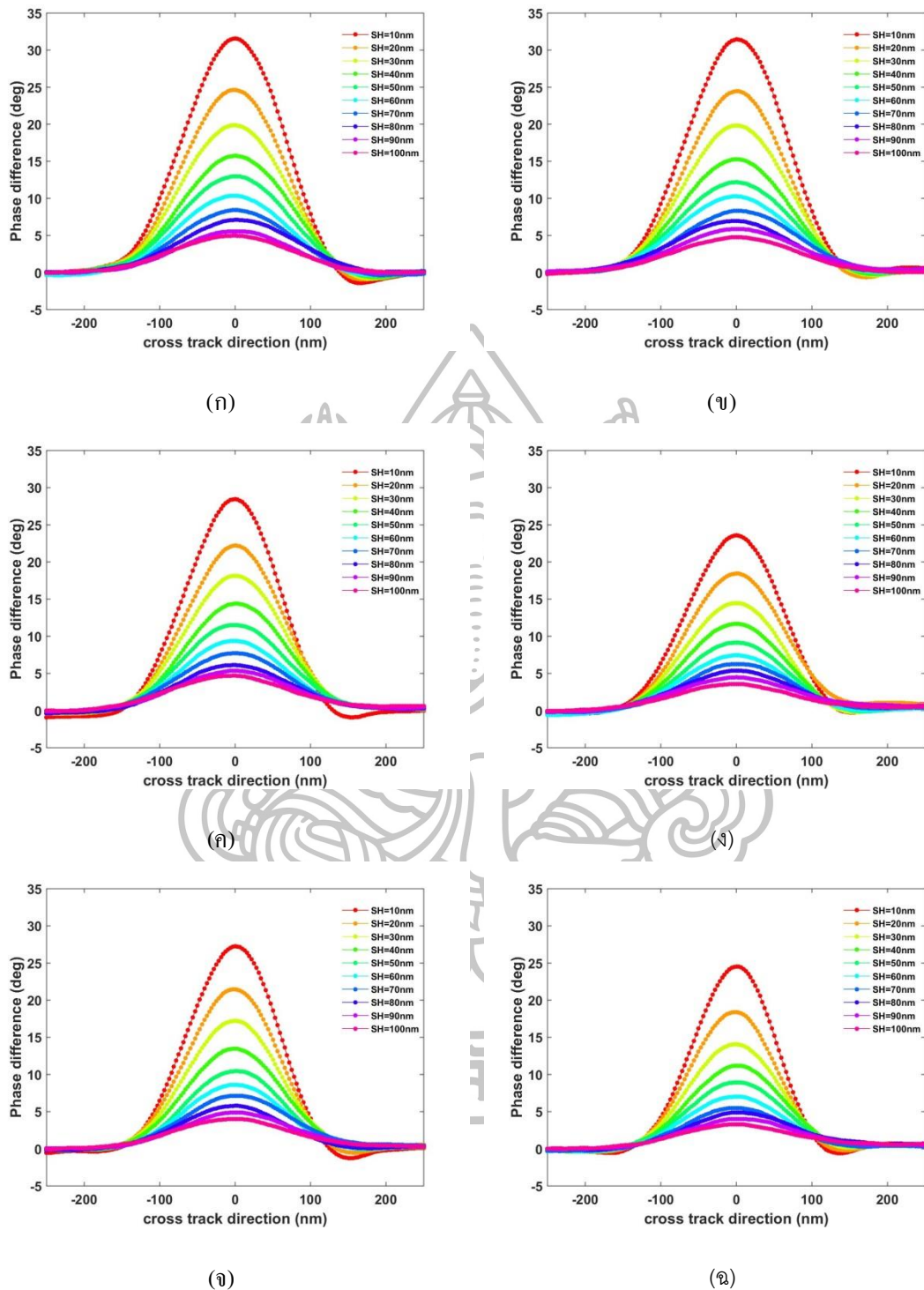
#### 4.1.3 การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนเนื่องจากระดับความสูงของการสแกน

ก่อนหน้านี้ได้มีการวิจัยเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างหัวเขียนและหัววัดที่ส่งผลต่อการตอบสนองของคานแม่เหล็ก ซึ่งนักวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความสูงของการสแกนจะไม่เป็นเชิงเส้น [2] ดังนั้นระดับความสูงของการสแกนจึงเป็นส่วนหนึ่งที่มีบทบาทต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในการทดลองนี้จึงสนใจศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนกับระดับความสูงของการสแกนที่มีผลต่อการตอบสนองของคานแม่เหล็ก

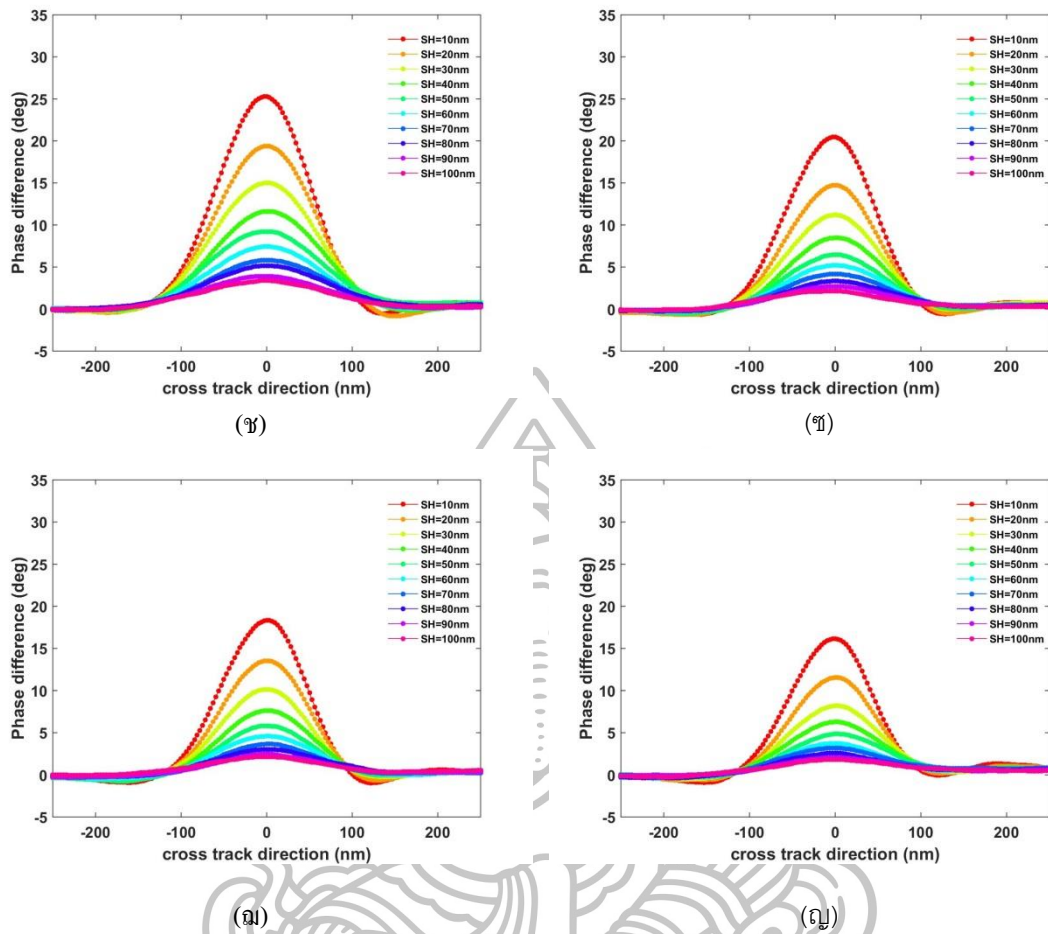
ในการทดลองนี้จะศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนตัวอย่างจำนวน 10 ขนาดด้วยการวัดค่าความต่างเฟส โดยกำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดของหัวเขียนแม่เหล็กเท่ากับ 30 mA ดังรูปที่ 4.9 ข้อมูลที่พิจารณาอยู่ในแนวโครสแตร็คที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุด การทดลองจะกำหนดระดับความสูงของการสแกนต่ำสุดที่ระดับ 10 nm และเลื่อนระดับความสูงของการสแกนทีละ 1 nm จนถึงระดับความสูงที่การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคานน้อยมากๆ (การเปลี่ยนแปลงของการสั่นของคานเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาถึงระดับความสูงของการสแกน  $SH = 100$  nm) ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของการสแกนของหัวเขียนทั้ง 10 ขนาดแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 การตรวจวัดสนามแม่เหล็กบนหัวเขียนที่ระดับความสูงต่างกัน โดยระดับความสูงของการสแกนต่ำสุดที่ 10 nm ซึ่งจะตรวจวัดไปถึงระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 100 nm (ระดับความสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสน้อยมากๆ การเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้ศูนย์)

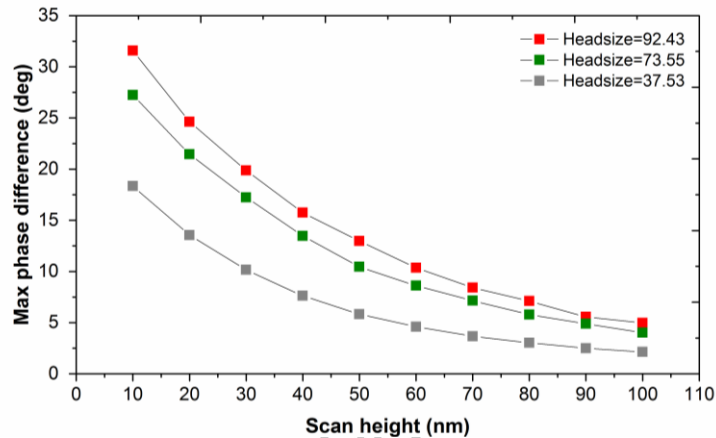


รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความสูงของการสแกนที่ระดับความสูงต่างๆ ของหัวเขียนแต่ละขนาด (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm (ง) 77.20 nm (ฉ) 73.55 nm และ (ฉ) 59.75 nm



รูปที่ 4.10 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงความสูงของการสแกนที่ระดับความสูงต่างๆ ของหัวเขียนแต่ละขนาด (ข) 59.35 nm (ค) 53.11 nm (ง) 37.53 nm และ (จ) 33.19 nm

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสและระดับความสูงของการสแกนระหว่างหัววัดและหัวเขียนแม่เหล็กทั้งสามขนาดจะแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความต่างเฟสที่สูงสุดในแต่ละระดับความสูงจะไม่แปรผันแบบเชิงเส้น นั่นคือเมื่อความสูงของการสแกนมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้สนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งนั้นๆ ลดลงไปตามระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียน ทำให้ค่าความต่างเฟสของคานที่มีความสัมพันธ์กับแรงแม่เหล็กที่แต่ละระดับความสูงของการสแกนจึงลดลงตามระยะทางกำลังสอง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟสสูงสุดและระดับความสูงของการสแกน

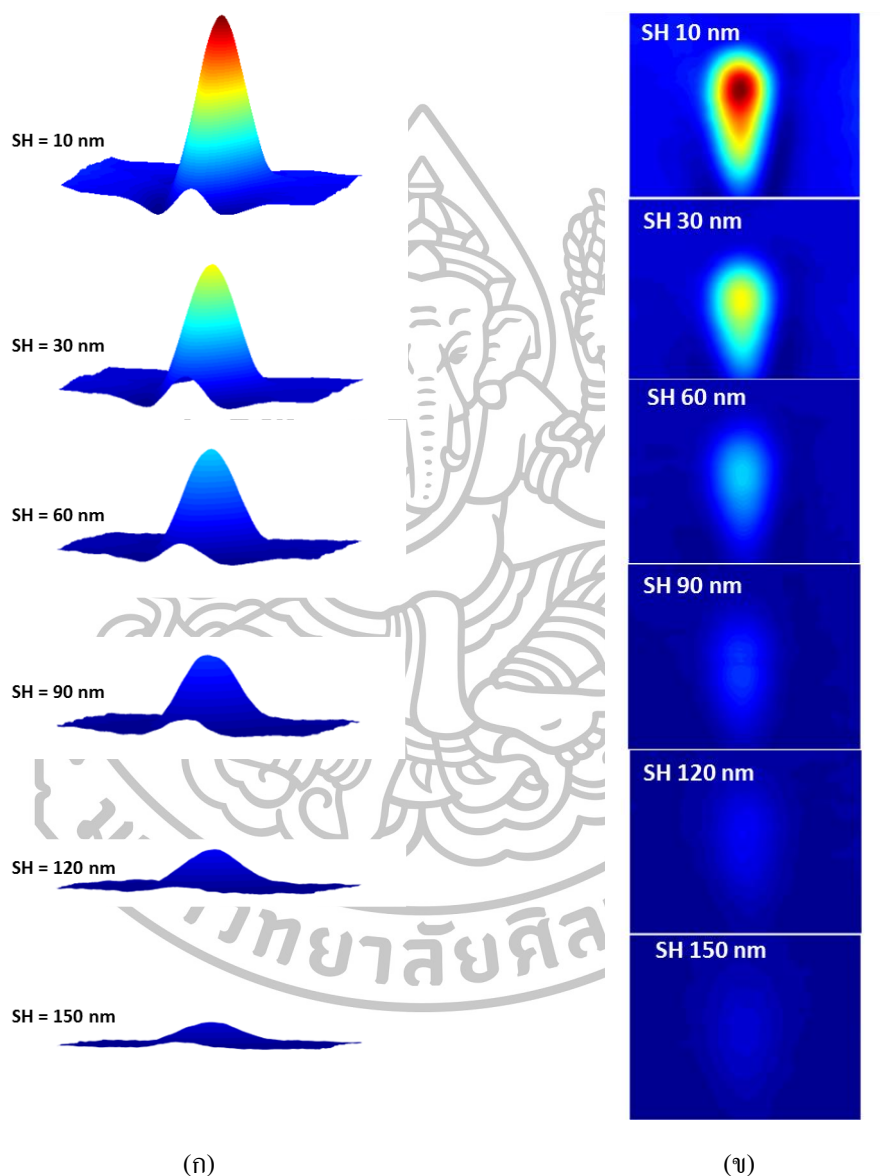
การทดลองทั้งสามกรณีข้างต้น เป็นการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพเท่านั้นซึ่งทำให้เราทราบเพียงว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการตรวจวัดหัวเขียนส่งผลให้หัวเขียนมีความเข้มสนามแม่เหล็กมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งการทดลองที่ทั้งสามหัวข้อเป็นเพียงการหาความเข้มสนามแม่เหล็กในเชิงคุณภาพเท่านั้น

ก่อนหน้านี้ได้มีการวิจัยที่สามารถบอกความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณ โดยการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก นักวิจัยได้ใช้เทคนิคสอบเทียบสนามแม่เหล็กของหัวเขียนด้วยการจำลองหัวเขียนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3] ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนด้วยการจำลองหัวเขียนแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 4.2. การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงปริมาณโดยการสอบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดลองในขั้นตอนนี้จะนำผลจากการตอบสนองของคานแม่เหล็กในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสมาคำนวณ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานที่แปรผันตรงกับเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กและยังสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $\Delta\phi \propto \partial F / \partial z \propto \partial^2 H_z / \partial z^2$ ) ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กในแต่ละตำแหน่งหาได้จากการอินทิเกรตแรงแม่เหล็กในแต่ละระดับความสูงของการสแกนหรือการอินทิเกรตการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสองครั้ง  $\left( H_z \propto \int_{z_0}^{\infty} (\Delta\phi) dz \propto \int_{z_0}^{\infty} F dz \right)$  ซึ่งการหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจะพิจารณาจากระดับความสูงที่ตรวจวัดจนถึงระดับความสูงที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก (สนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์) จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงของการสแกน SH = 10 nm จะมี

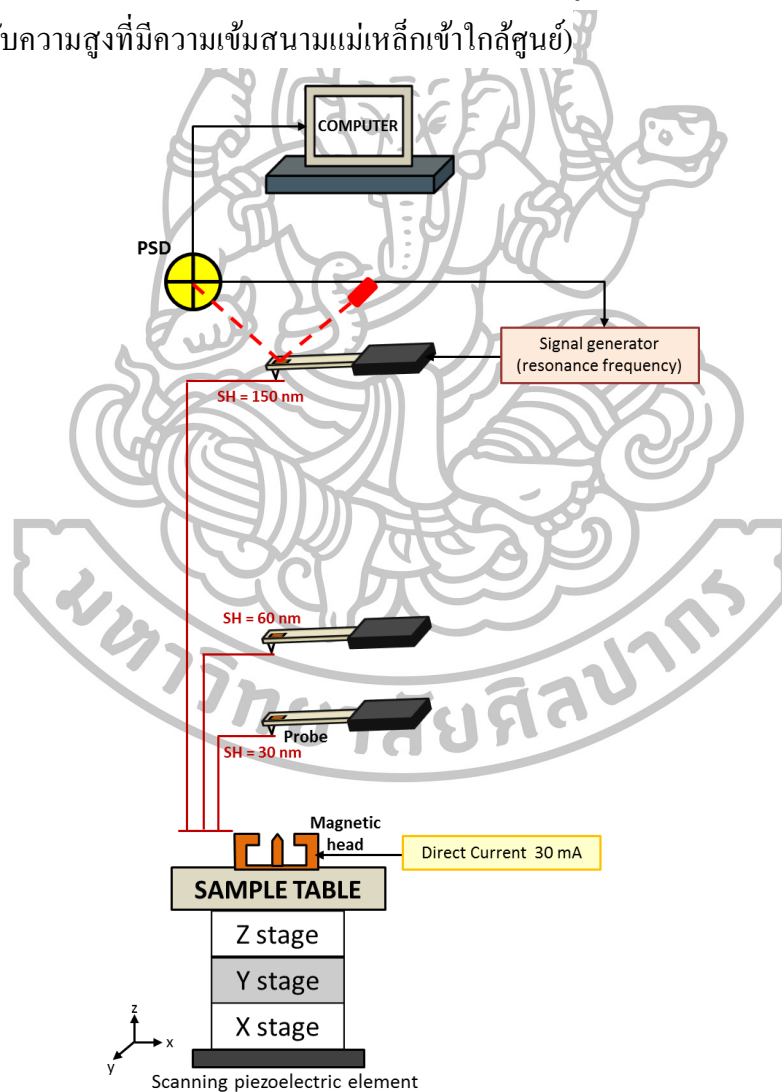
การเปลี่ยนแปลงเฟสของคานมากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อระดับความสูงของการสแกนมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูงของการสแกน  $SH = 150 \text{ nm}$  การเปลี่ยนแปลงเฟสของคานเข้าใกล้ศูนย์ นั่นหมายความว่าที่ระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนเท่ากับ  $150 \text{ nm}$  เป็นระดับความสูงที่ไม่มีสนามแม่เหล็กนั่นเอง



รูปที่ 4.12 รูปภาพของความต่างเฟสที่แต่ละระดับความสูงของการสแกนต่างๆ (ก) รูปภาพสามมิติ (ข) รูปภาพสองมิติ



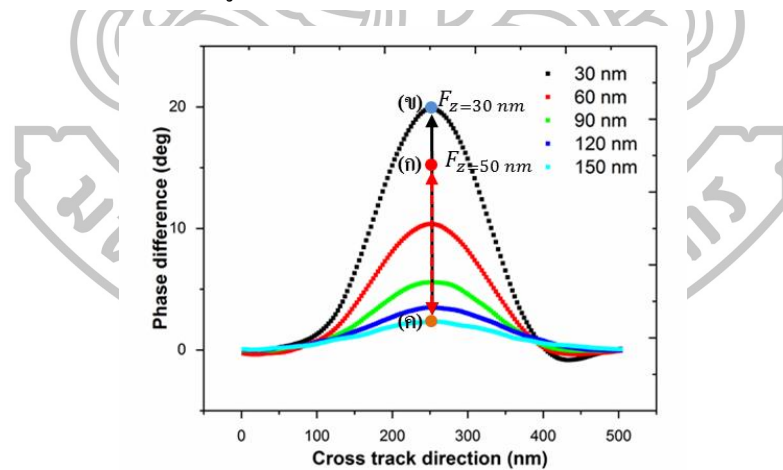
การคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยการสอบเทียบทำได้โดยพิจารณาความต่างเฟสสูงสุดที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM เปรียบเทียบกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ได้จาก FEM ในการทดลองจะเลือกหัวเขียน 3 ขนาด ได้แก่ 78 nm 85 nm และ 92 nm โดยกำหนดระดับความสูงของการวัดเริ่มต้นที่ความสูงของ 30 nm (ระดับความสูงเริ่มต้นที่เลือกเนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงหลักการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กด้วย MFM เท่านั้น ซึ่งหากต้องการทราบความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะความสูงใดๆ สามารถพิจารณาที่ระดับความสูงนั้นๆ ได้) ดังรูปที่ 4.13 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัวเขียนจะกำหนดให้เท่ากับ 30 mA สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการคำนวณค่าความต่างเฟสของคานาทั่วทั้งพื้นที่หัวเขียนแม่เหล็ก โดยเพิ่มระดับความสูงของการสแกนทีละ 1 nm จนถึง 150 nm (ระดับความสูงที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์)



รูปที่ 4.13 การตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กที่ความสูงของการสแกนตั้งแต่ SH = 30 nm จนถึง 150 nm

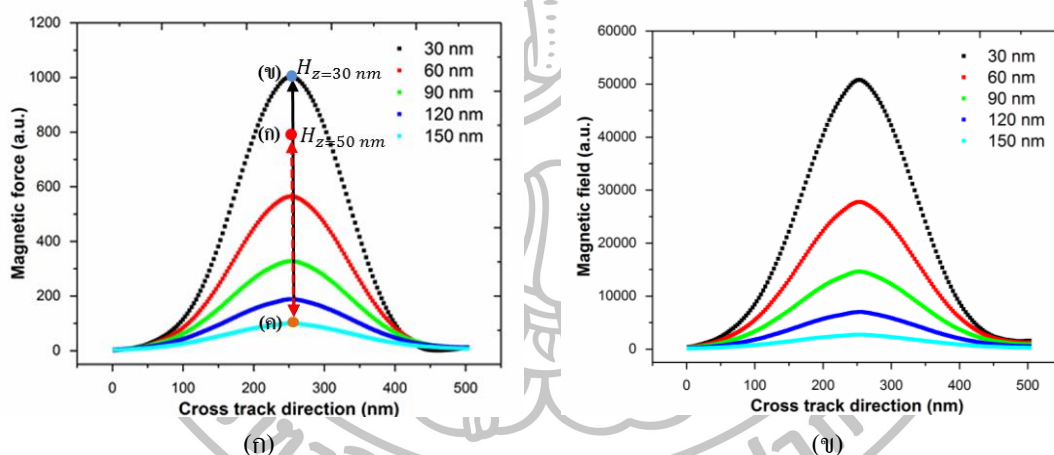


ค่าความต่างเฟสที่ได้จะนำมาคำนวณหาแรงแม่เหล็กต่อไปโดยการอินทิเกรตตามความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเฟสและเกรเดียนท์ของแรงแม่เหล็ก  $\Delta\phi \propto dF/dz$  เพื่อการมองภาพที่ชัดเจนในการคำนวณจะพิจารณาดังรูปที่ 4.14 การคำนวณหาแรงแม่เหล็กจะทำได้โดยอินทิเกรตค่าความต่างเฟสตั้งแต่ระดับความสูง 30 nm จนถึงตำแหน่งความสูงที่ต้องการหาแรงแม่เหล็กในตำแหน่งนั้นๆ  $\left( F_z \propto \int_{z=z_0}^{z=\infty} (\Delta\phi) dz \right)$  เมื่อ  $z_0$  คือระดับความสูงที่ต้องการทราบแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่งใดๆ (ในที่นี้เท่ากับ 30 nm) และ  $\infty$  คือระดับความสูงที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์ (ระดับความสูงที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 150 nm) ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูงต่างๆ ทำได้โดยอินทิเกรตความต่างเฟสตั้งแต่ระดับความสูงที่ต้องการทราบจนถึงระดับความสูงที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เช่น การคำนวณหาแรงแม่เหล็กที่ระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 30 nm ในตำแหน่งจุดสีน้ำเงิน (ดูรูปที่ 4.14 ในตำแหน่ง (ก) ประกอบ) สามารถทำได้โดยอินทิเกรตค่าความต่างเฟสจากตำแหน่งความสูงของการสแกนตั้งแต่ 30 nm จนถึงระดับความสูงที่ 150 nm และการคำนวณหาแรงแม่เหล็กที่ความสูงของการสแกนเท่ากับ 50 nm ในตำแหน่งจุดสีแดง (ดูรูปที่ 4.14 ในตำแหน่ง (ข) ประกอบ) สามารถทำได้โดยอินทิเกรตค่าความต่างเฟสจากตำแหน่งความสูงของการสแกนตั้งแต่ 50 nm จนถึงระดับความสูงที่ 150 nm



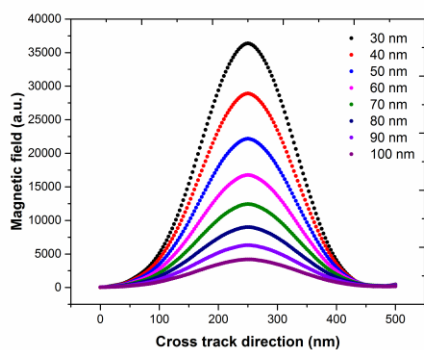
รูปที่ 4.14 การอินทิเกรตค่าความต่างเฟสเพื่อคำนวณหาแรงแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM ที่ระดับความสูงต่างๆ

การคำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนสามารถทำได้โดยการอินทิเกรตแรงแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง  $\left( H_z \propto \int_{z=z_0}^{z=\infty} \int_{z=z_0}^{z=\infty} (\Delta\phi) dz \propto \int_{z=z_0}^{z=\infty} F dz \right)$  ซึ่งจะเหมือนกับวิธีการคำนวณหาแรงแม่เหล็ก ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 30 nm ในตำแหน่งจุดสีน้ำเงิน (ดูรูปที่ 4.15(ก) ในตำแหน่ง (ก) ประกอบ) สามารถทำได้โดยอินทิเกรตแรงแม่เหล็กจากตำแหน่งความสูงของการสแกนตั้งแต่ 30 nm จนถึงระดับความสูงที่ 150 nm และการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 50 nm ในตำแหน่งจุดสีแดง (ดูรูปที่ 4.15(ก) ในตำแหน่ง (ข) ประกอบ) สามารถทำได้โดยอินทิเกรตแรงแม่เหล็กจากตำแหน่งความสูงของการสแกนตั้งแต่ 50 nm จนถึงระดับความสูงที่ 150 nm จะได้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่างๆ ดังรูปที่ 4.15(ข) ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กที่คำนวณได้จะไม่มีหน่วย เนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้เป็นเพียงการประมาณค่า

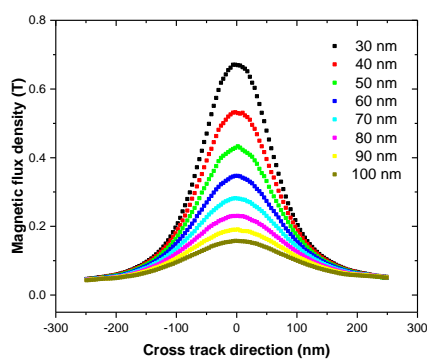


รูปที่ 4.15 (ก) การอินทิเกรตแรงแม่เหล็กเพื่อคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM ที่ระดับความสูงต่างๆ (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ระดับความสูงต่างๆ

ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จาก MEM เพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กหัวเขียนในเชิงปริมาณ โดยสอบเทียบระหว่างข้อมูลของ MFM และ FEM ด้วยข้อมูลในแนวคอสแทรีคที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแต่ละระดับความสูงของการสแกนและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่แต่ละระดับความสูงของการสแกน ตั้งแต่ความสูง 30 nm จนถึง 100 nm ดังรูปที่ 4.16 (ระดับความสูงสูงสุดที่ 100 nm เนื่องจากผลการตรวจวัดของ FEM มีผลที่ตรวจวัดสูงสุดที่ระดับ 100 nm) [42]



(ก)



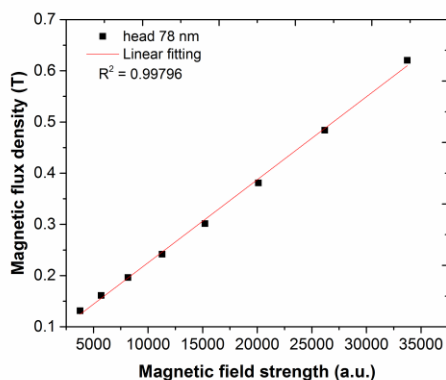
(ข)

รูปที่ 4.16 สนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ความสูงของการสแกนตั้งแต่ 30 nm จนถึง 100 nm (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณผลจาก MFM (ข) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนด้วย FEM

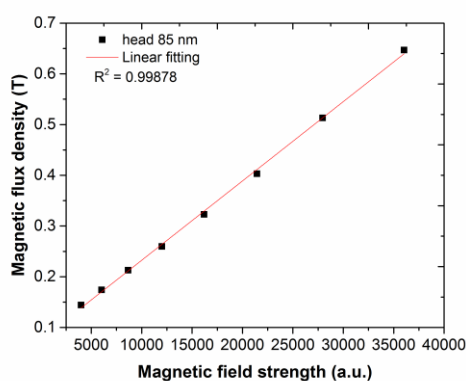
ผลของการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจาก MFM และ FEM แสดงดังรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งสองเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM ของหัวเขียนขนาดอื่น โดยพิจารณาหาความสัมพันธ์ของข้อมูลกับหัวเขียนทั้งสามขนาด เมื่อนำข้อมูลของหัวเขียนทั้งสามขนาดมาพิจารณาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง MFM กับ FEM สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์คือ  $FEM = (\text{slope}(\text{MFM})) \cdot \text{offset}$  เมื่อนำข้อมูลของ MFM ที่ได้จากการคำนวณมาพล็อตกราฟเทียบกับผลของ FEM จะมีความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นระหว่าง FEM และ MFM ดังตารางที่ 4.3 โดย  $y$  คือค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (FEM) และ  $x$  คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ (MFM)

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จาก FEM และ MFM ของหัวเขียนทั้งสามขนาด

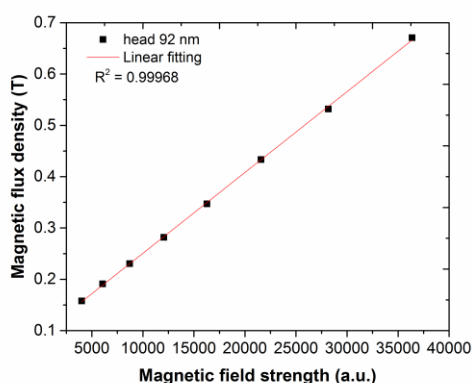
ขนาดของหัวเขียน (nm)	ความสัมพันธ์สมการเชิงเส้น	สัมประสิทธิ์การตัดสนใจ
78	$y = 1.62035E-05x - 0.06309$	0.99796
85	$y = 1.56384E-05x - 0.07605$	0.99878
92	$y = 1.57518E-05x - 0.09311$	0.99968



(ก)



(ข)

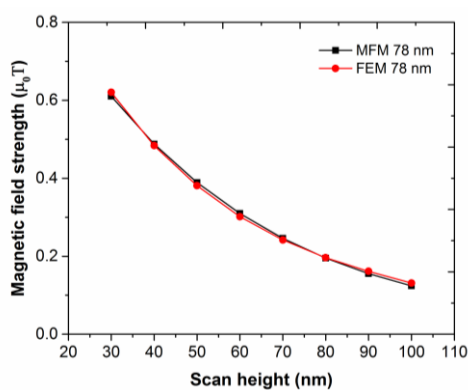


(ค)

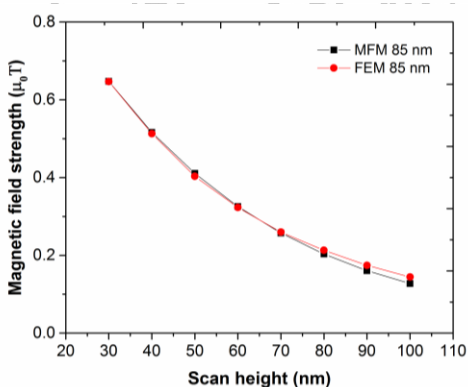
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จาก MFM และ FEM ของ หัวเขียนทั้งสามขนาด (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm

จากการสอบเทียบความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 92 nm จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดคลื่นในมากที่สุดเมื่อเทียบกับหัวเขียนขนาดอื่น แต่เมื่อพิจารณาการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดโดยสอบเทียบจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของหัวเขียนทั้งสามขนาด พบว่าเมื่อนำสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของหัวเขียนขนาด 78 nm สอบเทียบกับความเข้มสนามแม่เหล็กจาก MFM กับหัวเขียนทั้งสามขนาดจะมีความสัมพันธ์

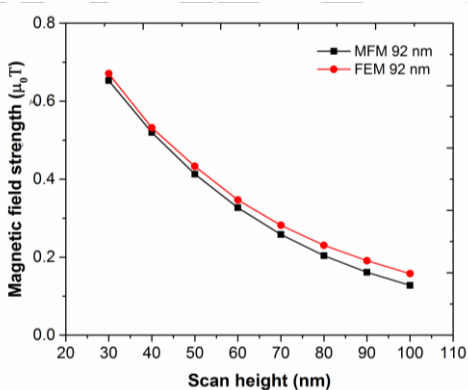
ที่ใกล้เคียงกับสนามแม่เหล็กที่ได้จาก FEM มากที่สุดดังรูปที่ 4.18 (กรณีที่สอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดทั้งสามขนาดกับความสัมพันธ์ที่ได้จากหัวเขียนขนาด 85 nm และ 92 nm จะกล่าวไว้ในภาคผนวก ค) ดังนั้นการประมาณค่าสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจึงใช้ความสัมพันธ์สมการเชิงเส้นของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 78 nm เพื่อสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กกับหัวเขียนขนาดอื่นๆ ซึ่งการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของผลที่ได้จาก MFM จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง FEM และ MFM คือ  $y = 1.57518E-05x - 0.09311$



(ก)



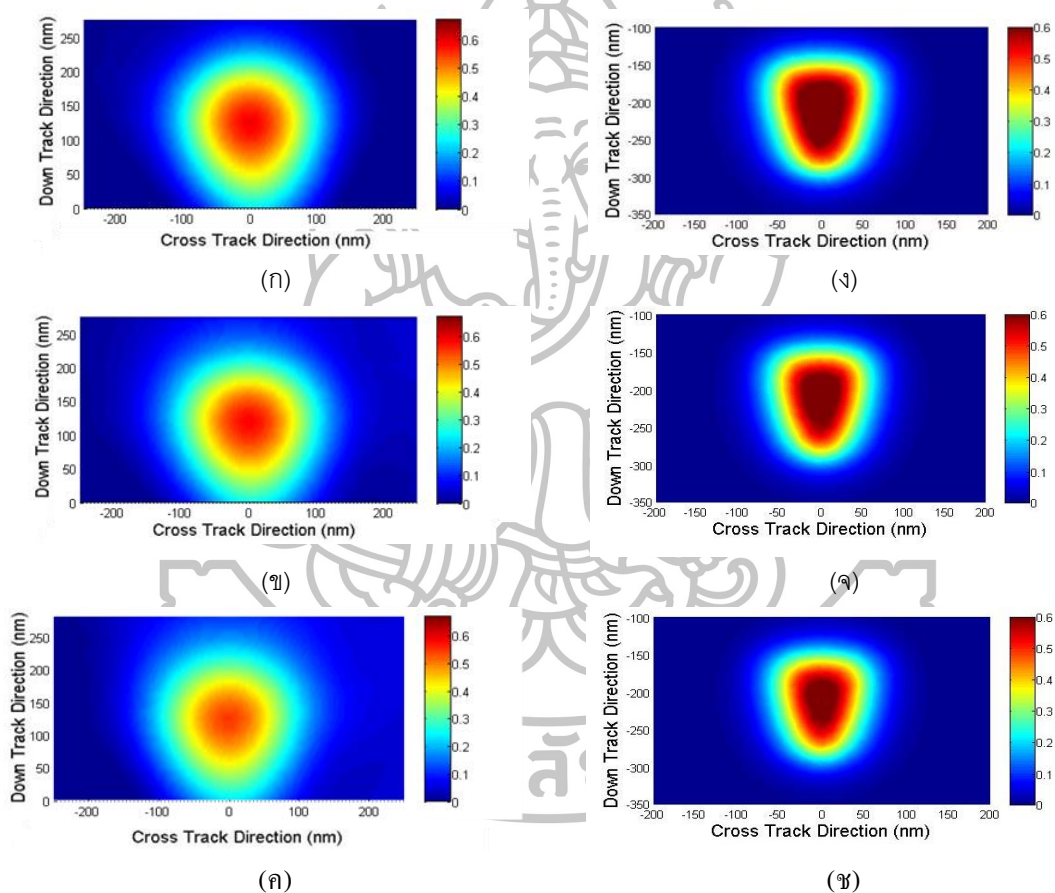
(ข)



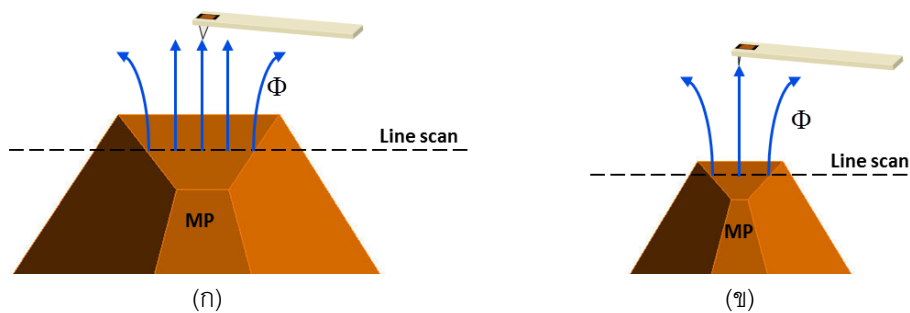
(ค)

รูปที่ 4.18 ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 78 nm (ก) 78 nm (ข) 85 nm (ค) 92 nm

เมื่อทำการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กทุกตำแหน่งบนพื้นที่หัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดที่ระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 30 nm จะได้รูปภาพแม่เหล็กจะดังรูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กจาก MFM มีแนวโน้มของความเข้มสนามแม่เหล็กไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะมีรูปทรงแตกต่างกันไปจากการจำลอง FEM ซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากหัววัด MFM มีขนาดใหญ่กว่าหัววัด FEM (การคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของ FEM เป็นแบบจุดข้อมูล ในขณะที่หัววัดของ MFM มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ความละเอียดของการตรวจวัดจาก MFM มีความละเอียดน้อยกว่าการตรวจวัดด้วย FEM) ซึ่งให้ผลดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 สนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณจากการตรวจวัดด้วย MFM (ก) 92.43 nm (ข) 85.00 nm (ค) 78.28 nm และสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองหัวเขียนด้วย FEM (ง) 92.43 nm (จ) 85.00 nm (ฉ) 78.28 nm



รูปที่ 4.20 การจำลองการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน (ก) MFM (ข) FEM

เทคนิคการสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ ด้วยการตรวจวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้ เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก



## บทที่ 5

### อธิบายและสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนประกอบไปด้วยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัวเขียน ขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก รวมไปถึงระดับความสูงของการสแกน โดยจะวิเคราะห์จากค่าความต่างเฟสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานจากความถี่ที่ใช้ในการสั่นคาน (ความถี่เรโซแนนซ์) เพื่อให้คานสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งหลักการตรวจวัดจะพิจารณาจากเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนกระทำต่อหัววัด MFM ทำให้คานเกิดการโค้งงอ ส่งผลให้เฟสของคานเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความต่างเฟสที่ได้จากการตรวจวัดมีความสอดคล้องกับความเข้มซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นรูปภาพแม่เหล็กของหัวเขียนได้

การตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทำได้โดยกำหนดให้พื้นที่ของหัวเขียนที่ใช้ตรวจวัดในแนวแกน  $x$  และ  $y$  มีขนาด  $800 \times 400$  nm ความละเอียดของข้อมูลเท่ากับ 256 pixel และ 64 pixel โดยมีระยะห่างของตำแหน่งข้อมูลที่ถูกตรวจวัดเท่ากับ 3.125 nm และ 6.25 nm ตามลำดับ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนแม่เหล็กเพื่อทำให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านปลายโพลหลัก ในส่วนของ MFM หัววัดแม่เหล็กจะสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในที่นี้เท่ากับ 61.967 kHz ซึ่งแอมพลิจูดของการสั่นประมาณ  $200 \text{ mV} \pm 1\%$  ความสูงของการสแกนที่ใช้ตรวจวัดแรงแม่เหล็กจะอยู่ในระยะต่ำสุด 10 nm (ระดับความสูงที่สามารถให้การตอบสนองของหัววัดต่อสนามแม่เหล็กของหัวเขียนสูงสุด) การวิเคราะห์จะพิจารณาข้อมูลในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคานสูงสุดซึ่งในที่นี้เรียกว่า ค่าความต่างเฟสสูงสุด ข้อมูลดิบจะถูกนำมาเฉลี่ยเพื่อลดปัญหาการวัดที่คลาดเคลื่อนจากสัญญาณอื่นๆ ที่รบกวน ผลการตรวจวัดหัวเขียนในแต่ละครั้งมีตำแหน่งของค่าความต่างเฟสสูงสุดไม่ตรงกัน การนำข้อมูลมาวิเคราะห์จึงต้องปรับขนาดพื้นที่ของหัวเขียนใหม่ โดยกำหนดให้ข้อมูลทั้งหมดมีพื้นที่เท่ากับ  $503.125 \times 318.75$  nm และความละเอียดข้อมูลในแกน  $x$  และ  $y$  เป็น 161 pixel และ 51 pixel ตามลำดับ



การศึกษาความเข้มข้นแม่เหล็กของหัวเขียนทั้ง 10 ขนาด โดยจ่ายไฟฟ้าขนาด 10 mA จนถึง 60 mA และเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าครั้งละ 10 mA พบว่าที่กระแสไฟฟ้าที่ขนาด 10 mA ที่ป้อนให้แก่ขดลวดของหัวเขียนทุกขนาดมีค่าความต่างเฟสที่น้อยมาก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านหัวเขียนยังไม่อิ่มตัว จากนั้นทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าไปที่ขนาด 20 mA จนถึง 60 mA พบว่าค่าความต่างเฟสของกระแสดังกล่าวมีค่าความต่างเฟสใกล้เคียงกัน หมายความว่ากระแสไฟฟ้าเริ่มอิ่มตัวที่ขนาดไฟฟ้าเท่ากับ 20 mA ซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากหัวเขียนแม่เหล็กยอมรับสภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นแม่เหล็กเต็มที่แล้ว (ไม่สามารถสร้างฟลักซ์แม่เหล็กได้อีก) ทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กอิ่มตัว ดังนั้นการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนจึงต้องมีขนาด  $\geq 20$  mA ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้สนามแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหรือออกจากหัวเขียนสูงสุด ข้อควรระวังในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนคือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่หัวเขียนในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายให้แก่หัวเขียน ส่งผลทำให้หัวเขียนแม่เหล็กร้อนและมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนนั้นคือขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก ในการทดลองจะใช้หัวเขียนแม่เหล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน 10 ขนาด โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 30 mA เมื่อพิจารณาหัวเขียนที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันทั้ง 10 ขนาดพบว่าความเข้มข้นแม่เหล็กจะแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียน กล่าวคือ หัวเขียนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้มีฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของหัวเขียนมากกว่าหัวเขียนที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ค่าความต่างเฟสของหัวเขียนขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าค่าความต่างเฟสของหัวเขียนขนาดเล็ก ดังนั้นการกำหนดขนาดของหัวเขียนแม่เหล็กควรคำนึงถึงสนามแม่เหล็กที่เพียงพอในการเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กลงในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก เนื่องจากหัวเขียนที่มีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้ลดประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูล

ระดับความสูงของการตรวจวัดหัวเขียนแม่เหล็กเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นแม่เหล็กของหัวเขียน ในการทดลองจะพิจารณาหัวเขียนทั้งหมด 10 ขนาดที่แตกต่างกัน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 30 mA การทดลองจะทำการตรวจวัดที่ระดับความสูงของการสแกนต่ำสุดที่ 10 nm จนถึง 100 nm และเพิ่มระดับความสูงของการสแกนครั้งละ 10 nm พบว่าความต่างเฟสของคานจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง หมายความว่าที่ระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนที่มีค่าน้อยๆ จะทำให้การตรวจวัดความเข้มข้นแม่เหล็กของหัวเขียนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนที่ไกลออกไป แต่อย่างไรก็ตามการตรวจวัดของหัววัดที่

ใกล้กับหัวเขียนมากเกินไปทำให้มีอิทธิพลของแรงอะตอมมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นระยะที่สามารถให้ประสิทธิภาพของการตรวจวัดได้ดีจะต้องมีความสูงของการสแกนที่ 10 nm ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหัววัดและหัวเขียนที่มีอิทธิพลของแรงอะตอมน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับแรงแม่เหล็ก

การตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามการทดลองเป็นเพียงการตรวจวัดในเชิงคุณภาพ ซึ่งทำให้ทราบเพียงคุณสมบัติของหัวเขียนในแต่ละการทดลองจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานว่ามีความเข้มสนามแม่เหล็กมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ต้องการทราบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการสอบเทียบผลของการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเทียบกับการจำลองหัวเขียนแม่เหล็กที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในเชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานกับเกรเดียนต์แรงแม่เหล็ก ซึ่งเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กแปรผันตรงกับอนุพันธ์อันดับสองของความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $\Delta\phi \propto dF/dz \propto d^2H/dz^2$ ) ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กคือ

$$H = \int_{z=z_0}^{z=\infty} \int_{z=z_0}^{z=\infty} (\Delta\phi) dz = \int_{z=z_0}^{z=\infty} F dz$$

การสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน จะศึกษาหัวเขียนทั้งหมดสามขนาด ได้แก่ หัวเขียนขนาด 78 nm 85 nm และ 92 nm โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวเขียนเท่ากับ 30 mA ในการทดลองจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานที่ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงเฟสของคานสูงสุดในระดับความสูงของการตรวจวัดตั้งแต่ระดับความสูงเริ่มต้นเท่ากับ 30 nm จนถึงระดับความสูงที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์ (ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 150 nm) โดยระดับความสูงของการสแกนจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 nm ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนในตำแหน่งที่สนใจที่ระดับความสูงใดๆ จะหาได้จากการอินทิเกรตค่าความต่างเฟสที่ระดับความสูงนั้นๆ จนถึงระดับความสูงที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก (ความเข้มสนามแม่เหล็กเข้าใกล้ศูนย์) ซึ่งการสอบเทียบจะพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแต่ละระดับความสูงของการสแกนตั้งแต่ 30 nm จนถึง 100 nm มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของหัวเขียนทั้งสามขนาด โดยเลือกใช้ขนาดของหัวเขียนที่สามารถให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด

ความเข้มนามแม่เหล็กจาก FEM มากที่สุด (ในการทดลองจะกำหนดให้ MFEM และ FEM มีพารามิเตอร์เดียวกัน) ซึ่งพบว่าหัวเขียนขนาด 78 nm ให้ค่าความเข้มนามแม่เหล็กของ MFEM ใกล้เคียงกับผลของ FEM สูงสุด โดยมีความสัมพันธ์คือ  $y = 1.57518E-05x - 0.09311$  เมื่อ  $y$  คือค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (FEM) และ  $x$  คือค่าความเข้มนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ (MFEM) เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปคำนวณหาความเข้มนามแม่เหล็กที่ได้จาก MFEM เพื่อสอบเทียบกับสนามแม่เหล็กที่ได้จาก FEM พบว่าความเข้มนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ถูกสอบเทียบมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มนามแม่เหล็กที่ได้จาก FEM ดังนั้นจึงสามารถนำเอาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวไปทำนายความเข้มนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ถูกตรวจวัดด้วย MFEM ในเชิงปริมาณได้

เมื่อพิจารณาความเข้มนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ถูกสอบเทียบทั่วทั้งพื้นที่เพื่อเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของความเข้มนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ตรวจวัดได้ทั้งในกรณีของ MFEM และ FEM ที่ระดับความสูงของการสแกนเท่ากับ 30 nm พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณความเข้มนามแม่เหล็กจาก MFEM จะมีแนวโน้มของความเข้มนามแม่เหล็กไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะมีรูปทรงแตกต่างจากการจำลอง FEM เนื่องจากขนาดของหัววัดของ MFEM มีขนาดใหญ่กว่าหัววัดของ FEM ทำให้การตรวจวัดความเข้มนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จาก MFEM มีความละเอียดน้อยกว่าการตรวจวัดด้วย FEM



## รายการอ้างอิง

- [1] Clark, Mark and Henry Nielsen. (1995). “Crossed Wires and Missing Connections: Valdemar Poulsen, The American Telegraphone Company, and the Failure to Commercialize Magnetic Recording.” **The Business History Review** 69, 1: 1-41.
- [2] Josef Kiermaier et al. (2011). “Variable and fast response 3D magnetic field module for magnetic force microscopy” **International Scanning Probe Microscopy Conference, ISPM 2011, Garching, Munich**
- [3] Chen Y. J, Leong S. H et.al. (2008). A comparative study of write field distribution of trailing-edge shielded and unshielded perpendicular write heads by quantitative magnetic force microscopy. **Applied Physics Letters**, 92, 162505.
- [4] Rebecca Howland and Lisa Benatar. (2000). “**A PRACTICAL GUIDE TO SCANNING PROBE MICROSCOPY.**” 1st ed. DIANE Publishing Co: Collingdale.
- [5] Microscopy. **Scanning Probe scanning probe (Scanning Probe Microscopy)**. Accessed June 3. Available from [http://www.lookfordiagnosis.com/mesh\\_info.php?term=Microscopy%2C+Scanning+Probe&lang=1](http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Microscopy%2C+Scanning+Probe&lang=1)
- [6] M. W. Davidson and M. Abramowitz. **Optical microscopy**. Accessed June 3. Available from <http://www.olympusmicro.com/primer/microscopy.pdf>
- [7] Michal stano. 2014. “CHARACTERIZATION OF MAGNETIC NANOSTRUCTURES BY MAGNETIC FORCE MICROSCOPY.” Bc. Faculty of Mechanical,Engineering Institute of Physical engineering,Brno University of Technology.
- [8] **How an atomic force microscope works**. Accessed June 3. Available from [https://simple.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_force\\_microscope#/media/File:AFMsetup.jpg](https://simple.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscope#/media/File:AFMsetup.jpg)
- [9] F. L. LEITE and P.S. P. HERRMANN. (2005). “Application of atomic force spectroscopy (AFS) to studied of adhesion phenomena : a review.” **J. Adhesion Sci. Technol** 19, 3-5 (Febuary): 365-405.

- [10] Y. Martin, H. K. Wickramasinghe. (1987). "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution." **Appl. Phys. Lett.** 50 (March): 1455-1457.
- [11] Masayuki Abe. **METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING MAGNETIC HEAD.**Japan. No. US 6,639,400 B2, 28 Oct 2003.
- [12] Óscar Iglesias Freire. (2014). "Advances in Magnetic Force Microscopy." Doctor in Philosophy, Material Science Institute of Madrid.
- [13] BRUKER AFM Probes. Accessed June 3. Available from <http://www.brukerafmprobes.com/Product.aspx?ProductID=3864>
- [14] Agustina Asenjo. (2014). "Novel Frontiers in Magnetism SPM-Magnetic Force Microscopy." Nanomagnetism and Magnetic Materials Group MFM Laboratory, 10th February 2014.
- [15] Bharat Bhushan and Othmar Marti. (2011). Nanotribology and Nanomechanics. Accessed June 3. Available from [http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloadocument/9783642152825-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1173242-p174031068](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadocument/9783642152825-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1173242-p174031068)
- [16] Óscar Iglesias Freire. (2014). "Advances in Magnetic Force Microscopy." Doctor in Philosophy, Material Science Institute of Madrid.
- [17] Luis Orozco. (2014). "Synchronous Detectors Facilitate Precision, Low-Level Measurements." **Analog Dialogue.** 2014, 48(November): 1-5.
- [18] Amr M. El-Sayed, Nur Azah Hamzaid, and Noor Azuan Abu Osman. (2014). "Piezoelectric Bimorphs' Characteristics as In-Socket Sensors for Transfemoral Amputees." **Sensors** ,14 (December): 23724-23741.
- [19] Meghan Manning. **Atomic Force Microscopy Lecture 7 Outline 1. Introduction to Atomic Forces 2. AFM Modes of operation 3. Case study 11: Information from AFM.** Accessed June 3. Available from <http://slideplayer.com/slide/9702681/>
- [20] C.B. Prater, P.G. Maivald. et al. "TappingMode Imageing Aplications and Technology." **Veeco.**

- [21] **Atomic force microscopy.** Accessed June 3. Available from <http://www.asmicro.com/Applications/AboutAFM.htm>
- [22] **Electric Techniques.** Accessed June 3. Available from <http://www.nanophys.kth.se/nanophys/facilities/nfl/afm/icon/bruker-help/Content/Interleave%20Scanning/Electric%20Techniques.htm>
- [23] OVE T. GUDMESTAD. (2011). "Transient motions of an oscillating system caused by forcing terms proportional to the velocity of the structural motion." Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, University of Stavanger. **Phil. Trans. R. Soc. A** 369, 2881–2891.
- [24] TOM RIKE. **MASS POINT GEOMETRY.** Accessed June 3. Available from [http://mathcircle.berkeley.edu/archivedocs/2007\\_2008/lectures/0708lecturespdf/MassPointsBMC07.pdf](http://mathcircle.berkeley.edu/archivedocs/2007_2008/lectures/0708lecturespdf/MassPointsBMC07.pdf)
- [25] Óscar Iglesias Freire. (2014). "Advances in Magnetic Force Microscopy." Doctor in Philosophy, Material Science Institute of Madrid
- [26] Óscar Iglesias Freire. (2014). "Advances in Magnetic Force Microscopy." Doctor in Philosophy, Material Science Institute of Madrid.
- [27] Michael Page. (2010). "Magnetic Force Microscopy of Magnetic Nanoparticles." Undergraduate, Physics, The Ohio State University
- [28] Silvia Vock. (2014). "**Resolving Local Magnetization Structures by Quantitative Magnetic Force Microscopy.**" Technischen Universit" at Dresden
- [29] **Western Digital AV-GP WD30EURS 3TB 64MB Cache SATA 3.0Gb/s 3.5" Internal Hard Drive Bare Drive.** Accessed June 3. Available from <http://www.newegg.com/Product/Product.aspx?Item=N82E16822136926>
- [30] **Hitachi working on technology for 20 GB Microdrive or 1 TB 3.5 inch drives.** Accessed June 3. Available from <http://www.geekzone.co.nz/content.asp?contentid=4319>
- [31] **Magnetic field of a solenoid.** Accessed June 3. Available from <http://www.kshiti-jitjee.com/Magnetic-field-of-a-solenoid>

- [32] **Chapter 9 Sources of Magnetic Fields.** Accessed June 3. Available from [http://karma-prod.s3.amazonaws.com/html/ch9sourc\\_b\\_fieldpdf.html](http://karma-prod.s3.amazonaws.com/html/ch9sourc_b_fieldpdf.html)
- [33] **Electromagnetic Induction.** Accessed June 3. Available from <http://ibphysicsstuff.wikidot.com/electromagnetic-induction>
- [34] Nissim Amos., Robert Fernandez. et al. (2010) “Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices.” **IEEE Magnetics Letters** 1 (June): 6500104.
- [35] Linshu Konga) and Stephen Y. Chou, (1997). “Quantification of magnetic force microscopy using a micronscale current ring.” **Appl. Phys. Lett.** 15 (April): 2043-2045.
- [36] **Magnetic Force Microscopy, MFM.** Accessed June 3. Available from [http://afmhelp.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94](http://afmhelp.com/index.php?option=com_content&view=article&id=94)
- [37] “Magnetic Force Microscopy.” Nt-MDt integrated solution for nanotechnology [www.ntmdt.com](http://www.ntmdt.com) [www.ntmdt-tips.com](http://www.ntmdt-tips.com)
- [38] Arvind Raman, “Atomic Force Microscopy (AFM).” Mechanical Engineering Birck Nanotechnology Center NASA Institute of Nanoelectronics and Computation (INAC).
- [39] Kaifeng Zhang, Takenori Hirose. et al. **Cantilever for magnetic force microscope and method of manufacturing the same.** Japan. No. US 8621659 B2,31 Dec 2013.
- [40] Graeme B. Bell Richard Boddington. (2010). “Solid State Drives: The Beginning of the End for Current Practice in Digital Forensic Recovery?.” **Journal of Digital Forensics, Security and Law.** 5 (March): 1-20.
- [41] Y. Kanai and others. (2005). “A Single-Pole-Type Head Design for 400 Gb/in<sup>2</sup> Recording.” **IEEE Trans. Magn** 41, 2 (February): 687-695.
- [42] อิศรา ดอเลาะ. (2558). “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาคผนวก ก

คำสั่ง Matlab ที่ใช้ในการเฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



คำสั่ง Matlab ที่ใช้ในการเฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

```

Moving_Avg = 7;
Type = 2; % 0 = N, 2 = N-2
Lines = 5;
Base_Phase_Sample = 50;
size_mfmdata = size(mfmdata);
for index = 1:size_mfmdata(1)
for round = 1:size_mfmdata(2)
mfm = mfmdata(index,round).phase;
[numy,numx] = size(mfm);
sizex = 800e-9; %defined in MFM measurements
sizey = 400e-9; %defined in MFM measurements
xstep = sizex/numx;

%% set line forward & backward for peak
Start = numy;
% Count = numy - Lines - 1; %% 5 lines Avg
Count = numy - Lines + 1;
for Bundle_No=1:Count
% y = -mfm(numy - Bundle_No - Lines : numy - Bundle_No - 1,:); %% 5 lines Avg
y = -mfm(numy - Bundle_No - Lines + 2 : numy - Bundle_No + 1,:);
if Type==2
Bundle_line(Count - (Bundle_No - 1),:) = [(sum(y,1) - max(y,[],1) - min(y,[],1))/(Lines - 2)];
else Bundle_line(Count - (Bundle_No - 1),:) = [mean(y,1)];
end
end
for Bundle_No=1:Count
for moving = 1:numx - ( Moving_Avg - 1 )

Bundle_line_moving(Bundle_No,moving) = mean(Bundle_line(Bundle_No,moving:moving +

```

```
Moving_Avg - 1));  
end  
end  
for Bundle_No=1:Count  
    for moving = 1:numx - 2*( Moving_Avg - 1 )  
        Bundle_line_moving_2(Bundle_No,moving) =  
mean(Bundle_line_moving(Bundle_No,moving:moving + Moving_Avg - 1));  
        end  
    end  
    Smoothly_Profile(index,round).data = Bundle_line_moving_2; %output  
close all  
clc  
end  
index  
% round  
close all  
end
```





ภาคผนวก ข

คำสั่ง Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสและการคำนวณหาความเข้มข้นแม่เหล็ก  
ของหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

คำสั่ง Matlab ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสและการคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

```

for index = 1:1:length (Smoothly_Profile)
indexsetbasephase = index
mfm_smoothly = Smoothly_Profile(index).data; %% reverse phase graph
[numy,numx] = size(mfm_smoothly);
sizeX = 762.5e-9;    %defined in MFM measurements
sizeY = 362.5e-9;    %defined in MFM measurements
xstep = sizeX/numx;
ystep = sizeY/numy;
maxamp = max(max(mfm_smoothly));
minamp = min(min(mfm_smoothly));
%find maximum amplitude along the x and y axes
x = max(mfm_smoothly,[],1); %cross track data
y = max(mfm_smoothly,[],2); %down track data
Mx = max(mfm_smoothly,[],1); %cross track data
My = max(mfm_smoothly,[],2); %down track data
baseline = x(1,1); %% base line
x=x-baseline;
Axx(index,:)=x;
Phase = x(peak_posy-80:peak_posy+80); %backward /forward from max peak position cross track
Aphase(index,:) = Phase;
Linemaxphase=Phase; % 1 line at max peak amplitude cross track direction
%% set center graph for max peak position at zero point for x-coordinate
xcenter = 0; %% set center graph for max peak position at zero point for x-coordinate
peakpos = find(x == max(x));
posx = 1e9*xstep*((xcenter - peakpos):1:(length(x) - peakpos) - 1);
ycenter = 0; %% set center graph for max peak position at zero point for y-coordinate
peakpos = find(y == max(y));
posy = 1e9*ystep*((ycenter - peakpos):1:(length(y) - peakpos) - 1);

```

```

Phase = x(peak_posy-80:peak_posy+80); %% cut data plus/minus ; backward and forward from
max peak position cross track
Aphase(index,:) = Phase;
Linemaxphase=Phase;
AAphase = Aphase(:,1); %% put data each low
%%find a full width at half maximum (width at 0.5*(max - min)) <-- ****
maxampAd = max(max(Aphase(index,:)));
minampAd = min(min(Aphase(index,:)));
%%find maximum amplitude along the x and y axes
Adcross_track = max(Aphase(index,:),[],1); %%cross track data
Adcross_track_width = find(Adcross_track>minampAd+(0.5*(maxampAd-minampAd)));
indexAd = length(AAphase);
for index = 1:indexAd;
    for u = 1:length(AAphase)
        test = Aphase(u:indexAd,:);
        Force = sum(test,1);
        Asumforce(u,:) = Force; %% Magnetic force
    end
end
Afield = Asumforce(:,1);
indexAsum = length(Afield);
for ii = 1:indexAsum;
    for v = 1:length(Afield)
        testfield = Asumforce(v:indexAsum,:);
        Field = sum(testfield,1);
        Asumfield(v,:) = Field; %% Magnetic field
    end
end
end
end

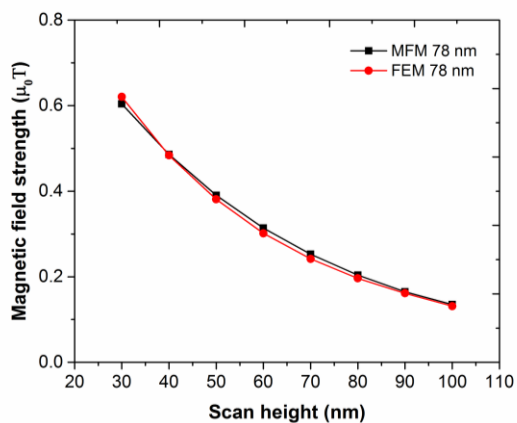
```



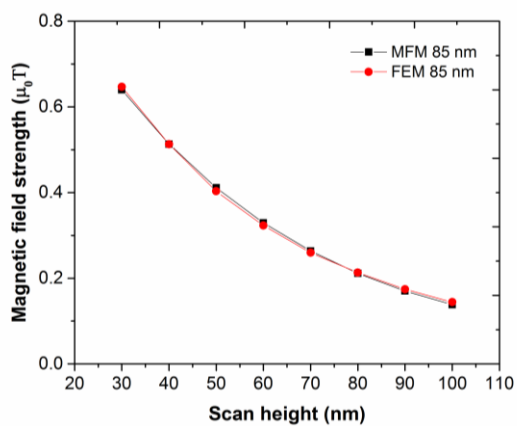
ภาคผนวก ค

ภาคผนวก กรณีที่สอบเทียบความเข้มสนามเหล็กของหัววัดทั้งสามขนาดกับความสัมพันธ์ที่ได้จาก  
หัวเขียนขนาด 85 nm และ 92 nm

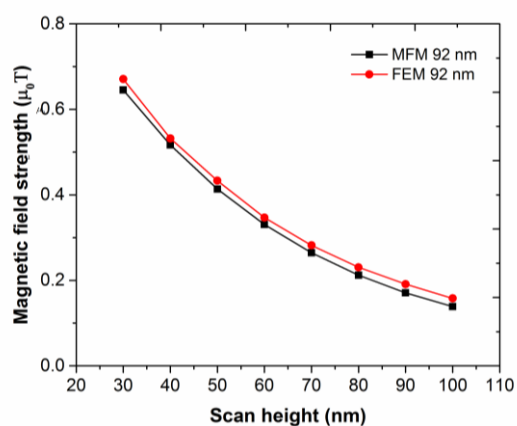
กรณีสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของการตรวจวัดด้วย MFM โดยใช้ความสัมพันธ์ของ  
หัวเขียนขนาด 85 nm



(ก)



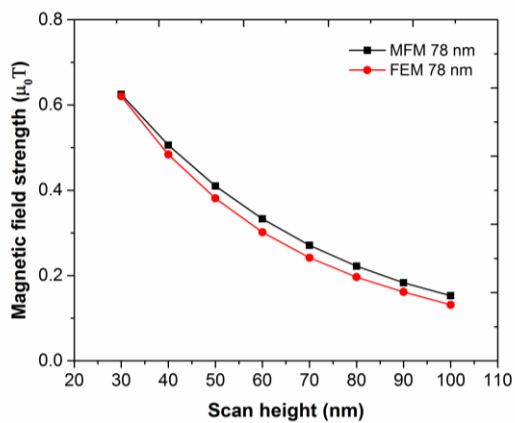
(ข)



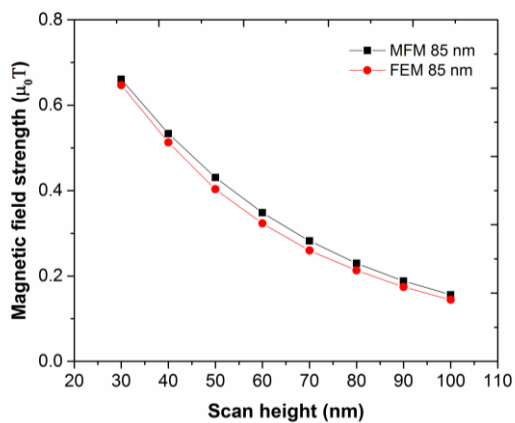
(ค)

รูปที่ ค.1 ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 85 nm (ก) 78 nm  
(ข) 85 nm (ค) 92 nm

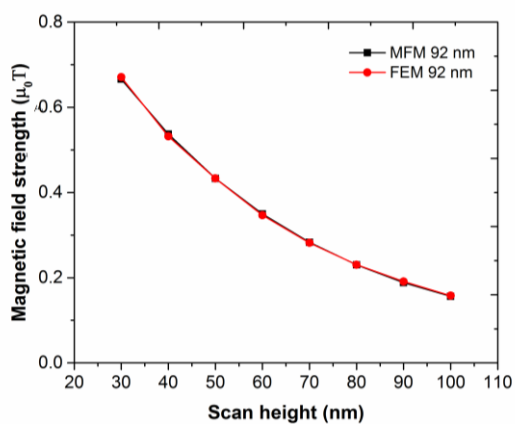
กรณีสอบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของการตรวจวัดด้วย MFM โดยใช้ความสัมพันธ์ของ  
หัวเขียนขนาด 92 nm



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ค.2 ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้งสามขนาดที่ได้จากการสอบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการตรวจวัดด้วย MFM และ FEM ของหัวเขียนแม่เหล็กขนาด 92 nm (ก) 78 nm  
(ข) 85 nm (ค) 92 nm



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล                      นางสาวอัจฉรา โคมหน้า  
 ที่อยู่                              172 หมู่ 7 ตำบลกลาง อำเภอสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด  
 ประวัติการศึกษา  
 พ.ศ. 2551                      ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
    มหาวิทยาลัยศิลปากร  
 พ.ศ. 2555                      ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย  
    มหาวิทยาลัยศิลปากร

