



ผลกระทบของโครงสร้างหัวเขียนที่แตกต่างกันต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก



โดย
นางสาวบุษกรณ์ แซ่ลิ้ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลกระทบของโครงสร้างหัวเขียนที่แตกต่างกันต่อความเข้มและการกระจายตัวของ
สนามแม่เหล็ก



โดย
นางสาวบุษกรณ์ แซ่ลิ่ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF DIFFERENT POLE GEOMETRIES ON MAGNETIC FIELD INTENSITY
AND DISTRIBUTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (PHYSICS)
Department of PHYSICS
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2017
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ ผลกระทบของโครงสร้างหัวเขียงที่แตกต่างกันต่อความเข้มและ
การกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก
โดย บุษกรณ์ แซ่ลิ้ม
สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

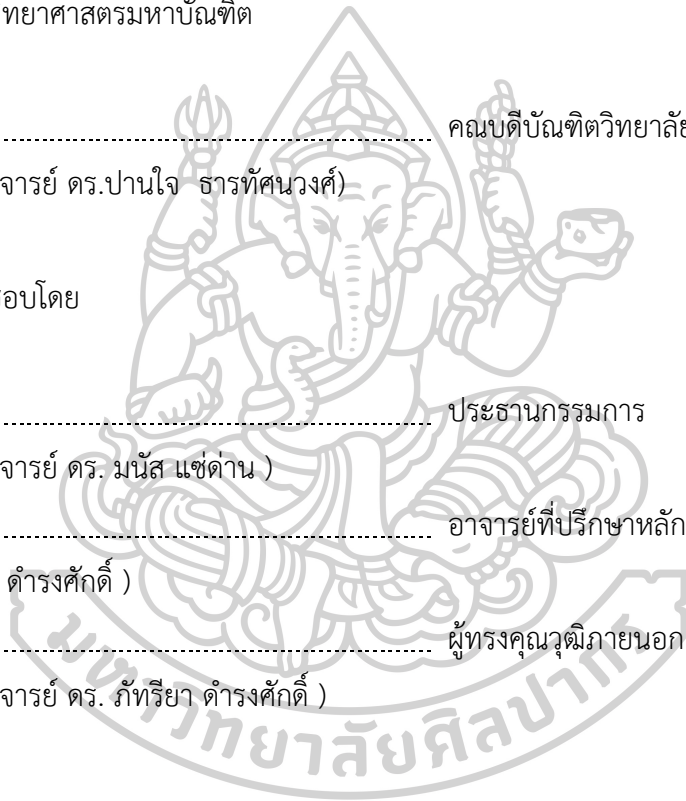
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชำรตศนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มณีส แซ่ด่าน)

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

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์)



56306206 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : สนามแม่เหล็ก, กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, หัวเขียนแม่เหล็ก

นางสาว บุษกรณีย์ แซ่ลิ้ม: ผลกระทบของโครงสร้างหัวเขียนที่แตกต่างกันต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

ความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กเป็นปัจจัยสำคัญของเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีขนาดมากกว่า 1 Tb/in^2 ในปัจจุบันหัวเขียนแม่เหล็กถูกออกแบบให้สร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงและมีการกระจายตัวต่ำ เพื่อลดความกว้างของข้อมูลที่เขียนลงแผ่นบันทึกข้อมูล ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกใช้ในการศึกษาหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งแบบมีซิลด์ล้อมรอบ โดยทั่วไปหัวเขียนแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบจะประกอบด้วยโพลหลักที่ถูกล้อมรอบด้วยซิลด์แม่เหล็ก โพลหลักกับซิลด์จะถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นของฉนวนแม่เหล็ก ในระหว่างทำการสร้างภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก หัวเขียนแม่เหล็กจะถูกไปอัสด้วยกระแส 30 มิลลิแอมป์ เพื่อให้หัวเขียนแม่เหล็กอิมตัวทางแม่เหล็ก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกประมวลผลเพื่อแยกพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเข้มและเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็ก หัวเขียนแม่เหล็กยังถูกศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อหาขนาดของหัวเขียนแม่เหล็กและขนาดของช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ ความสัมพันธ์ระหว่างโพลและโครงสร้างของซิลด์กับความเข้มสนามแม่เหล็กและเกรเดียนต์ถูกพิจารณา และเปรียบเทียบระหว่างหัวเขียนแบบมีซิลด์ล้อมรอบ 2 แบบ พบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแปรผันตรงกับความกว้างและความหนาของหัวเขียน โพลหลักที่มีขนาดใหญ่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง นอกจากนี้หัวเขียนแม่เหล็กแบบ A ที่มีช่องว่างกว้างสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่เข้มกว่าหัวเขียนแม่เหล็กแบบ B ที่มีช่องว่างแคบ แสดงให้เห็นว่าเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างขนาดของช่องว่างและโพลหลัก เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กลดลงเมื่อความกว้างของช่องว่างแคบกว่าขนาดของโพลหลัก

56306206 : Major (PHYSICS)

Keyword : MAGNETIC FIELD, MAGNETIC FORCE MICROSCOPY, MAGNETIC WRITE HEADS

MISS BUTSAPORN SAELIM : EFFECT OF DIFFERENT POLE GEOMETRIES ON
MAGNETIC FIELD INTENSITY AND DISTRIBUTION THESIS ADVISOR : BADIN
DAMRONGSAK, Ph.D.

Intensity and distribution of the magnetic write field are ones of the key factors to realize high areal density over 1 Tb/in² in hard disk drive technology. Current magnetic write heads are designed so that it can produce strong field strength, while confining the field distribution in order to minimize the magnetic track width. In this thesis, magnetic force microscopy (MFM) was used to characterize different designs of perpendicular magnetic write heads with fully wrap-around shield (WAS). The magnetic heads with a WAS design are typically composed of the magnetic write pole surrounded by the magnetic shields. The write pole and the shields are isolated by a nonmagnetic gap layer. During MFM imaging, the magnetic heads were biased with the write current of 30 mA to ensure the write pole is magnetically saturated. The MFM image was then post-processed to extract parameters that are related to the magnetic field intensity and the field gradient. The write heads were also characterized by scanning electron microscopy (SEM) for the physical dimension of the write pole and the size of the spacing gaps between the shields and the write pole. The relationship between the write pole/shield structure and the magnetic field strength/gradient was investigated and compared between the two WAS designs. It was found that the intensity of magnetic write field was directly proportional to the pole width and thickness. The large main pole can produce stronger magnetic field strength. In addition, the write heads with wider spacing gap (design A) can produce larger field intensity than those with a narrow gap width (design B). It was also observed that the field gradient had a correlation with the ratio between the spacing gap and the pole dimension. The field gradient decreased when the gap width was narrower than the pole dimension.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทธริยา ดำรงค์ศักดิ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด (Western Digital (Thailand) Co., LTD) ที่สนับสนุนทุนวิจัย อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณ จักรกฤษณ์ สุภาวสุทธิ์ ที่ช่วยให้ความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณ อธิธิพล เข้าวาณิชย์ คุณ กานต์ แสงแก้ว และ คุณ อรรถพล พวงพี ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมไปถึงพี่ ๆ ในแผนก Technical Support Engineer ที่ให้ความกรุณาสอนการใช้เครื่องมือ และให้การดูแลตลอดการทำงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน สำหรับกำลังใจ แรงผลักดัน และความสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ให้คำปรึกษาด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ และคอยให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้กับ บิดา มารดา คณาจารย์ และบุคคลที่มีความเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ทุกท่าน เพื่อทดแทนพระคุณที่ให้ความช่วยเหลือให้ ผู้วิจัย สำเร็จการศึกษานี้

บุษภรณ์ แซ่ลิ้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	5
2.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	12
2.2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	13
2.2.2 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	15
2.3 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน.....	16
2.3.1 สนามแม่เหล็ก.....	16
2.3.2 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์.....	18
2.3.3 โมเมนต์แม่เหล็ก.....	19

2.3.4 แมกนีไทเซชัน.....	20
2.3.5 สารแม่เหล็กเฟอร์โรและฮีสเทอริซีส.....	21
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กศึกษาความเข้มและการกระจายตัว ของสนามแม่เหล็ก. 28	
3.1 การวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้อง จุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	28
3.1.1 การติดตั้งและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	28
3.1.2 การสร้างภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก.....	30
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	31
บทที่ 4 การศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก.....	42
4.1 การเตรียมตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองที่ใช้ในการทดลอง.....	42
4.2 การวัดพารามิเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการทดลองที่ใช้ในการทดลอง.....	46
4.3 การศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน.....	48
4.4 การศึกษาเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กของหัวเขียน.....	51
4.4.1 การพิจารณาเกรเดียนท์ในแนวครอสแทร็ค.....	52
4.4.2 การพิจารณาเกรเดียนท์ในแนวดาวน์แทร็ค.....	53
บทที่ 5 สรุป.....	55
รายการอ้างอิง.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	59

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้สำหรับวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก.....	30
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด.....	48



สารบัญรูป

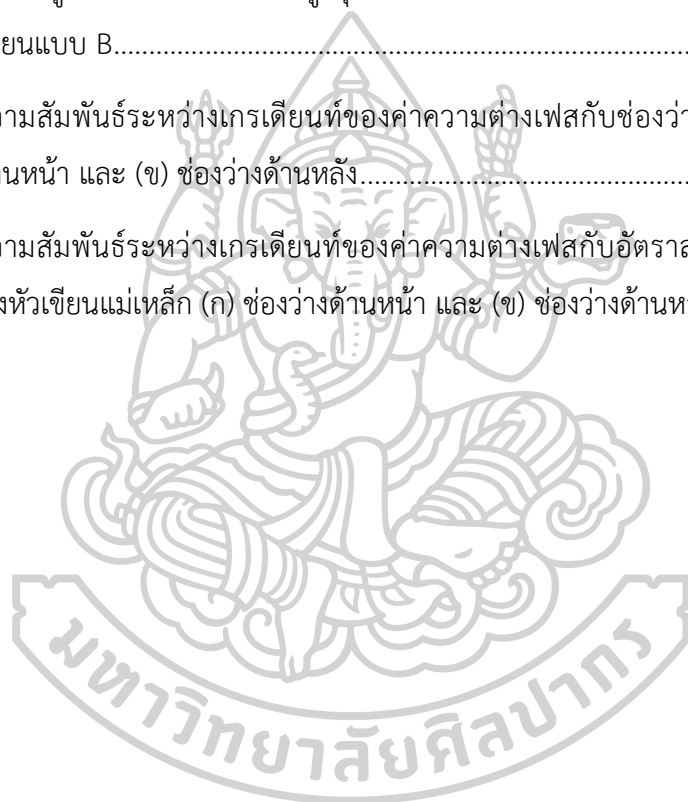
หน้า

รูปที่ 1.1 การเติบโตของการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยแสดงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ของการบันทึกข้อมูล.....	1
รูปที่ 1.2 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบ (ก) ภาพสามมิติแสดงส่วนประกอบของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (ข) ด้านข้าง (ค) ด้านล่างหรือด้าน ABS (air bearing surface) และ (ง) ด้านหน้า	2
รูปที่ 2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่องมือ.....	6
รูปที่ 2.2 หัววัดที่เคลื่อนด้วยสารแม่เหล็ก เพื่อให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	6
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบการสั่นของหัววัดเหล็กที่มีความหน่วง	7
รูปที่ 2.4 (ก) แอมพลิจูด และ (ข) ความต่างเฟส ในการสั่นของหัววัด.....	9
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสในการสั่นหัววัดแม่เหล็ก เมื่อมีแรงภายนอกกระทำ	12
รูปที่ 2.6 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ RAMAC ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทไอบีเอ็ม.....	13
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	13
รูปที่ 2.8 หัวเขียนแม่เหล็กที่ลอยอยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูล.....	15
รูปที่ 2.9 ลักษณะพื้นผิวของหัวเขียนแม่เหล็กในด้านแอร์แบริงเซอร์เฟซ และภาพถ่ายหัวอ่าน/เขียนจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแบบส่องกราด.....	15
รูปที่ 2.10 เทคนิคการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก.....	16
รูปที่ 2.11 การเบนของเข็มทิศที่ล้อมรอบลวดตัวนำ (ก) ไม่มีกระแสไฟฟ้า และ (ข) มีกระแสไฟฟ้า. 17	17
รูปที่ 2.12 แอมแปร์ลูบ	17
รูปที่ 2.13 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ (ก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด และ (ข) ภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติ	19

รูปที่ 2.14 โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจาก (ก) นิวเคลียสหมุนรอบตัวเอง (ข) อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง และ (ค) และอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส	19
รูปที่ 2.15 วัสดุแม่เหล็กทรงกระบอกที่มีโมเมนต์แม่เหล็กจำนวน N ตัว	20
รูปที่ 2.16 โดเมนภายในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างสุ่ม และ (ข) การจัดเรียงของโมเมนต์แม่เหล็กตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก	22
รูปที่ 2.17 ฮิสเทอรีซิสลูป	22
รูปที่ 2.18 ฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์ (ก) แบบอ่อน และ (ข) แบบแข็ง	23
รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแนวคาน์แทร์ค เมื่อช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ด้านหลังมีขนาดแตกต่างกัน และความสัมพันธระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก (ภาพเล็ก).....	24
รูปที่ 2.20 (ก) หัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากการจำลอง (ข) แนวคาน์แทร์ค และ (ค) แนวครอสแทร์ค	25
รูปที่ 2.21 (ก) ภาพ SEM ของหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง และ (ข) พูตปรีนท์ของหัวเขียนแม่เหล็ก ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 20 , 40 และ 60 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ	25
รูปที่ 2.22 (ก) ภาพหัวเขียนแม่เหล็กในการทดลอง และ (ข) ผลการกระจายตัวของหัวเขียนในแนวคาน์แทร์ค.....	26
รูปที่ 2.23 ภาพหัวเขียนแม่เหล็กด้านแอร์แบริงเซอร์เฟซที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และภาพพูตปรีนท์ของหัวเขียน 3 ลักษณะ (ก) หัวเขียนที่มีซิลด์ด้านหลัง (ข) หัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบ และ (ค) หัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม	27
รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก	29
รูปที่ 3.2 การสั้นของคานที่ความถี่เรโซแนนท์ เมื่อมีแรงแม่เหล็กมากกระทำ (ก) การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคาน และ (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน.....	29
รูปที่ 3.3 การสร้างภาพสนามแม่เหล็ก (ก) เส้นการสแกนและตำแหน่งการวัดสนามแม่เหล็ก (ข) ระยะห่างระหว่างตำแหน่งในการสแกน	30
รูปที่ 3.4 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	31
รูปที่ 3.5 ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	31

รูปที่ 3.6 ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (ก) คอนทัวร์ (ข) ภาพ 3 มิติ	32
รูปที่ 3.7 การเฉลี่ยข้อมูลทุก ๆ 7 ตำแหน่งในแนวครอสแพร์ค.....	32
รูปที่ 3.8 การเฉลี่ยข้อมูลทุก ๆ 5 ตำแหน่งในแนวดาวนัแนร์ค.....	33
รูปที่ 3.9 ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ผ่านการเฉลี่ย (ก) คอนทัวร์ (ข) ภาพ 3 มิติ.....	33
รูปที่ 3.10 การหาค่า (ก) การเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด และ (ข) เกรเดียนท์ของข้อมูลที่เฉลี่ยแล้ว	33
รูปที่ 4.1 โครงสร้างหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) หัวเขียนแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบ และ (ข) พารามิเตอร์ ของหัวเขียนแม่เหล็ก	42
รูปที่ 4.2 หัวเขียนแม่เหล็กแบบซิลด์ล้อมรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ก) หัวเขียนแม่เหล็กแบบ A และ (ข) หัวเขียนแม่เหล็กแบบ B.....	43
รูปที่ 4.3 หัวเขียนที่อยู่ในรูปสไลด์เดอรับาร์	43
รูปที่ 4.4 ภาพสนามแม่เหล็กบางส่วนที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MFM ของหัวเขียนทั้ง 2 แบบ	44
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสสูงสุด ($\Delta\phi_{max}$) กับ (ก) ความกว้างของหัวเขียน แม่เหล็ก (PW) และ (ข) ความหนาหัวเขียนแม่เหล็ก (PT) ของกลุ่มตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็กทั้ง 2 แบบ.....	45
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของหัวเขียนที่เปิดด้วยโปรแกรม ImageJ.....	46
รูปที่ 4.7 การตั้งค่าสเกลในการวัดให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตร	47
รูปที่ 4.8 การวัดหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) การวัดพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือ Straight และ (ข) ค่าที่ได้จาก การวัดพารามิเตอร์	47
รูปที่ 4.9 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้ง 2 แบบ เมื่อหัวเขียนมีมีขนาดบริเวณโพลหลักต่างกัน. 49	49
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสสูงสุด ($\Delta\phi_{max}$) กับ (ก) ความกว้างของหัวเขียน แม่เหล็ก (PW) และ (ข) ความหนาหัวเขียนแม่เหล็ก (PT).....	50
รูปที่ 4.11 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อ (ก) หัวเขียนมีขนาดใหญ่ และ (ข) หัวเขียนขนาดเล็ก.....	51
รูปที่ 4.12 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากหัวเขียนเมื่อช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ต่างกัน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B	51

รูปที่ 4.13 เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแพร์คของหัวเขียน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B.....	52
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับช่องว่างด้านข้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านซ้าย และ (ข) ช่องว่างด้านขวา	52
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างด้านข้างกับความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านซ้าย และ (ข) ช่องว่างด้านขวา	53
รูปที่ 4.16 เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวดาวน์แพร์คของหัวเขียน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B.....	53
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับช่องว่างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านหน้า และ (ข) ช่องว่างด้านหลัง.....	54
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างกับความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านหน้า และ (ข) ช่องว่างด้านหลัง.....	54



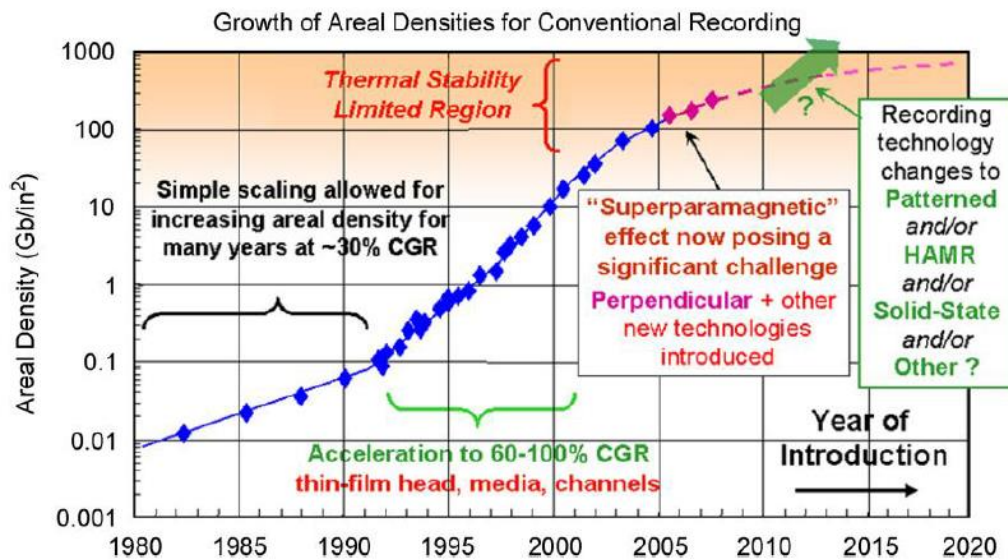
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive : HDD) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลของระบบคอมพิวเตอร์ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลได้ในปริมาณที่มากขึ้นหรือมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording : PMR) ที่ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าสูงถึง 1 เทระไบต์ [1] ซึ่งหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะมีขนาดเล็กลง [2] และสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวจะต้องมีเกรเดียนท์ (gradient) ของสนามแม่เหล็กที่สูง [3]

ปัจจุบันหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งจะเป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ (wrap around shield : WAS) [4] แสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ คือ โพลหลัก (main pole) รีเทิร์นโพล (return pole) ขดลวด (coil) และชิลด์ (shield) การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแผ่นบันทึกข้อมูล เกิดจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด ขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในหัวเขียน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพุ่งออกจากส่วนปลายของโพลหลัก



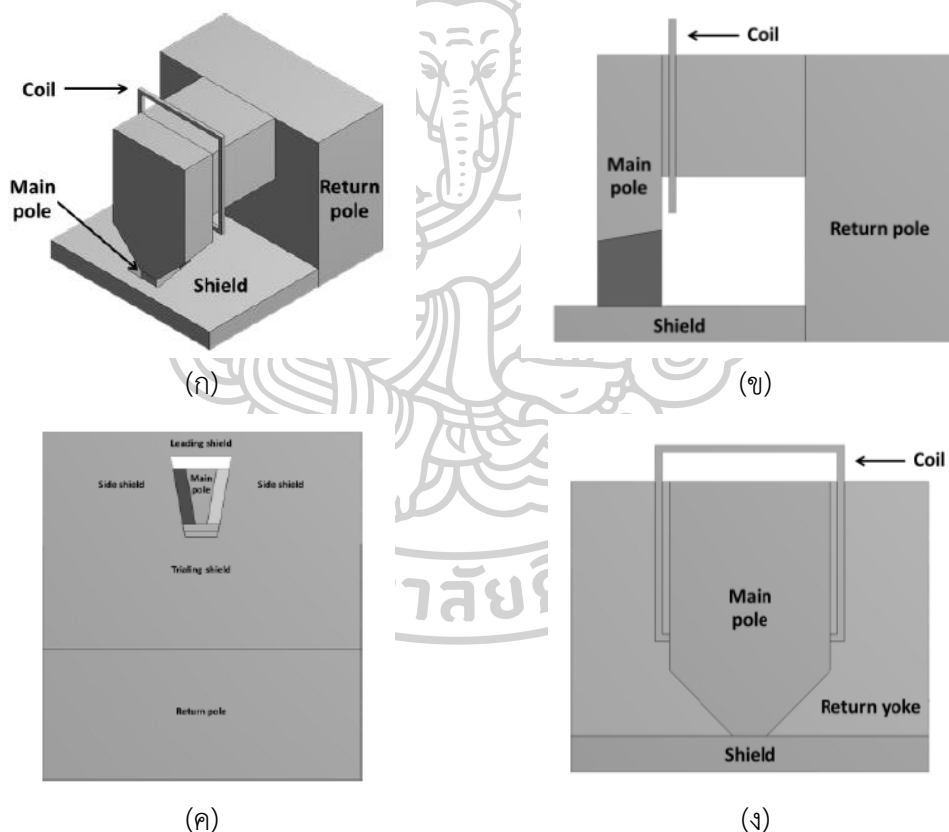
รูปที่ 1.1 การเติบโตของการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยแสดงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ของการบันทึกข้อมูล

ที่มา : Daniel Z. Bai R. Wood. "Future hard disk drive systems." J. Magn. Magn.

321, (2009): 555-561.

เข้าสู่แผ่นบันทึกข้อมูลแล้ววนกลับไปรีเทิร์นโพล ทำให้หัวเขียนสามารถเขียนข้อมูลลงในแผ่นบันทึกข้อมูลได้ ส่วนชิลด์มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนไปรบกวนข้อมูลข้างเคียง เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะพุ่งเข้าสู่ชิลด์แทน [5]

ชิลด์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ชิลด์ด้านหลัง (trailing shield : TS) ชิลด์ด้านข้าง (side shield : SS) และชิลด์ด้านหน้า (leading shield : LS) ดังรูปที่ 1.2 (ก) ชิลด์ด้านหลังและชิลด์ด้านหน้ามีหน้าที่เพิ่มเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กตามแนวดาวนแทร็ค (down track) ซึ่งช่วยลดขนาดของข้อมูลที่บันทึกลงบนมีเดียในแนวดาวนแทร็ค สำหรับชิลด์ด้านข้างจะมีหน้าที่เพิ่มเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กตามแนวครอสแทร็ค (cross track) ซึ่งช่วยลดขนาดความกว้างของข้อมูลในแนวครอสแทร็ค ซึ่งจะส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ มีความจุข้อมูลสูงขึ้น



รูปที่ 1.2 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบมีชิลด์ล้อมรอบ (ก) ภาพสามมิติแสดงส่วนประกอบของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (ข) ด้านข้าง (ค) ด้านล่างหรือด้าน ABS (air bearing surface) และ (ง) ด้านหน้า

ที่มา: ฤทธิรงค์ บานเย็น. “การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีรูปแบบชิลด์แม่เหล็กต่างกัน.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, พิสิษฐ์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2559.

โดยทั่วไปการศึกษานามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก ที่มีลักษณะของหัวเขียนแตกต่างกัน สามารถทำได้ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนที่เสมือนจริง คู่กับการใช้สมการพื้นฐานทางแม่เหล็ก และเทคนิคการสร้างฟูตปรินท์ด้วยเทคนิคสปีนแสดนต์ ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการศึกษานามแม่เหล็กที่ไม่ได้ออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็กโดยตรง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการที่ต่างจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy : MFM) มาวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อหัวเขียนลักษณะแตกต่างกัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพัฒนาขั้นตอนวิธี (algorithm) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาเทคนิคในการวิเคราะห์ความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
- 2) เพื่อศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับชิลด์แตกต่างกัน 2 แบบ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กจะต้องมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักสูง และการมีกระจายตัวของสนามแม่เหล็กทั้งในแนวคอสแทร์คและแนวดาวน์แทร์คที่น้อย เพื่อลดขนาดข้อมูลที่เขียนลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งชิลด์ที่ล้อมรอบโพลหลักเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ส่งผลต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กที่ลักษณะของโพลหลักและชิลด์ต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการศึกษาความเข้มและความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก ซึ่งหัวเขียนที่ใช้เป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบจากบริษัท เวสเทิร์นดิจิทัล (Western Digital Co., LTD) ที่อยู่ในรูปของสไลเดอร์บาร์ โดยหัวเขียนแม่เหล็กที่สนใจมีลักษณะของโพลหลักและชิลด์ที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ หัวเขียนแบบที่ 1 จะมีขนาดช่องว่างระหว่างโพลหลักกับชิลด์กว้างกว่าหัวเขียนแบบที่ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนที่มีลักษณะต่างกันได้
- 2) กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสามารถลดระยะเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของหัวเขียนแม่เหล็กก่อนนำไปใช้งานจริงได้ เนื่องจากการตรวจสอบคุณภาพของหัวเขียนในปัจจุบันจะอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตหัวเขียนแม่เหล็ก
- 3) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหัวเขียนแม่เหล็กให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีความนิยมสูง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความจุสูง และสามารถเขียน/อ่านข้อมูลได้เร็ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็กกลง เพื่อความสะดวกในการพกพาแต่ยังคงสามารถมีประสิทธิภาพในการบันทึกและบรรจุข้อมูลที่สูง ซึ่งการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ ส่งผลให้ขนาดของหัวเขียนที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อใช้บันทึกข้อมูลมีขนาดเล็กกลงด้วย ดังนั้นการตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในปัจจุบัน

หัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในปัจจุบันเป็นหัวเขียนที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้การตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนที่มีความแม่นยำสูง ไม่สามารถทำได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนได้ ซึ่งคือ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก การทำงานของเครื่องมือประเภทนี้จะอาศัยหลักการโค้งงอของคานที่ตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กของหัวเขียน โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดจะอยู่ในรูปของค่าความต่างเฟสและแอมพลิจูดของคาน ที่มีความสัมพันธ์กับรูปของเกรเดียนท์ของแรงแม่เหล็ก (gradient force) ซึ่งสามารถนำไปหาความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนได้

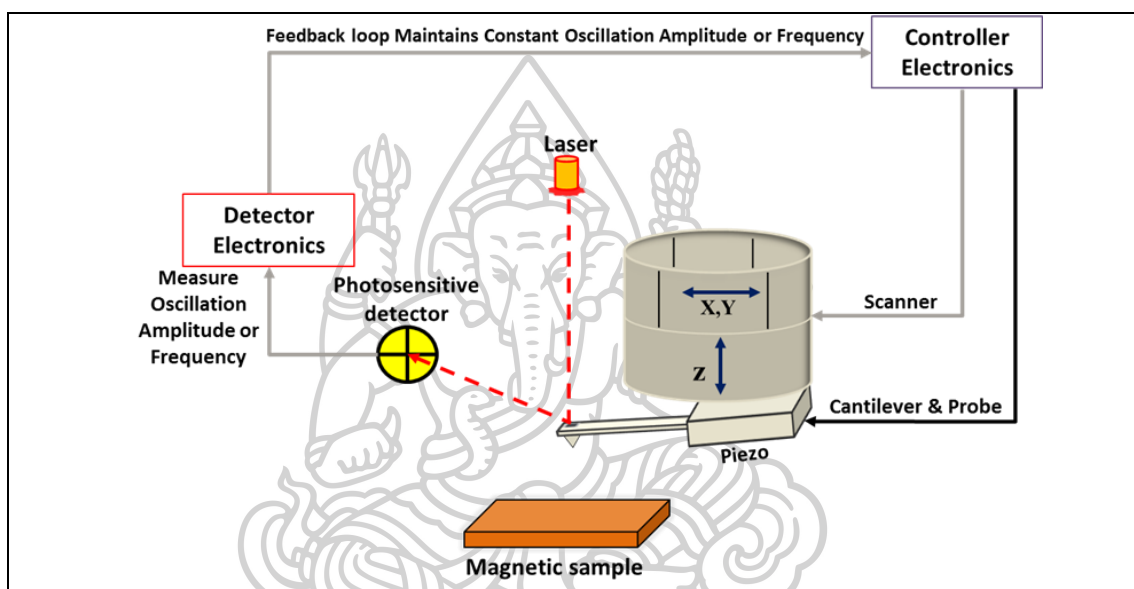
ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิจัย ประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เบื้องต้น ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน รวมถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก

2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope : AFM) ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการถ่ายภาพพื้นผิวของวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยเครื่อง AFM สามารถทำงานได้โดยการใช้หัววัด (probe) ที่มีปลายแหลมเล็กและติดอยู่กับคาน (cantilever) เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของวัตถุ ต่อมาในปี 1987 Y. Martin และ H.K. Wickramasinghe ได้พัฒนากล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมให้สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งเรียกว่า “กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscope : MFM)” เพื่อใช้ในการสร้างภาพสนามแม่เหล็กด้วยการวัดแรงแม่เหล็กที่เกิดระหว่างหัววัดกับวัตถุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก [6] อุปกรณ์ในระบบ MFM ประกอบไปด้วย หัววัดแม่เหล็กที่ติดอยู่บริเวณปลายคาน อุปกรณ์ตรวจวัดความไวแสง (position sensitive detector : PSD) เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) เลเซอร์ไดโอด (laser diode) เครื่อง

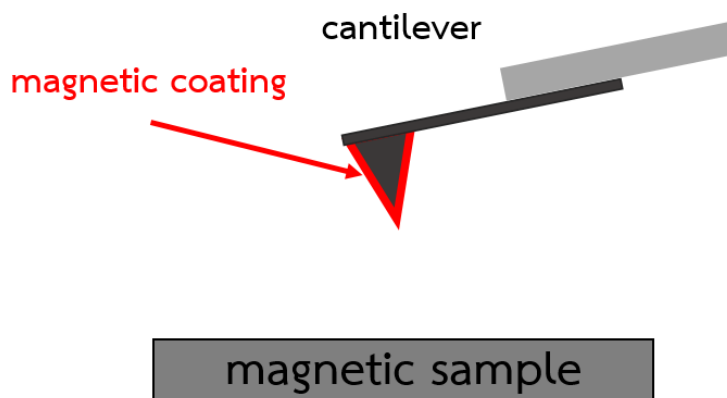
ขยายสัญญาณลอคอิน (lock-in amplifier) ตัวสแกนเพียโซ (piezo scanner) ซึ่งการติดตั้งระบบแสดงดังรูปที่ 2.1

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีความคล้ายคลึงกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม หัววัดที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก เพื่อให้หัววัดตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดจากวัสดุแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยหัววัดจะถูกยึดติดกับปลายคานที่ทำมาจากซิลิกอน (Si) และเมื่อนำหัววัดเข้าไปใกล้ตัวอย่างแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับตัวอย่างแม่เหล็ก ดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่องมือ

ที่มา: อิศรา ดอเลาะ. “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งด้วยการจำลอง ไฟไนท์เอลิเมนต์.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต, ฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.



รูปที่ 2.2 หัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก เพื่อให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

$$\vec{F}_{t-s} = \mu_0 \int \vec{\nabla} (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} \quad (2.1)$$

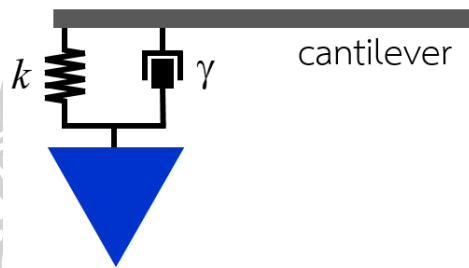
เมื่อ \vec{F}_{t-s} คือ แรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับตัวอย่างแม่เหล็ก

\vec{M}_{tip} คือ แมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กที่เคลือบหัววัด

\vec{H}_{sample} คือ สนามแม่เหล็กของตัวอย่างที่กระทำต่อหัววัด

dV_{tip} คือ ปริมาตรเล็ก ๆ ของสารแม่เหล็กที่เคลือบหัววัด

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดสถิต (static mode) และโหมดไดนามิก (dynamic mode) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้งานในโหมดไดนามิก โดยหัววัดจะถูกสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) และเพื่อให้เข้าใจในหลักการทางทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการสั่นของคานในโหมดไดนามิก จึงสมมุติให้หัววัดมีลักษณะเป็นจุดมวลที่มีขนาดเล็กมากมีมวล m ซึ่งติดกับอยู่กับสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k เมื่อทำการคานสั่นหัววัดจะสั่นและสัมผัสแรงต้านอากาศ โดยมีสัมประสิทธิ์การหน่วง γ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบการสั่นของหัววัดที่มีความหน่วง

ในโหมดไดนามิกคานจะถูกสั่นด้วยแรง $F_{drive} = F_0 e^{i\omega t}$ มีลักษณะการสั่นเป็นคาบที่มีความถี่ ω และอยู่ในแนวแกน z โดยตำแหน่งของหัววัด ณ เวลาใด ๆ แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$z(t) = A_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (2.2)$$

โดยที่ A_0 คือแอมพลิจูดสูงสุด (amplitude) ในการสั่นของหัววัด และ ϕ คือ เฟส (phase) ซึ่งแบ่งการพิจารณาการสั่นเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อหัววัด การเคลื่อนที่ของหัววัดจะ เป็นดังสมการ

$$m\ddot{z}(t) + \gamma\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

เมื่อทำการหาค่า $\ddot{z}(t)$, $\dot{z}(t)$ และ $z(t)$ ที่ได้จาสสมการที่ (2.2) แทนในสมการที่ (2.3) จะได้

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

เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ และแฟคเตอร์คุณภาพของหัววัด (Q-factor)

$Q = \sqrt{mk}/\gamma$ จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.4) ได้เป็น

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

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.5) ใหม่ จะได้

$$A_0 (\omega_0^2 + \omega^2) + i \frac{A_0}{Q} \omega_0 \omega = \frac{F_0}{m} e^{i\phi} \quad (2.6)$$

เมื่อสังเกตสมการที่ (2.6) พบว่า ในเทอมที่อยู่ด้านซ้ายมือ อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (complex number) จึงสามารถใช้สูตรของออยเลอร์ (Euler's formula) $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$ แทนลงในสมการที่ (2.6) จะได้

$$A_0 (\omega_0^2 - \omega^2) = \frac{F_0}{m} \cos \phi \quad (2.7)$$

และ

$$\frac{A_0}{Q} \omega_0 \omega = \frac{F_0}{m} \sin \phi \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.7) และ (2.8) มายกกำลังสอง จะได้

$$\left[A_0 (\omega_0^2 - \omega^2)\right]^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \cos^2 \phi \quad (2.9)$$

และ

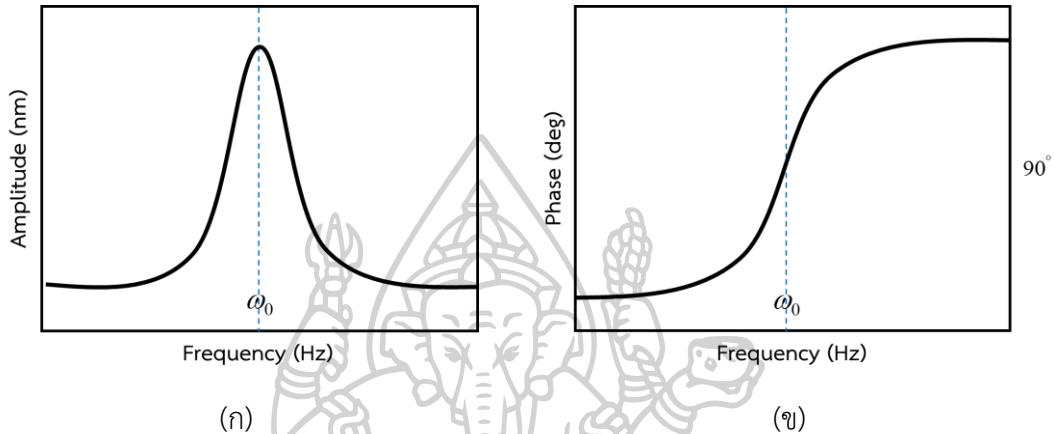
$$\left[\frac{A_0}{Q} \omega_0 \omega\right]^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \sin^2 \phi \quad (2.10)$$

และเมื่อนำสมการที่ (2.9) + (2.10) และจัดรูปใหม่จะได้สมการของแอมพลิจูดและสมการเฟสของการสั่น เป็นดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ

$$A_0 = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0 \omega / Q)^2}} \quad (2.11)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อทำการสั่นหัววัดแม่เหล็กด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน โดยให้ความถี่จากน้อยไปมาก ค่าแอมพลิจูดและค่าความต่างเฟสในการสั่นของหัวเขียนเป็นไปตามกราฟ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (ก) แอมพลิจูด (ข) ความต่างเฟส และความถี่ในการสั่นของหัววัด
กรณีที่ 2 เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากกระทำกับหัววัด จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาทางแม่เหล็ก
 ระหว่างหัววัดกับตัวอย่าง ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นแรงที่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างหัววัดกับตัวอย่าง
 $z(t)$ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของหัววัด เป็นดังสมการ

$$m\ddot{z}(t) + \gamma\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} + \left[F_{t-s}(z=0) + \left(\frac{dF_{t-s}}{dz} \right)_{z=0} z(t) \right] \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

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

จากสมการที่ (2.14) ทำให้ได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำเป็น

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k - \left(\frac{dF_{t-s}}{dz} \right)_{z=0}}{m}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{dF_{t-s}}{dz} \right)_{z=0}}{k}} \quad (2.15)$$

และเนื่องจากเกรเดียนท์ของแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับตัวอย่างมีค่าน้อยมาก กล่าวคือ

$$\left(\frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0} \ll k \text{ จึงสามารถจัดรูปสมการที่ (2.15) ได้เป็น}$$

$$\omega'_0 = \omega_0 \left(\frac{\left(\frac{dF_{t-s}}{dz} \right) \Big|_{z=0}}{2k} \right) \quad (2.16)$$

ดังนั้นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป (frequency shift) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อหัววัดเป็นไปตามสมการ

$$\Delta\omega_0 = \omega'_0 - \omega_0 = \frac{\omega_0}{2k} \frac{dF_{t-s}}{dz} \quad (2.17)$$

และแอมพลิจูดการสั่นของหัววัดที่เปลี่ยนแปลงไป (amplitude shift) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อหัววัดเป็น

$$\Delta A = \frac{2A_0 Q}{3\sqrt{3}k} \frac{dF_{t-s}}{dz} \quad (2.18)$$

ส่วนความต่างเฟสการสั่นของหัววัด เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำเป็น

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega'_0 \omega_0}{Q(\omega_0'^2 - \omega_0^2)} \right) \quad (2.19)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega'_0 \omega_0}{Q(\omega'_0 + \omega_0)(\omega'_0 - \omega_0)} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อกำหนดให้ $\omega'_0 \approx \omega_0$ แทนในสมการที่ (2.12) เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ขณะที่มีแรงภายนอกมากระทำ มีค่าใกล้เคียงกับขณะที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ จะได้

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_0}{2Q\Delta\omega_0} \right) \quad (2.21)$$

นำสมการที่ (2.17) แทนลงในสมการที่ (2.21) จะได้

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

จากการพิจารณาการสั่นของหัววัดในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ พบว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์เฟสของการสั่นมีค่าเป็น 90° หรือ $\frac{\pi}{2}$ แต่เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อหัววัด จะทำให้ค่าเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงไป (phase shift) เป็น $\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \phi$ และเมื่อแทนค่าเฟสลงไปจะได้

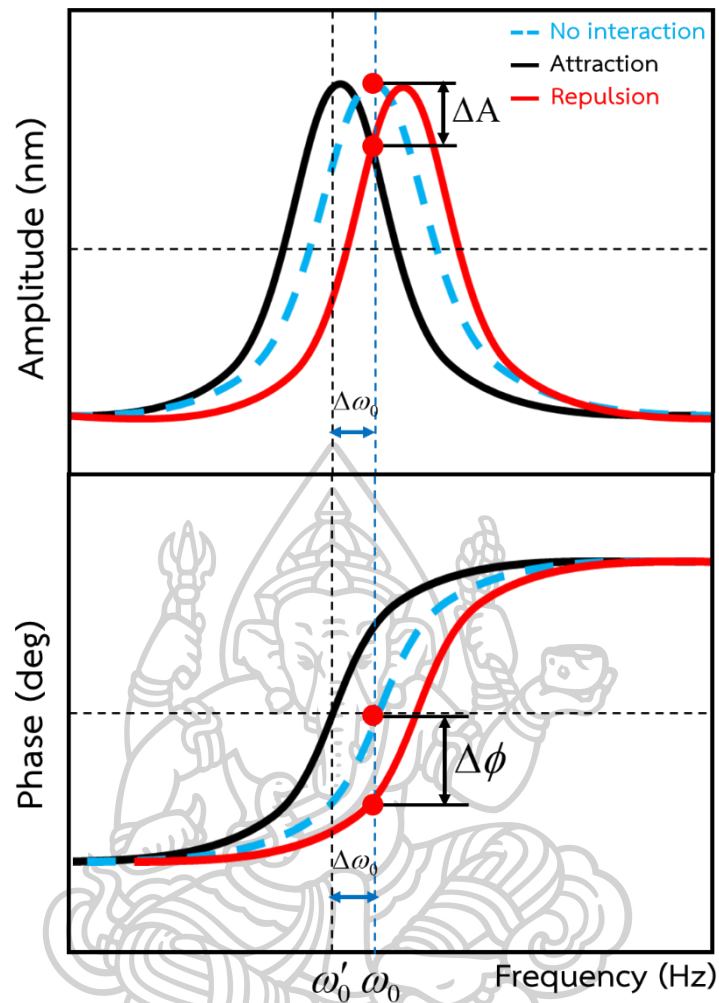
$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{k}{Q \frac{dF_{t-s}}{dz}} \right) \quad (2.23)$$

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

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

จากสมการที่ (2.17) (2.18) และ (2.24) จะประมาณให้เกรเดียนท์ของแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับตัวอย่างมีค่าคงที่ เนื่องจากแอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดมีค่าน้อยมาก จึงสามารถกล่าวได้ว่าแรงระหว่างหัววัดแม่เหล็กกับตัวอย่างที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (2.18) และ (2.24) การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสในการสั่นของหัววัดเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อหัววัด แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยเส้นประสีฟ้าแสดงถึงค่าแอมพลิจูดและค่าเฟสในการสั่นของหัววัด เมื่อไม่มีแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัดกับตัวอย่าง เส้นสีดำแสดงถึงค่าแอมพลิจูดและค่าเฟสในการสั่นของหัววัด เมื่อมีแรงแม่เหล็กเป็นแรงดูด (attractive force) เส้นสีน้ำเงินแสดงถึงค่าแอมพลิจูดและค่าเฟสในการสั่นของหัววัด เมื่อมีแรงแม่เหล็กเป็นแรงผลัก (repulsive force)



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสในการสั่นหัววัดแม่เหล็ก เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

2.2 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive :HDD) เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลประเภทจานแม่เหล็ก ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1956 โดยบริษัท IBM หรือเรียกว่า Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC) [7] แสดงดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วยจานแม่เหล็ก (magnetic disks) 50 แผ่น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว หมุนที่ 1200 รอบต่อนาที และมีความจุของหน่วยความจำขนาด 4.4 เมกะไบต์ ซึ่งฮาร์ดดิสก์รุ่นนี้มีขนาดใหญ่มากแต่มีความจุน้อย ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีขนาดเล็กลง แต่สามารถบันทึกข้อมูลได้มากขึ้น หรือที่เรียกว่า การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในปัจจุบันมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงถึง 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว [1] และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นบันทึกข้อมูลเพียง 2.5 และ 3.5 นิ้ว จึงทำให้ฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็กลง

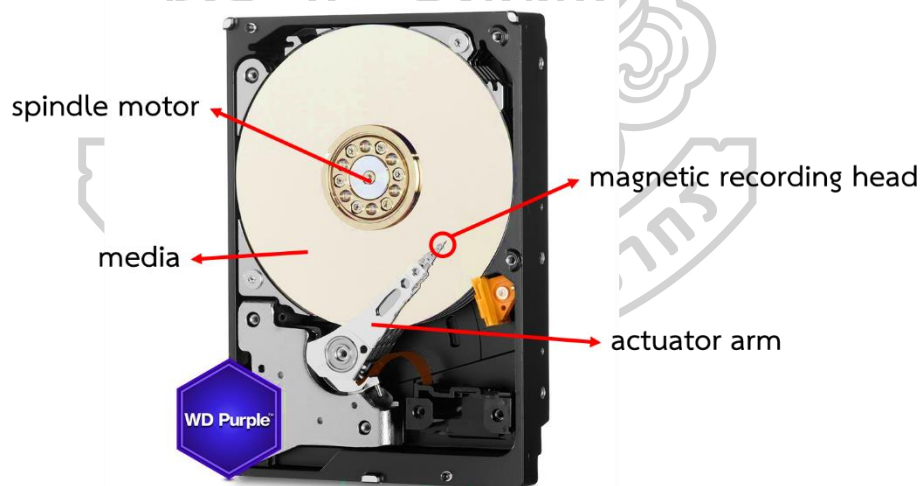


รูปที่ 2.6 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ RAMAC ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทไอบีเอ็ม

ที่มา : (20 august 2016). IBM 305 RAMAC. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_305_RAMAC

2.2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือ แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (media) มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกข้อมูล (spindle motor) แขนหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (actuator arm) หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording head) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

แก้ไขจาก : (20 august 2016).Hard disk drive .Available : <https://www.wdc.com/products/internal-storage/wd-blue-pc-desktop-hard-drive.html>

- แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (media)
แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม เคลือบด้วยสารแม่เหล็กอย่างแข็ง (hard ferromagnetic material) มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลจะ

ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็ก โดยข้อมูลที่บันทึกจะอยู่ในลักษณะบิต “0” หรือ บิต “1”

- มอเตอร์หมุนแผ่นบันทึกข้อมูล (spindle motor)

มอเตอร์หมุนถูกยึดติดกับแผ่นบันทึกข้อมูล ทำหน้าที่ในการหมุนแผ่นข้อมูลไปยังตำแหน่งที่ต้องการบันทึกหรืออ่านข้อมูลแม่เหล็ก ความเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งมีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Revolution Per Minute : RPM) และในปัจจุบันความเร็วในการหมุนมอเตอร์มีค่าเป็น 10,000 RPM

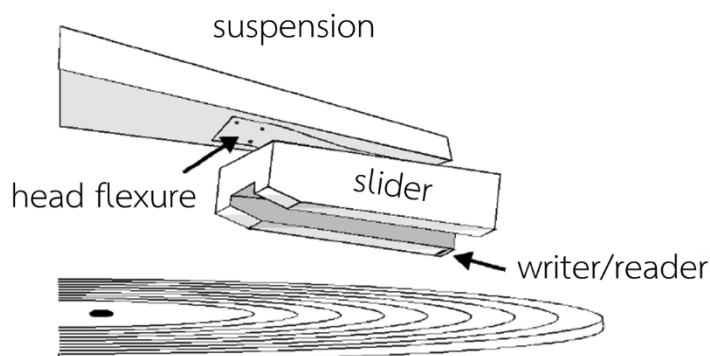
- แขนหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (actuator arm)

อุปกรณ์นี้มีลักษณะเป็นแผ่นยาว ที่บริเวณปลายแผ่นด้านหนึ่งจะมีหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กติดอยู่ เมื่อต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล แขนของหัวบันทึกข้อมูลจะทำหน้าที่เคลื่อนหัวเขียนแม่เหล็กไปยังตำแหน่งที่ลอยอยู่บนแผ่นบันทึกข้อมูล และทำการเคลื่อนหัวเขียนออกจากแผ่นบันทึกข้อมูล หากทำการอ่านหรือเขียนข้อมูลเสร็จสิ้น

- หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording head)

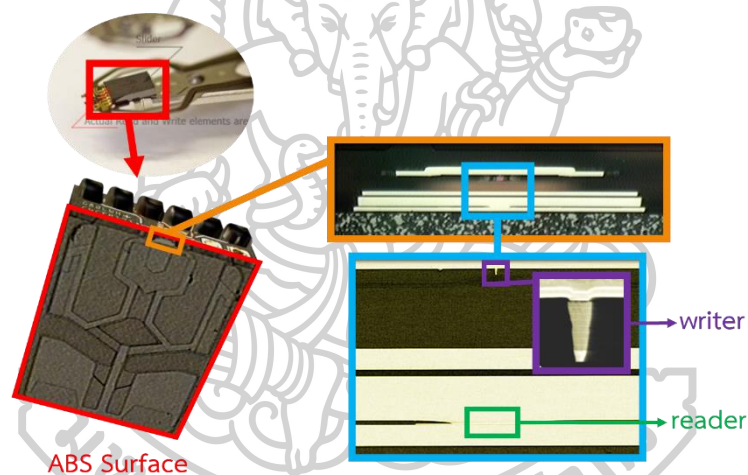
ภายในหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กประกอบด้วยหัวเขียน (writer) และหัวอ่าน (reader) ทำหน้าที่ในการเขียนและอ่านข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล ในการเขียนข้อมูลจะต้องทำการป้อนกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดของหัวเขียน เพื่อเหนี่ยวนำให้หัวเขียนสร้างสนามแม่เหล็กออกมา ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนไปยังขดลวด ส่วนหัวอ่านจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากการวัดข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อแสดงผลไปยังคอมพิวเตอร์

ในระหว่างการบันทึกหรืออ่านข้อมูลแม่เหล็กหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะลอยอยู่บนผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในระดับนาโนเมตร [8] แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยอาศัยหลักการทางพลศาสตร์ (aerodynamics) และการออกแบบลักษณะผิวด้านหน้าของหัวเขียนที่เรียกว่า แอร์เบริงเซอร์เฟซ (air bearing surface : ABS) ดังรูปที่ 2.9 ในการควบคุมระยะห่างระหว่างหัวบันทึกกับแผ่นบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.8 หัวเขียนแม่เหล็กที่ลอยอยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูล

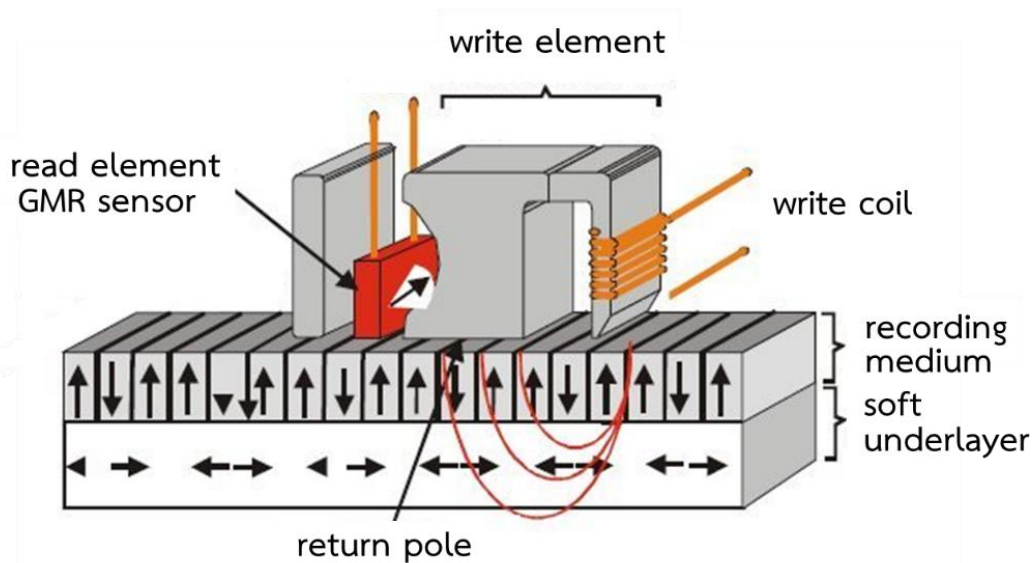
แก้ไขจาก : (20 august 2016). Hard Disk Drive Introduction .Available : <http://talkelab.ucsd.edu/index.php/hdd-intro>



รูปที่ 2.9 ลักษณะพื้นผิวของหัวเขียนแม่เหล็กในด้านแอร์แบริงเซอร์เฟซ และภาพถ่ายหัวอ่าน/เขียนจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแบบส่องกราด

2.2.2 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

เทคนิคการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในปัจจุบัน คือเทคนิคการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก (perpendicular magnetic recording: PMR) โดยเทคนิคนี้จะมีชั้นแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic underlayer : SUL) อยู่ใต้ชั้นของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่เหนี่ยวนำทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กให้มีทิศทางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.10 ในกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นกระบวนการที่แปลงจากข้อมูลดิจิทัลเป็นข้อมูลแม่เหล็ก โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะป้อนข้อมูลดิจิทัลบิต “0” หรือบิต “1” ไปยังฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 2.10 เทคนิคการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก
 ที่มา : (28 august 2016). Hitachi working on technology for 20 GB Microdrive or 1
 TB 3.5 inch drives. Available: <http://www.newegg.com/Product/Product.aspx?Item=N82E16822136926>

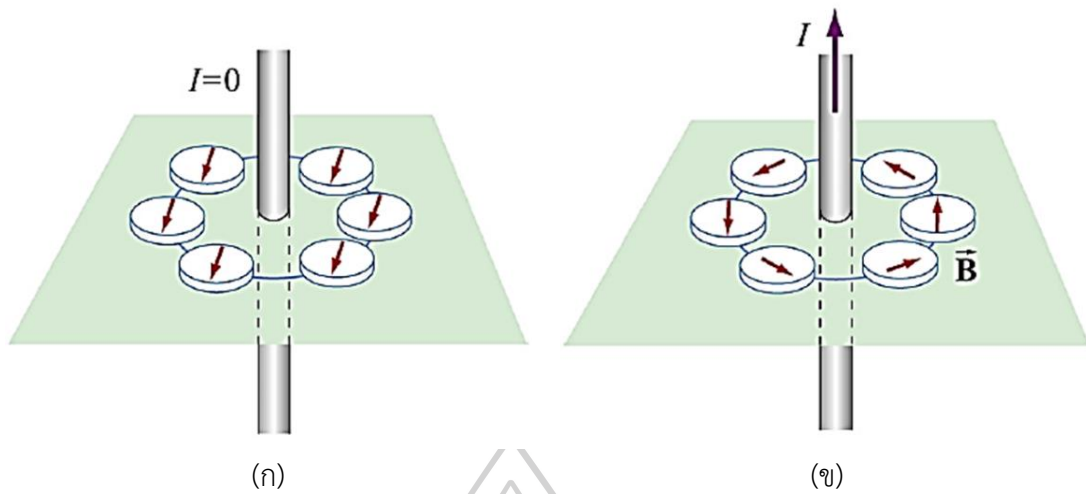
จากนั้นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะแปลงข้อมูลบิตให้อยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า แล้วส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำของหัวเขียน (write coil) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพล (write pole) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้แมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลมีทิศทางขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดเหนี่ยวนำ

2.3 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน

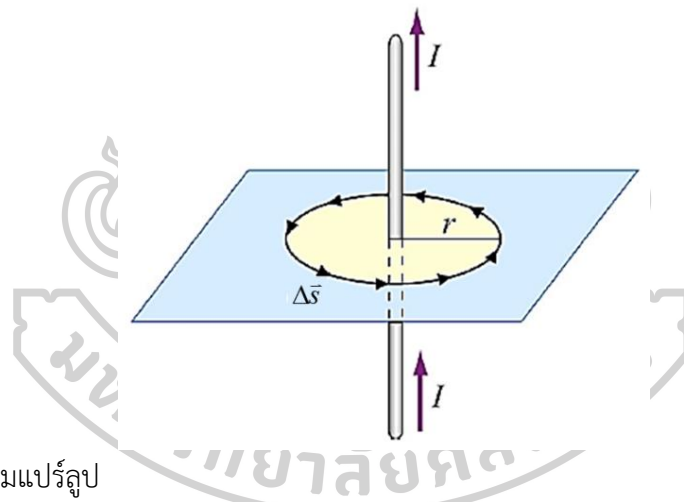
2.3.1 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในวัสดุ ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สามารถสังเกตได้จากการทดลองนำเข็มทิศไปวางล้อมรอบขดลวดตัวนำ พบว่าเมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเข็มทิศจะเบนไปในทิศทางตามแนวสัมผัสเส้นวงกลมแสดงรูปที่ 2.11

โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยกฎของแอมแปร์ เมื่อแบ่งเส้นรอบวงกลมที่มีรัศมี r ออกเป็นเวกเตอร์เล็ก ๆ $\Delta \vec{s} = \Delta s \hat{\phi}$ โดยแต่ละเวกเตอร์มีขนาด Δs มีทิศทางในแนวสัมผัสของเส้นวงกลม $\hat{\phi}$ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 การเบนของเข็มทิศที่ล้อมรอบลวดตัวนำ (ก) ไม่มีกระแสไฟฟ้า และ (ข) มีกระแสไฟฟ้า
 แก๊ไขจาก : (28 august 2016). Ampere's Law. Available: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>



รูปที่ 2.12 แอมแปร์ลูป

แก๊ไขจาก : (28 august 2016). Ampere's Law. Available: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>

กฎของแอมแปร์ในรูปแบบอินทิกรัลเป็นการอินทิกรัลตามเส้นแรงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบขดลวดตัวนำ ซึ่งมีลักษณะเป็นวงปิดเรียกว่า แอมแปร์ลูป (Amperian loop) พบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ(2.25)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.25)$$

จากทฤษฎีบทสโตกส์ (Stokes' theorem) สามารถเขียนสมการที่ (2.25) ให้อยู่ในรูปแบบอนุพันธ์ได้ดังสมการ

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.26)$$

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

2.3.2 สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid coil) คือ ลวดยาวที่นำมาขดเป็นเกลียว เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่มีขนาดคงที่ผ่านขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบริเวณรอบขดลวดดังรูปที่ 2.13 (ก) โดยกำหนดสนามแม่เหล็กสุทธิ (net magnetic field) คือ ผลรวมเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กย่อย ๆ แต่ละเกลียว สนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์มีลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง ขนานกันและสม่ำเสมอ ทำให้สนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง

เมื่อกำหนดผิวปิดให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 2.13 (ข) มีความยาว l กว้าง w จากนั้นทำการคำนวณหาสนามแม่เหล็กรอบเส้นปิดทั้ง 4 ด้าน โดยใช้สมการที่ (2.27) เมื่อพิจารณาเส้นที่ 2 กับ 4 พบว่า $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับความยาว และเมื่อพิจารณาเส้นที่ 3 พบว่า $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ เช่นกันเนื่องจากไม่มีสนามแม่เหล็กบริเวณภายนอกขดลวด จึงทำให้เหลือเพียงเส้นปิดที่ 1 เท่านั้น

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{path1} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{path1} ds = Bl \quad (2.27)$$

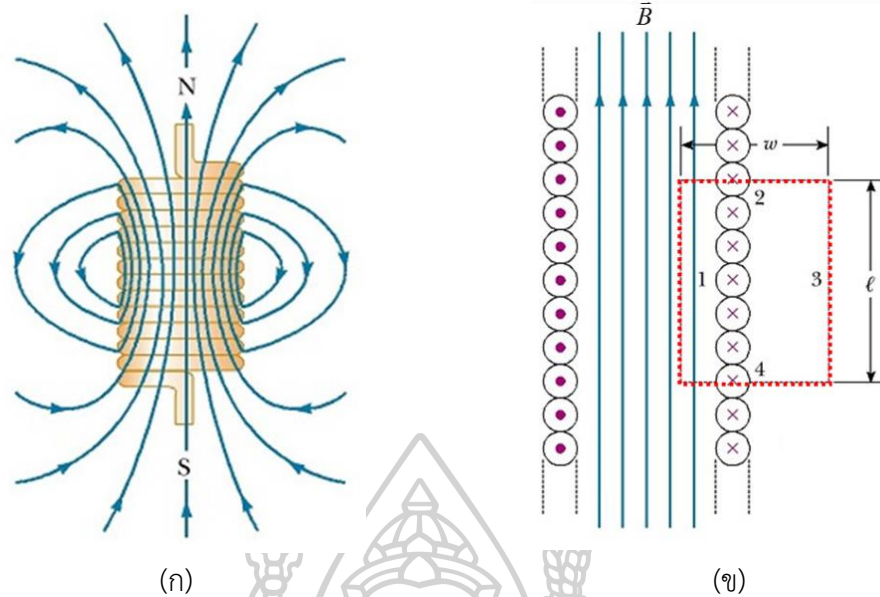
$$Bl = \mu_0 NI \quad (2.28)$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 nI \quad (2.29)$$

เมื่อ B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

N คือ จำนวนขดลวดทั้งหมด

n คือ จำนวนรอบต่อไฟฟ้า

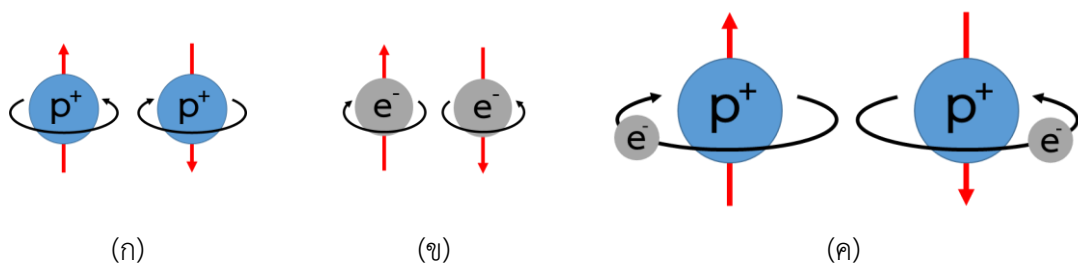


รูปที่ 2.13 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ (ก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด และ (ข) ภาพตัดขวางของขดลวดโซลินอยด์ในอุดมคติ

แก้ไขจาก : (28 august 2016). Magnetic field of a solenoid. Available: <http://www.kshitij-iitjee.com/Magnetic-field-of-a-solenoid>

2.3.3 โมเมนต์แม่เหล็ก

โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) หรือสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอะตอม เป็นสิ่งที่ใช้ในการอธิบายสภาพแม่เหล็กหรือความเป็นแม่เหล็ก (magnetism) ของวัสดุ ซึ่งแต่ละอะตอมภายในวัสดุประกอบไปด้วยนิวเคลียสที่มีทั้งโปรตรอนและนิวตรอน และยังมีอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสอีกด้วย ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุจึงเกิดจาก 3 สาเหตุคือ นิวเคลียสหมุนรอบตัวเอง (spin of nucleus) อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง (spin of electron) และอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส (electron orbital) แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจาก (ก) นิวเคลียสหมุนรอบตัวเอง (ข) อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง และ (ค) และอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส

ค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่นิวเคลียสหมุนรอบตัวเอง

$$\mu_{nucleus} = \frac{eh}{4\pi m_p c} \quad (2.30)$$

ค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง

$$\mu_{spin} = \frac{eh}{4\pi mc} \quad (2.31)$$

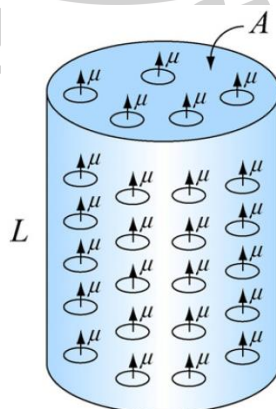
ค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียส

$$\mu_{orbital} = \frac{ehl}{4\pi mc} \quad (2.32)$$

เมื่อ	e	คือ ประจุของอิเล็กตรอน	มีค่าเท่ากับ $1.60217662 \times 10^{-19}$	คูลอมบ์ (C)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์	มีค่าเท่ากับ $6.62607004 \times 10^{-34}$	จูล · วินาที (J · s)
	l	คือ เลขควอนตัมออร์บิทัล (orbital quantum number = 0,1,2,...)		
	m	คือ มวลของอิเล็กตรอน	มีค่าเท่ากับ $9.10938356 \times 10^{-31}$	กิโลกรัม (kg)
	m_p	คือ มวลของโปรตอน	มีค่าเท่ากับ $1.6726219 \times 10^{-27}$	กิโลกรัม (kg)
และ	c	คือ ความเร็วแสง	มีค่าเท่ากับ 3.00×10^8	เมตรต่อวินาที (m/s)

2.3.4 แมกนีไทเซชัน

ภายในวัสดุแม่เหล็กประกอบด้วยโมเมนต์แม่เหล็กมากมาย สมมติให้วัสดุแม่เหล็กชิ้นหนึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัด A ยาว L ที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก μ จำนวน N ตัว วางในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วัสดุแม่เหล็กทรงกระบอกที่มีโมเมนต์แม่เหล็กจำนวน N ตัว

ที่มา : (28 august 2016). Ampere's Law. Available: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>

โดยผลรวมโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิต่อปริมาตร เรียกว่า แมกนีไทเซชัน (magnetization) \vec{M} แสดงดังสมการ

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i \quad (2.33)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัสดุแม่เหล็กในหน่วยลูกบาศก์เมตร (m^3)

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ เป็นดังสมการที่(2.34)

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M} \quad (2.34)$$

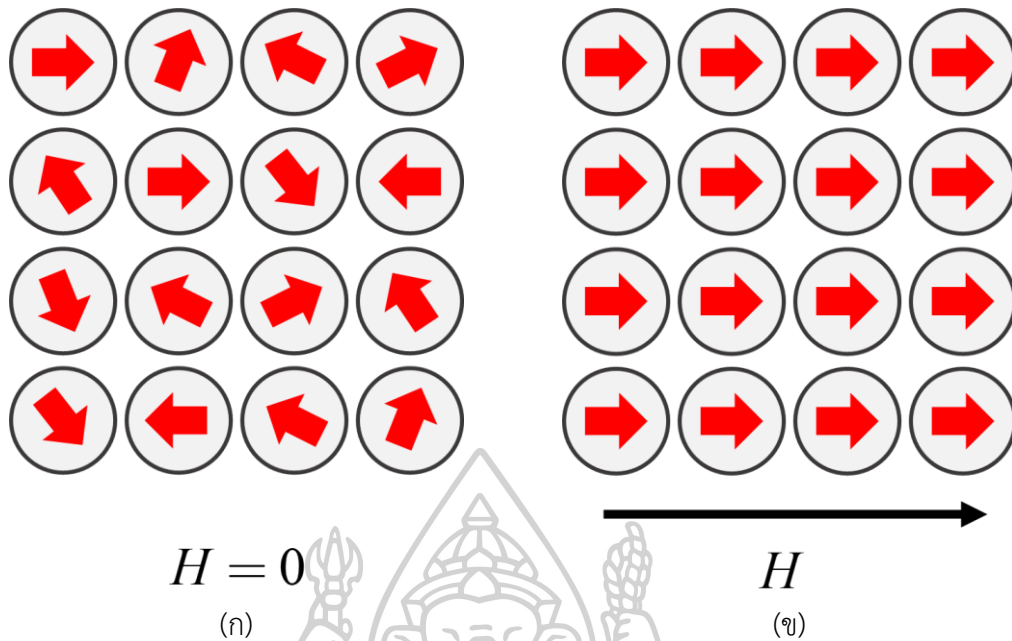
เมื่อ μ_0 คือ ค่าความซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (permeability of vacuum) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร (H/m)

เมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาพันด้วยขดลวดโซลินอยด์แล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดพบว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความเข้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแท่งแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะแม่เหล็ก ดังนั้นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำให้แท่งแม่เหล็กเกิดสถานะแม่เหล็ก เป็นดังสมการที่ (2.35)

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (2.35)$$

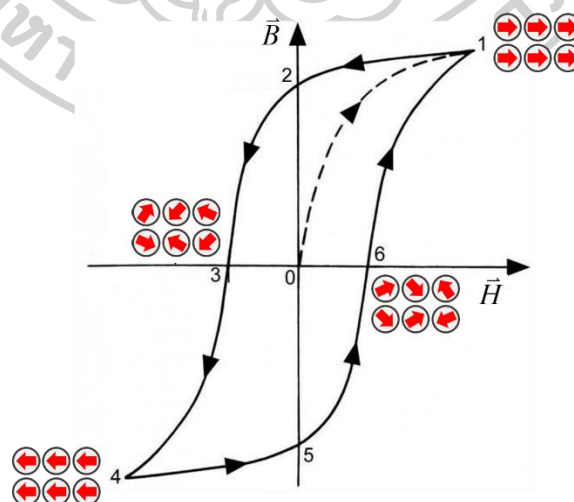
2.3.5 สารแม่เหล็กเฟอร์โรและอีสเทอร์ซีส์

สารแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic material) เป็นสารแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเป็นกลุ่มเล็ก ๆ เรียกว่า โดเมน (domain) โดยโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะมีการเรียงตัวแบบสุ่ม แสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันรวมเป็นศูนย์ ($\vec{M} = 0$) แต่เมื่อนำสารแม่เหล็กไปวางในสนามแม่เหล็กภายนอก แมกนีไทเซชันภายในสารแม่เหล็กจะค่อย ๆ หมุนจนมีทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งเรียกว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization : M_s) และเมื่อนำสารแม่เหล็กออกจากบริเวณสนามแม่เหล็ก จะทำให้ค่าของแมกนีไทเซชันรวมลดลงแต่ไม่เป็นศูนย์ เรียกแมกนีไทเซชันจุดนี้ว่า แมกนีไทเซชันคงค้าง (magnetic remanence : M_r)



รูปที่ 2.16 โดเมนภายในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างสุ่ม และ (ข) การจัดเรียงของโมเมนต์แม่เหล็กตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก

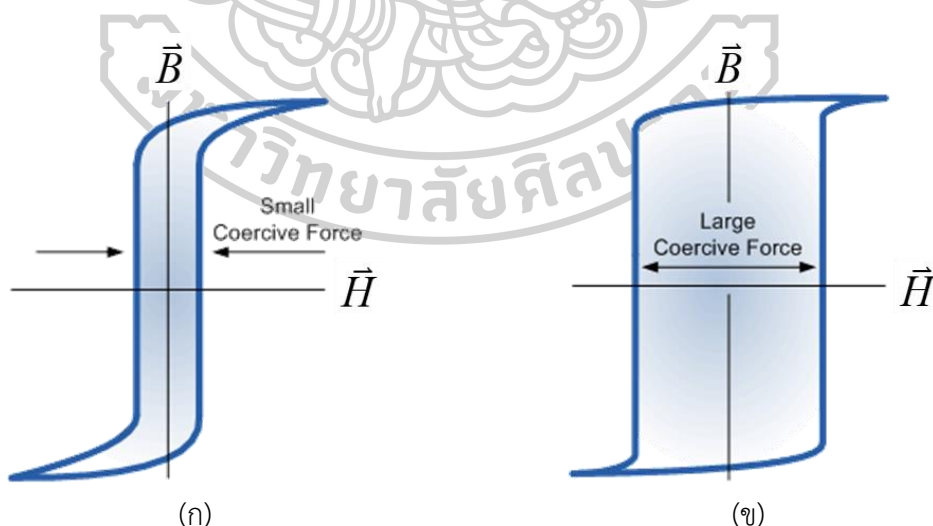
สารแม่เหล็กเฟอร์โร เป็นสารที่ใช้ในการผลิตหัวอ่าน/เขียนและแผ่นบันทึกข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสารแม่เหล็กเฟอร์โรแต่ละตัวมีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยทั่วไปคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถอธิบายได้ด้วยฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) ที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H} กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก \vec{B} แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ฮิสเทอรีซิสลูป

แก้ไขจาก : (28 august 2016). Hysteresis loop. Available: <https://www.quora.com/What-is-hysteresis-loss-Where-does-the-loss-actually-occur>

เมื่อเริ่มต้นไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกไปกระทำต่อสารแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กภายในจะเรียงตัวแบบสุ่ม จากนั้นทำค้อย ๆ ทำการใส่สนามแม่เหล็กภายนอกจากจุดที่ 0 ไปถึงจุดที่ 1 โมเมนต์แม่เหล็กภายในสารจะค้อย ๆ เปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำ ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงแรก เมื่อให้สนามแม่เหล็กจนถึงจุดที่ 1 โมเมนต์แม่เหล็กภายในสารแม่เหล็กทั้งหมดมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวหรือมีค่าสูงสุด (saturation magnetization : B_s) ต่อมาทำการลดสนามแม่เหล็กภายนอกจนเป็นศูนย์ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะค้อยๆ ลดลงตามเส้นโค้ง 1-2 แสดงให้เห็นว่าสารแม่เหล็กยังคงความแสดงสภาวะแม่เหล็กอยู่ถึงแม้ว่านำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้วก็ตาม โดยเรียกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจุดที่ 2 ว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิมิตัว (remanence magnetic flux density : B_r) จากนั้นใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรกด้วยค่าความเข้มเท่ากับ H_c ที่จุด 3 ซึ่งเรียกว่า ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity) จะทำให้สารแม่เหล็กไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก เมื่อเพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็กขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางลบตามเส้นโค้ง 3-4 จนกระทั่งถึงจุดอิมิตัวที่จุด 4 จะทำให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิมิตัวทางลบมีค่าเป็น $-B_s$ จากนั้นลดสนามแม่เหล็กภายนอกจนเป็นศูนย์ที่จุด 5 ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็น $-B_r$ หากให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศตรงข้ามอีกครั้ง จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค้อย ๆ เพิ่มขึ้น แต่จะไม่ทับเส้น 0-1 แต่จะเพิ่มตามเส้นโค้ง 5-6-1 ซึ่งจะกลายเป็น 1 รอบ เรียกว่า ฮิสเทอรีซิสลูป



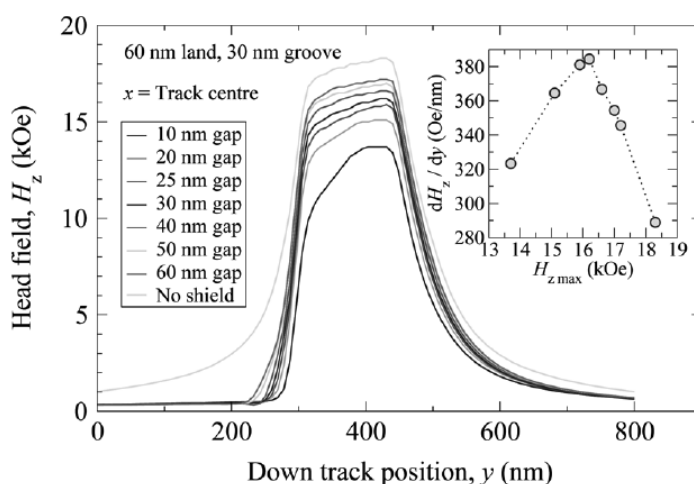
รูปที่ 2.18 ฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กเฟอร์ (ก) แบบอ่อน และ (ข) แบบแข็ง

แก้ไขจาก : (30 august 2016). Magnetic Materials. Available: <https://www.quora.com/What-is-retentivity-and-coercivity-in-magnetism-Explain-in-brief>

ฮีสเทอรีซิสลูปของสารแม่เหล็กเฟอร์โร นอกจากจะสามารถบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กได้แล้ว ยังสามารถแยกประเภทของสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ได้ด้วย ซึ่งสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบ่งได้ 2 ประเภทคือ สารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์อย่างอ่อน (soft ferromagnetic) และสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์อย่างแข็ง (hard ferromagnetic) ซึ่งมีลักษณะฮีสเทอรีซิสลูป แสดงดังรูปที่ 2.18

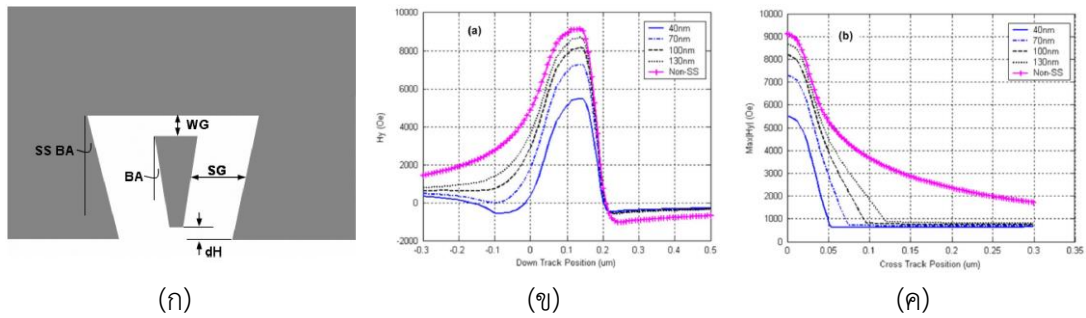
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีวิธีที่ใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กสามารถทำได้หลายวิธี ในปี 2006 ผู้วิจัยชื่อ Simon Greaves และคณะ[9] ได้หาวิธีการที่ทำให้เกรเดียนท์ (gradient) ของสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น และความกว้างของสนามแม่เหล็กมีขนาดลดลง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของแตรีกในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งรูปแบบของหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองเป็นหัวเขียนที่มีชิลด์ด้านหลัง (trailing shield : TS) ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มชิลด์ด้านหลังให้กับหัวเขียนแม่เหล็กนั้น ทำให้เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.19 และส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio : SNR) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแนวขวางแตรีก เมื่อช่องว่างระหว่างโพลหลักกับชิลด์ด้านหลังมีขนาดแตกต่างกัน และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก (ภาพเล็ก)

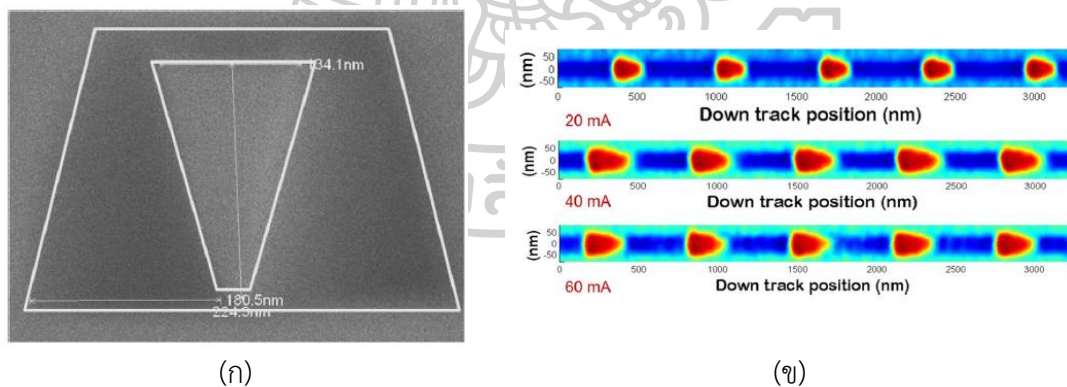
ที่มา : S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, "Trailing Shield Head Recording in Discrete Track Media," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 10, pp. 2408-2410, 2006.



รูปที่ 2.20 (ก) หัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากการจำลอง (ข) แนวดาวน์แทร็ค และ (ค) แนวครอสแทร็ค

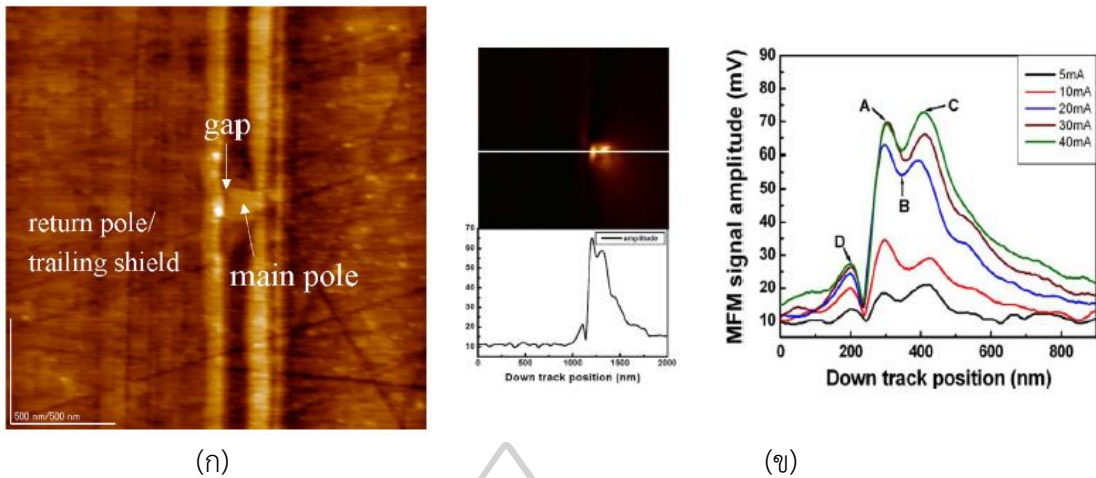
ที่มา : D. Z. Bai et al., "High Density Perpendicular Recording With Wrap-Around Shielded Writer," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 3, pp. 722-729, 2010.

ในปี 2010 Daniel Z. Bai และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาหัวเขียนแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบ (Wrap-around shielded : WAS) ซึ่งประกอบด้วยซิลด์ 2 ส่วนคือ ซิลด์ด้านหลังและซิลด์ด้านข้าง (side shield) ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองและการทดลอง พบว่าหัวเขียนชนิด WAS มีประสิทธิภาพมากกว่าหัวเขียนที่มีซิลด์ด้านหลังเพียงอย่างเดียว เนื่องจากซิลด์ด้านข้างของหัวเขียนชนิด WAS สามารถช่วยลดสนามรั่วไหลได้อย่างมาก และยังคงรักษาประสิทธิภาพด้านดาวน์แทร็คไว้ได้ ทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นแทร็คให้สูงขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.21 (ก) ภาพ SEM ของหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง และ (ข) ฟุตพริ้นท์ของหัวเขียนแม่เหล็ก ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 20 , 40 และ 60 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

ที่มา : Z.-M. Yuan, C. L. Ong, S. Ang, B. Liu, S. H. Leong, and M. Zhang, "Writer Footprint Measurement on Spinstand and Media Transition Curvature Characteristics," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 5, pp. 1738-1743, 2012.



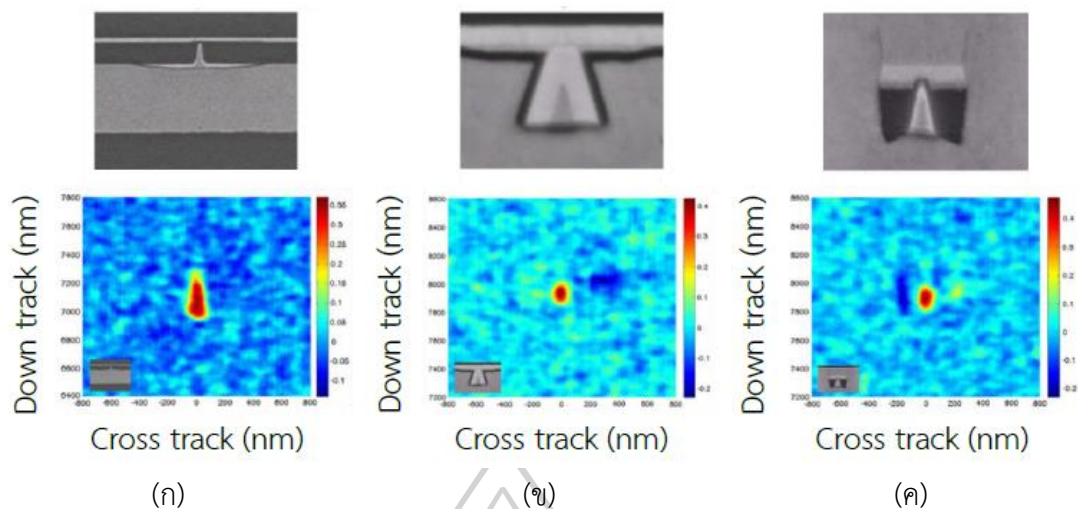
รูปที่ 2.22 (ก) ภาพหัวเขียนแม่เหล็กในการทดลอง และ (ข) ผลการกระจายตัวของหัวเขียนในแนวตามรัศมี

ที่มา : Wei Lu et al., " Magnetic Field Distribution in a Trailing-Edge Shielded Head by Frequency-Modulated Magnetic Force Microscopy," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 1479-1482, 2010

ในปี 2010 เช่นกัน Wei Lu [11] และคณะ ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขอบซิลด์ด้านหลัง โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีปริมาณแตกต่างกันให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก และใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กความถี่สูง (frequency-modulated magnetic force microscopy : FM-MFM) ที่หัววัดแม่เหล็กถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กแข็งวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น พบว่า แอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับหัวเขียนมีขนาดเพิ่มขี้น กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กความถี่สูงสามารถสร้างภาพสนามแม่เหล็กที่มีความละเอียดสูงได้

ในปี 2012 Zhi-Min Yuan และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาฟุตพริ้นท์ (footprint) ของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อทำจ่ายกระแสไฟฟ้าและใช้ความสูงในการเขียนข้อมูล (flying height : FH) ที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคสปินสแตนด์ (spin-stand technique) โดยมีหลักการคร่าว ๆ คือ เริ่มแรกทำการลบข้อมูลทั้งหมดบนแผ่นบันทึก จากนั้นนำหัวเขียนไปเขียนข้อมูลลงบนแทร็คกลางของแผ่นบันทึกจำนวนหลายพันรอบ แล้วทำการอ่านข้อมูลที่ได้บันทึกไปด้วยหัวอ่าน พบว่าเป็นเทคนิคที่สามารถวัดฟุตพริ้นท์ของหัวเขียนได้อย่างแม่นยำ

ในปี 2013 Yuhui Tang และคณะ [13] ใช้เทคนิคสเตชันนารีฟุตพริ้นท์ (stationary footprint technique) ในการศึกษาหัวเขียนแม่เหล็กที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ ได้แก่ หัวเขียนแบบมีซิลด์ด้านหลัง หัวเขียนแบบมีซิลด์ด้านหลังและซิลด์ด้านข้าง และหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม เป็นเทคนิคที่นำหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแต่ละลงบนพื้นผิวของแผ่นบันทึก เพื่อทำการเขียน



รูปที่ 2.23 ภาพหัวเขียนแม่เหล็กด้านแอร์แบริงเซอร์เฟซที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และภาพฟุตพริ้นท์ของหัวเขียน 3 ลักษณะ (ก) หัวเขียนที่มีซิลด์ด้านหลัง (ข) หัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบ และ (ค) หัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม

ที่มา : Y. Tang, S. Song, and L. Guan, "Characterization of Adjacent Track Erasure in Perpendicular Recording by a Stationary Footprint Technique," vol. 49, no. 2, pp. 744-750, 2013.

ข้อมูลลงไป ในขณะที่ทำการเขียนข้อมูลนั้นจะไม่มี การหมุนแผ่นบันทึก ซึ่งแตกต่างกับเทคนิคสปินสแตนด์ที่จะมีการหมุนแผ่นบันทึก พบว่า ภาพข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกหรือภาพฟุตพริ้นท์ของหัวเขียน (footprint image) ที่ได้จากการอ่านด้วยหัวอ่าน มีลักษณะที่สอดคล้องกับหัวเขียนจริง แสดงดังรูปที่ 2.23

วิธีการที่ใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก สามารถทำได้หลายวิธี แต่การศึกษานสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการใช้สปินสแตนด์เป็นวิธีการศึกษานสนามแม่เหล็กทางอ้อม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการศึกษานสนามแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เนื่องจากเป็นการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกหัวเขียนแม่เหล็กโดยตรง แล้วนำภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้ไปประมวลผลเป็นผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยขั้นตอนในการตรวจสอบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ผู้วิจัยนำเสนอจะอธิบายในบทถัดไป

บทที่ 3

การใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กศึกษาความเข้มและการกระจายตัว ของสนามแม่เหล็ก

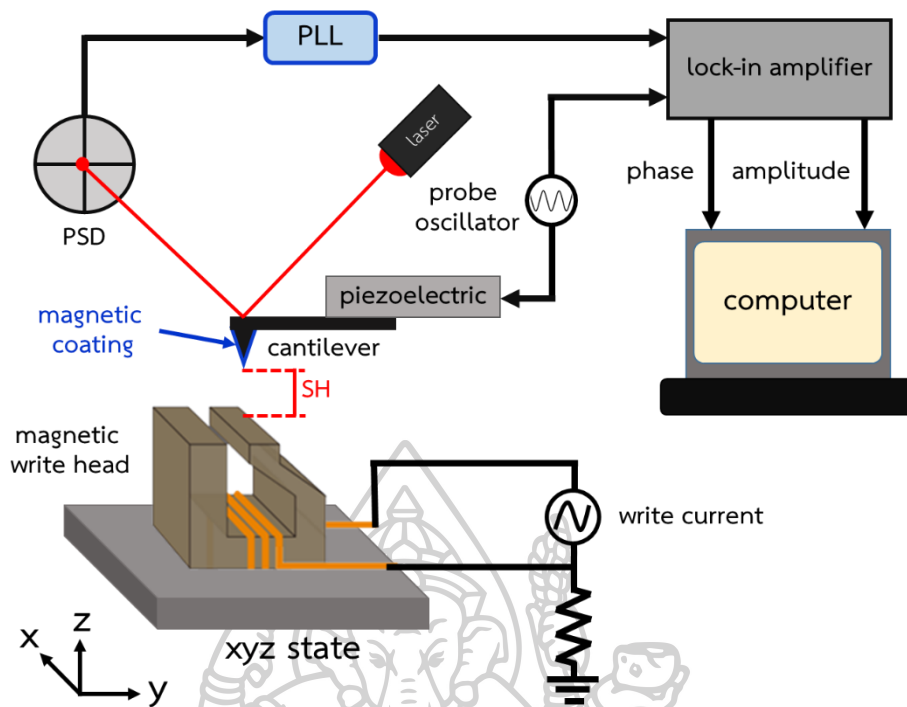
ความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน สามารถศึกษาได้ด้วยการสร้างแบบจำลองของหัวเขียน เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสร้างโมเดลหัวเขียนที่เสมือนจริง คู่กับการใช้สมการพื้นฐานทางแม่เหล็ก และเทคนิคการสร้างฟูตปรินท์ด้วยเทคนิคสปินแอสตันด์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หัวเขียนแม่เหล็ก ทำการเขียนข้อมูลแม่เหล็กลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล เพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กจากฟูตปรินท์ของสนามแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล เนื่องจากทั้งสองวิธีที่กล่าวมาเป็น การศึกษาสนามแม่เหล็กที่ไม่ได้ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กโดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการติดตั้งกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้สำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก การสร้างภาพสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก

3.1 การวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

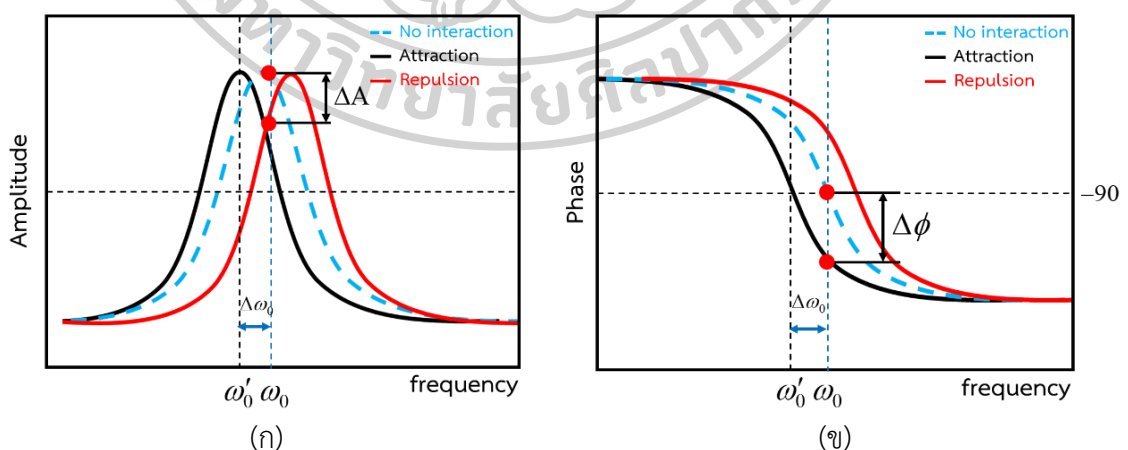
3.1.1 การติดตั้งและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การติดตั้งระบบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเพื่อศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยคาน (cantilever) ที่ปลายหัววัดถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กแบบอ่อนเพื่อให้คานตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก คานดังกล่าวติดอยู่กับเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) ซึ่งมีหน้าที่ในการสั่นคาน โดยความถี่ในการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของคาน เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนมากระทำกับหัววัดจะทำให้การสั่นของคานเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงได้จากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนคานและสะท้อนไปยังฉากรับของโฟโตดีเทคเตอร์ (photo-detector) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากโฟโตดีเทคเตอร์จะผ่านเฟสล็อกลูป (phase-locked loop) และถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (lock-in amplifier) ทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดการสั่นของคานออกมา แสดงดังรูปที่ 3.2 แต่เนื่องจากแอมพลิจูดการสั่นของคานมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงเฟส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสในการศึกษาความเข้มและการกระจายของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน



รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กสำหรับวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก

การสร้างสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดของหัวเขียน เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดไปเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเทเซชันภายในหัวเขียนให้อยู่ในทิศพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากหัวเขียน ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับทิศทางการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก แสดงดังตารางที่ 3.1



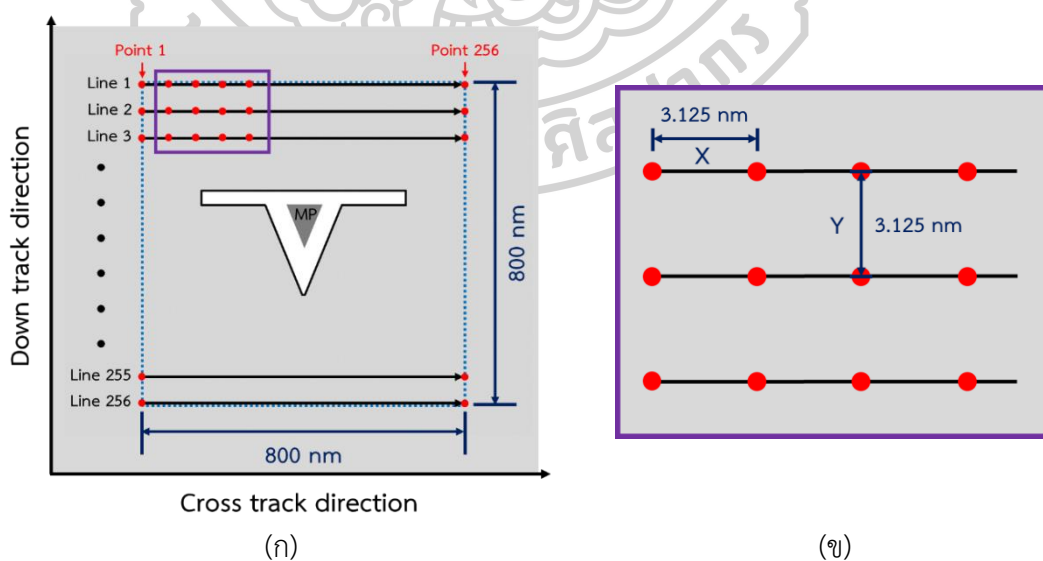
รูปที่ 3.2 การสั้นของคานที่ความถี่เรโซแนนท์ เมื่อมีแรงแม่เหล็กมากระทำ (ก) การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคาน และ (ข) การเปลี่ยนแปลงเฟสของคาน

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ใช้สำหรับวัดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก

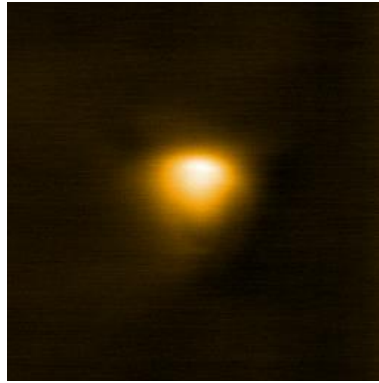
Parameter	Value
Scan height (nm)	10
Resonance frequency (kHz)	57.513
MFM Speed x ($\mu\text{m} / \text{s}$)	90
MFM Speed y ($\mu\text{m}/\text{s}$)	90
Scan size (nm x nm)	800 x 800
Resolution (pixel x pixel)	256 x 256
Write current (mA)	AC 30
Write frequency (MHz)	2

3.1.2 การสร้างภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็ก

ขั้นตอนการสร้างภาพสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนทำได้โดยกำหนดพื้นที่สำหรับวัดสนามแม่เหล็กเป็น 800 นาโนเมตร x 800 นาโนเมตร เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณหัวเขียนแม่เหล็ก และแบ่งความละเอียดในการวัดข้อมูลเป็น 256 พิกเซล x 256 พิกเซล ทำการวัดสนามแม่เหล็กตามเส้นการสแกนจากซ้ายไปขวา แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งระยะห่างของแต่ละตำแหน่งในการวัดสนามแม่เหล็กในแนวแกน X และ Y เท่ากับ 3.125 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)



รูปที่ 3.3 การสร้างภาพสนามแม่เหล็ก (ก) เส้นการสแกนและตำแหน่งการวัดสนามแม่เหล็ก (ข) ระยะห่างระหว่างตำแหน่งในการสแกน



รูปที่ 3.4 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

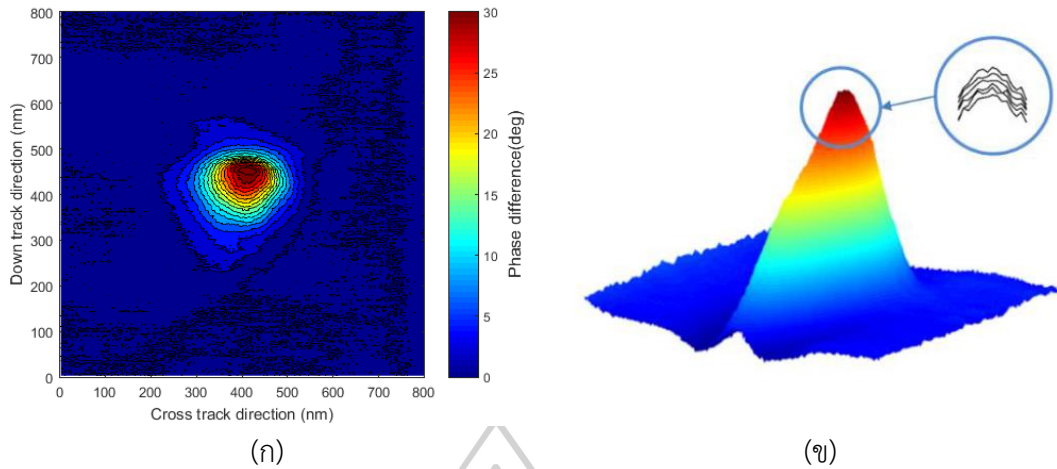
ภาพสนามแม่เหล็กที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยสีบนภาพ แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสในแต่ละจุด ซึ่งบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กจะทำให้ภาพบริเวณนั้นมีความสว่างและบริเวณที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กภาพบริเวณนั้นจะมีความมืด

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นไฟล์ข้อมูลแบบของตาราง แสดงดังรูปที่ 3.5 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการประมวลผลเป็นภาพด้วยโปรแกรม MATLAB® และสร้างเป็นคอนทัวร์และเส้นข้อมูล แสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่าข้อมูลที่ได้มามีสัญญาณรบกวน (noise) ผู้วิจัยจึงได้ทำการลบสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการเฉลี่ยข้อมูล (moving average method) ทั้งในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค

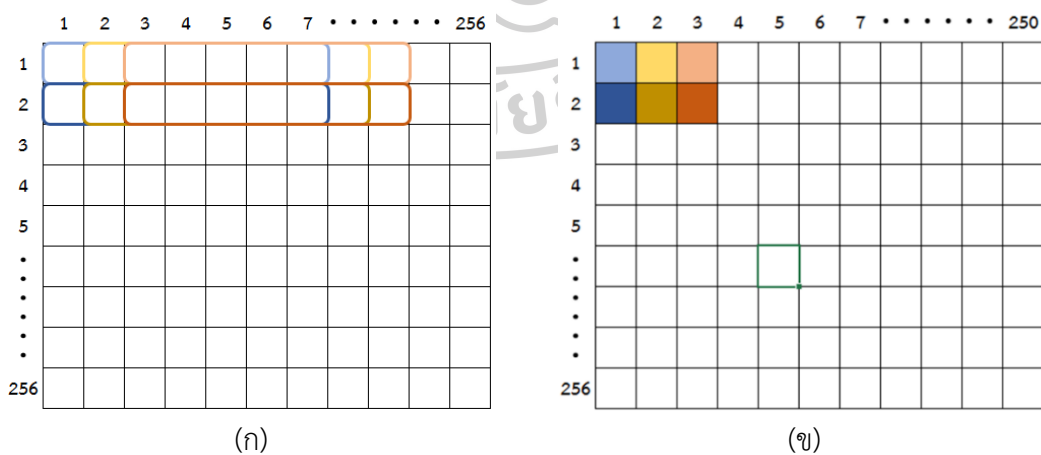
		Cross track direction									
		1	2	3	4	5	6	7	256
Down track direction	1	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)	(6,1)	(7,1)			(256,1)
	2	(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(5,2)	(6,2)	(7,2)			(256,2)
	3	(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)	(5,3)	(6,3)	(7,3)			(256,3)
	4	(1,4)	(2,4)	(3,4)	(4,4)	(5,4)	(6,4)	(7,4)			(256,4)
	5	(1,5)	(2,5)	(3,5)	(4,5)	(5,5)	(6,5)	(7,5)			(256,4)
	...										
	...										
	...										
	...										
	256	(1,256)	(2,256)	(3,256)	(4,256)	(5,256)	(6,256)	(7,256)			(256,256)

รูปที่ 3.5 ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

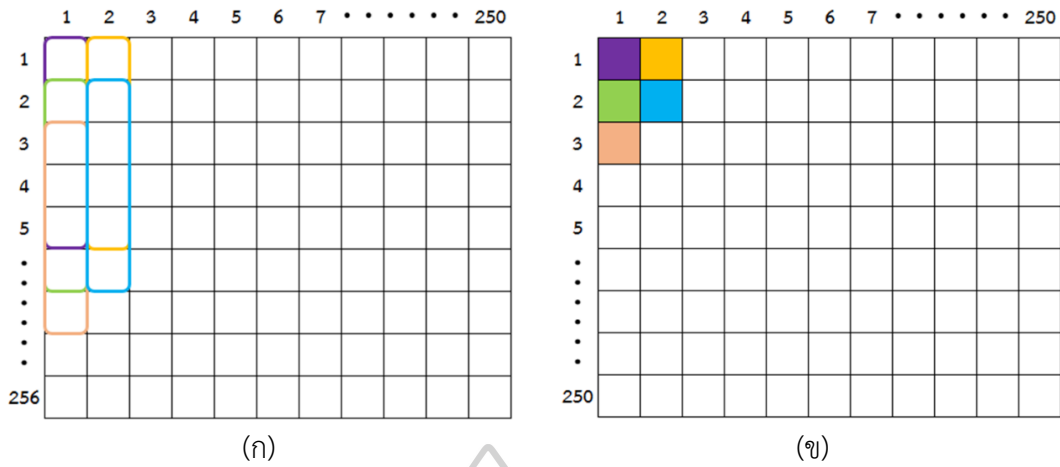


รูปที่ 3.6 ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (ก) คอนทัวร์ (ข) ภาพ 3 มิติ

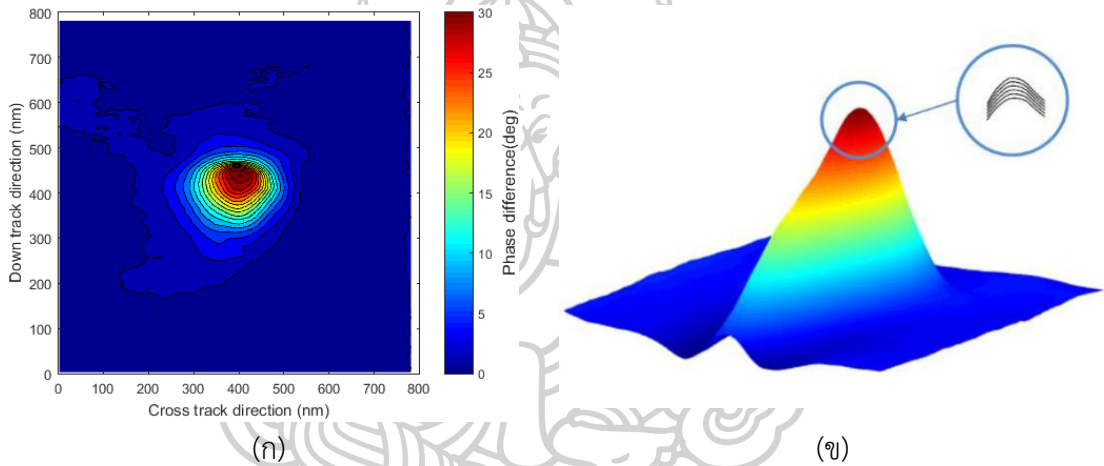
การเฉลี่ยข้อมูลในแนวครอสแทร็คทำได้โดยเลือกข้อมูลที่อยู่ติดกัน 7 ตำแหน่งในแนวครอสแทร็ค ยกตัวอย่างเช่น (1,1) (2,1) (3,1) (4,1) (5,1) (6,1) และ (7,1) ทำการเฉลี่ยข้อมูลเป็น 1 จุดข้อมูลแล้วใส่ลงในตำแหน่งที่ (1,1) ทำเช่นนี้กับทุก ๆ ข้อมูลในตาราง แสดงดังรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ทำการเฉลี่ยในแนวครอสแทร็คแล้ว มาทำการเฉลี่ยข้อมูลในแนวดาวน์แทร็ค โดยเลือกข้อมูลที่อยู่ติดกัน 5 ตำแหน่งในแนวดาวน์แทร็ค เช่น (1,1) (1,2) (1,3) (1,4) และ (1,5) ทำการเฉลี่ยข้อมูลเป็น 1 จุดข้อมูลแล้วใส่ลงในตำแหน่งที่ (1,1) แสดงดังรูปที่ 3.8 หลังจากการเฉลี่ยข้อมูลแล้ว จากข้อมูลที่มีขนาด 256 พิกเซล x 256 พิกเซล จะเหลือข้อมูลขนาด 250 พิกเซล x 250 พิกเซล เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการสร้างเป็นคอนทัวร์และเส้นข้อมูล พบว่า ข้อมูลรบกวนได้ลดลงจากเดิม แสดงดังรูปที่ 3.9



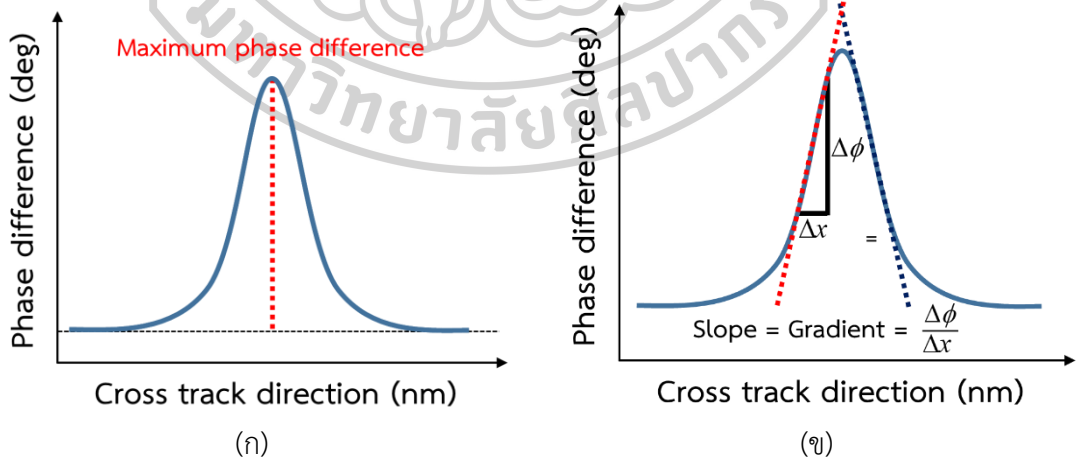
รูปที่ 3.7 การเฉลี่ยข้อมูลทุก ๆ 7 ตำแหน่งในแนวครอสแทร็ค



รูปที่ 3.8 การเฉลี่ยข้อมูลทุก ๆ 5 ตำแหน่งในแนวดาวน์แทร็ค



รูปที่ 3.9 ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ผ่านการเฉลี่ย (ก) คอนทัวร์ (ข) ภาพ 3 มิติ



รูปที่ 3.10 การหาค่า (ก) การเปลี่ยนแปลงเฟสสูงสุด และ (ข) เกรเดียนท์ของข้อมูลที่เฉลี่ยแล้ว

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ทำกรเฉลี่ยแล้ว ทำได้โดยการเลือกเส้นข้อมูลที่มีความต่างเฟสสูงสุดในทั้งแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค หลังจากนั้นนำเส้นข้อมูลที่เลือกทั้งสองแนวมาทำการหาค่า

ความต่างเฟสสูงสุด (Maximum phase difference) แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และหาเกรเดียนท์ (gradient) จากความชันของกราฟทางด้านซ้ายและด้านขวา แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข) ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรม MATLAB® แสดงดังต่อไปนี้

```
clear all
clc; clf;
close all
% ===== %
% Open data
% ===== %
mfmpphase = csvread('D:\1.csv');
mfmdata(1).phase = mfmpphase;
```

ส่วนที่ 1

คำสั่งเปิดไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการวัด
สนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง MFM

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ใช้ในการเปิดไฟล์ข้อมูลค่าความต่างเฟสที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง MFM ซึ่งอยู่ในรูปของไฟล์ Excel แล้วนำไปเก็บในตัวแปรที่ชื่อว่า mfmdata(1).phase

```
% ===== %
% Set parameter
% ===== %
for j = 1:1 → เริ่มต้น Loop
Moving_Avg = 7;
Lines = 5;
Start_No = -4;
Count = 11;
std_line = 0;
size_mfmdata = size(mfmdata);
mfmdata(j).phase = mfmdata(j).phase;
[numy,numx] = size(mfmdata(j).phase);
size_x = 800e-9; %defined in MFM measurements
size_y = 800e-9; %defined in MFM measurements
xstep = size_x/numx;
ystep = size_y/numy;
```

ส่วนที่ 2

กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
ในการประมวลผลภาพ

กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ
เฉลี่ยข้อมูลในส่วนที่ 3

เป็นการอ่านขนาดของไฟล์ข้อมูลแล้ว
นำไปเก็บไว้ยังตัวแปรที่กำหนด

กำหนดขนาดพื้นที่ที่ใช้ใน
การวัดสนามแม่เหล็ก (nm)

ระยะห่างของแต่ละตำแหน่ง
ในการวัดสนามแม่เหล็ก


```

%find maximum amplitude along the y axes
y = min(mfm,[],2); %down track data
x = min(mfm,[],1); %cross track data
%locate the maximum peak postion x and y
peak_posx = find(y == min(min(mfm,[],2)));
peak_posy = find(x == min(min(mfm,[],1)));

max_data = max(max(mfm,[],2));
min_data = min(min(mfm,[],2));

```

เป็นส่วนที่ใช้ในการหาตำแหน่ง
ของค่าความต่างเฟสสูงสุด ทั้งใน
แนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล โดยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด เป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง MFM และเป็นส่วนที่คำนวณระยะห่างของแต่ละตำแหน่งในการวัดสนามแม่เหล็กในหน่วยนาโนเมตร

```

% ===== %
% Average data
% ===== %

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

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

```

ส่วนที่ 3

การเฉลี่ยข้อมูลในแนวครอสแทร็ค
และดาวน์แทร็ค

```
t = histogram( Bundle_line_moving);
Bundle_line_moving = Bundle_line_moving-t;
```

เป็นส่วนที่ใช้ในการปรับค่าความต่างเฟสต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 0

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ใช้การเฉลี่ยข้อมูลในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค แล้วนำข้อมูลที่ทำการเฉลี่ยแล้วมาเก็บไว้ในตัวแปรชื่อ Bundle_line_moving จากนั้นทำการปรับค่าความต่างเฟสของทุกการตรวจวัดให้มีค่าความต่างเฟสต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 0

```
% ===== %
% Surface Plot Bundle_line_moving in nm scale
% ===== %
[numy_moving,numx_moving] = size(Bundle_line_moving);
figure(12)
xplot=[1*xstep*1e9:xstep*1e9:numx_moving*xstep*1e9];
yplot=[1*ystep*1e9:ystep*1e9:numy_moving*ystep*1e9];
[xx,yy] = meshgrid(xplot,yplot);
surf(xx,yy,Bundle_line_moving);
shading INTERP
view(2)
axis([0 numx*xstep*1e9 0 numy*ystep*1e9])
xlabel('Cross track direction (nm)')
ylabel('Down track direction (nm)')
ylim([0 800])
xlim([0 800])
axis equal
colormap(jet);
colorbar;
caxis([0 30]);
ylabel(colorbar, 'Phase difference(deg)','FontSize',12);
view(2)
```

ส่วนที่ 4
การสร้างภาพ 3 มิติ
ของสนามแม่เหล็ก

การสร้างกริด
เพื่อระบุตำแหน่งของข้อมูล

กำหนดค่าแกน x และแกน y

กำหนดค่าแกน x และแกน y (ต่อ)

กำหนดค่าแถบสี

ส่วนที่ 4 การสร้างภาพ 3 มิติของภาพสนามแม่เหล็กที่ทำการเฉลี่ยข้อมูลในหน่วยนาโนเมตร และกำหนดช่วงของแถบสีที่ใช้ในการบอกความแตกต่างของค่าความต่างเฟส

```

% ===== %
% Contour Plot Bundle_line_moving in nm scale
% ===== %
v = floor(min(min(Bundle_line_moving,[],2))):2:(max(max(Bundle_line_moving,[],2)));
[numy_moving,numx_moving] = size(Bundle_line_moving);
figure(1)
xplot=[1*xstep*1e9:xstep*1e9:numx_moving*xstep*1e9];
yplot=[1*ystep*1e9:ystep*1e9:numy_moving*ystep*1e9];
[xx,yy] = meshgrid(xplot,yplot);
[C3,h3] =contourf(xx,yy,Bundle_line_moving,v);
[C3,h3] =contourf(xx,yy,Bundle_line_moving,v);
view(2)
axis([0 numx*xstep*1e9 0 numy*ystep*1e9]);
axis equal
xlabel('Cross track direction (nm)')
ylabel('Down track direction (nm)')
ylim([0 800])
xlim([0 800])
colormap(jet);
colorbar;
caxis([0 30]);
ylabel(colorbar, 'Phase difference(deg)','FontSize',12);
view(2)

```

ส่วนที่ 5 การสร้างคอนทัวร์ของภาพสนามแม่เหล็กที่ทำการเฉลี่ยข้อมูลในหน่วยนาโนเมตร พร้อมทั้งกำหนดช่วงของแถบสี

```

% ===== %
% Maximum phase difference
% ===== %
peakxline = x;
peakpos_maxpeakxline = find(peakxline == max(peakxline));

```

ส่วนที่ 6

การคำนวณหาค่าความต่างเฟสสูงสุด

```

phasecline = peakxline((peakpos_maxpeakxline)-80:(peakpos_maxpeakxline)+80);
Max_Phase = max(phasecline);

```

ส่วนที่ 6 เป็นส่วนที่ใช้ในการหาค่าความต่างเฟสสูงสุด โดยการหาดำแหน่งที่มีค่าเฟสสูงสุด แล้วนำเส้นข้อมูลทั้งในแนวครอสแทร์คและดาวน์แทร์คที่ผ่านจุดสูงสุด มาสร้างเป็นเส้นข้อมูล จากนั้นอ่านค่าความต่างเฟสสูงสุด แล้วนำไปเก็บไว้ในตัวแปรที่ชื่อว่า Max_Phase

```

% ===== %
% Gradient
% ===== %
x = max(Bundle_line_moving,[],1);
y = max(Bundle_line_moving,[],2);
peak_posx_moving = find(y == max(max(Bundle_line_moving,[],2)));
peak_posy_moving = find(x == max(max(Bundle_line_moving,[],1)));
base_x = min(x);
maxamp = Bundle_line_moving(peak_posx_moving,peak_posy_moving);
phase_range = maxamp - std_line;
basedata_x = find(x > (std_line + (0.5*phase_range(1))));
% ===== %
% Left of gradient
% ===== %
up = 8;
down = 2;
xdata = basedata_x(1)-down:1:basedata_x(1)+up;
xdata = xdata*xstep*1e9;
%convert to nm
ydata = x(basedata_x(1)-down:basedata_x(1)+up);
fit1 = polyfit(xdata,ydata,1);
%find a slope using polyfit()
xfit1 = (peak_posy_moving-45:peak_posy_moving+8)*xstep*1e9;
yfit1 = fit1(1).*xfit1 + fit1(2);

```

ส่วนที่ 7
การคำนวณหาเกรเดียนท์ของ
ค่าความต่างเฟส

สมการพหุนามกำลังหนึ่ง ที่ใช้ในการหาเกรเดียนท์

```

figure(2)
posx = 1e9*xstep*(1:length(x));
plot(posx,x,'.b')
axis([0 800 -10 50])
xlim ([0 800]);
ylim ([-10 50]);
xlabel('Cross track direction (nm)')
ylabel('Phase difference(deg)')
hold on
plot(xdata,ydata,'or');
hold on
plot(xfit1,yfit1,'r-',xfit1,yfit1,'r-');
hold on;

% ===== %
% Right of gradient
% ===== %

up = 2;
down = 2;
NN = length(basedata_x);
xdata = basedata_x(NN)-up:1:basedata_x(NN)+down;
xdata = xdata*xstep*1e9;
%convert to nm
ydata = x(basedata_x(NN)-up:basedata_x(NN)+down);
fit2 = polyfit(xdata,ydata,1);
%find a slope using polyfit()
xfit2 = (peak_posy_moving-5:peak_posy_moving+40)*xstep*1e9;
yfit2 = fit2(1).*xfit2 + fit2(2); } สมการพหุนามกำลังหนึ่ง ที่ใช้ในการหาเกรเดียนท์

```

```

figure(2)
posx = 1e9*xstep*(1:length(x));
plot(posx,x,'b');
hold on;
plot(xdata,ydata,'or');
hold on
plot(xfit1,yfit1,'r-',xfit2,yfit2,'r-');
hold on;
axis([0 800 -10 50]);
xlim ([0 800]);
ylim ([-10 50]);

Gradient_L = fit1(1);
Gradient_R = fit2(1);

```

เกรเดียนท์ ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของเส้นข้อมูล

ส่วนที่ 7 เป็นส่วนที่ใช้ในการเกรเดียนท์ ทำได้โดยการนำเส้นข้อมูลที่ได้จากส่วนที่ 6 มาทำการหาความชัน โดยการใช้สมการพหุนามกำลังหนึ่ง

```

% ===== %
% Results
% ===== %
Results = [Max_Phase(1),Gradient_L,Gradient_R]
end → จบ Loop

```

ส่วนที่ 8

ผลการคำนวณทั้งหมดที่ใช้ในการพิจารณา

ส่วนที่ 8 เป็นส่วนที่นำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมทั้งหมด คือ ค่าความต่างเฟสสูงสุด เกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟส ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา มารวมไว้ในตัวแปรชื่อ Results เพื่อความสะดวกในการเก็บข้อมูล

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB® คือค่าความต่างเฟสสูงสุด และค่าเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟส โดยผู้วิจัยใช้ค่าความต่างเฟสสูงสุดในการพิจารณาความเข้มข้นแม่เหล็กสูงสุดที่ออกจากหัวเขียน เมื่อหัวเขียนแม่เหล็กบริเวณโพลหลักมีขนาดต่างกัน และใช้

ค่าเกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟส ดังสมการที่ (3.1) ในการพิจารณาขนาดของช่องว่างระหว่างโพลหลักและซิลด์ที่ต่างกัน

$$\text{Gradient} = \frac{\Delta\phi}{\Delta x} \quad (3.1)$$

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ค่าความต่างเฟสสูงสุด และค่าเกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟส ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อขนาดและลักษณะของหัวเขียนมีความแตกต่างกัน ซึ่งหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้สำหรับการวิจัย และผลที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก จะกล่าวในบทต่อไป



บทที่ 4

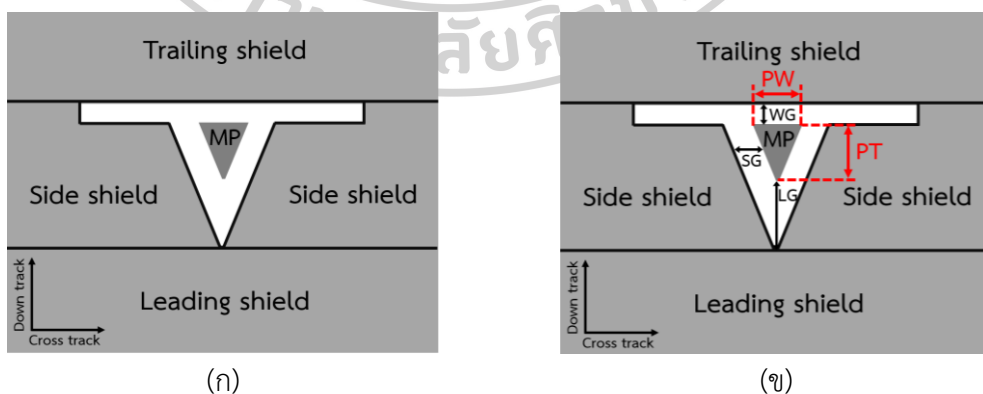
การศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย หัวเขียนที่ใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มปริมาณความหนาแน่นในการจัดข้อมูล โดยหัวเขียนที่ใช้ในปัจจุบันเป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ ซึ่งชิลด์มีหน้าที่ในการควบคุมการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน

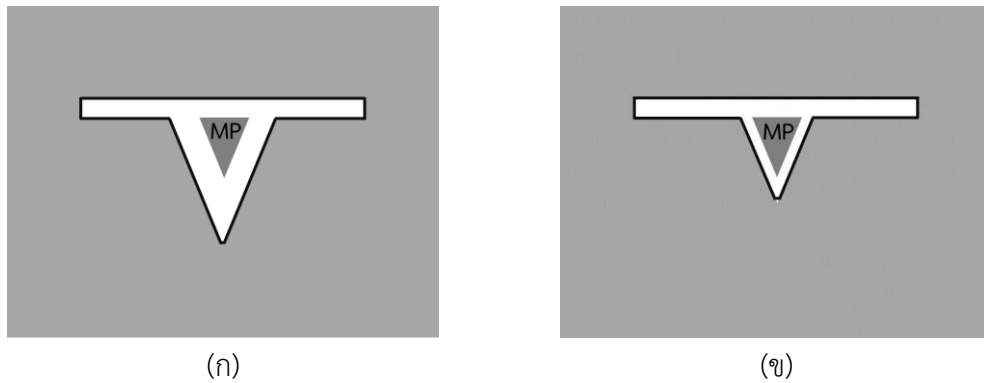
ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กออกจากหัวเขียนที่ต่างกัน 2 แบบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน และการศึกษาเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก

4.1 การเตรียมตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองที่ใช้ในการทดลอง

หัวเขียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ (full wrap around shield : FWAS) โดยมีมุมมองด้านแอร์แบริงเซอร์เฟซ (air bearing surface : ABS) แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) ประกอบด้วยโพลหลัก (main pole : MP) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก และชิลด์ที่ล้อมรอบโพลหลัก (shield) โดยชิลด์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ชิลด์ด้านข้าง (side shield : SS) ทำหน้าที่เพิ่มเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กในแนวครอสแทร็ค (cross track direction) และเทรลลิงชิลด์ (trailing shield : TS) กับลีดดิ้งชิลด์ (leading shield : LS) ทำหน้าที่เพิ่มเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กในแนวดาวน์แทร็ค (down track direction)



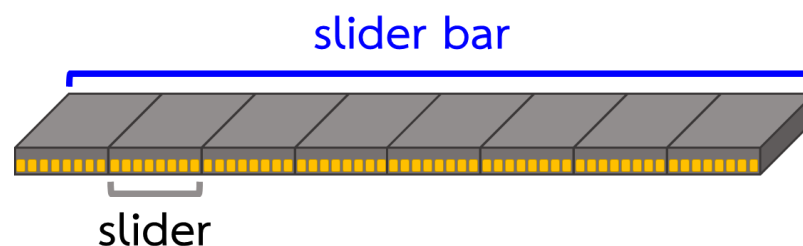
รูปที่ 4.1 โครงสร้างหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) หัวเขียนแม่เหล็กแบบมีชิลด์ล้อมรอบ และ (ข) พารามิเตอร์ของหัวเขียนแม่เหล็ก



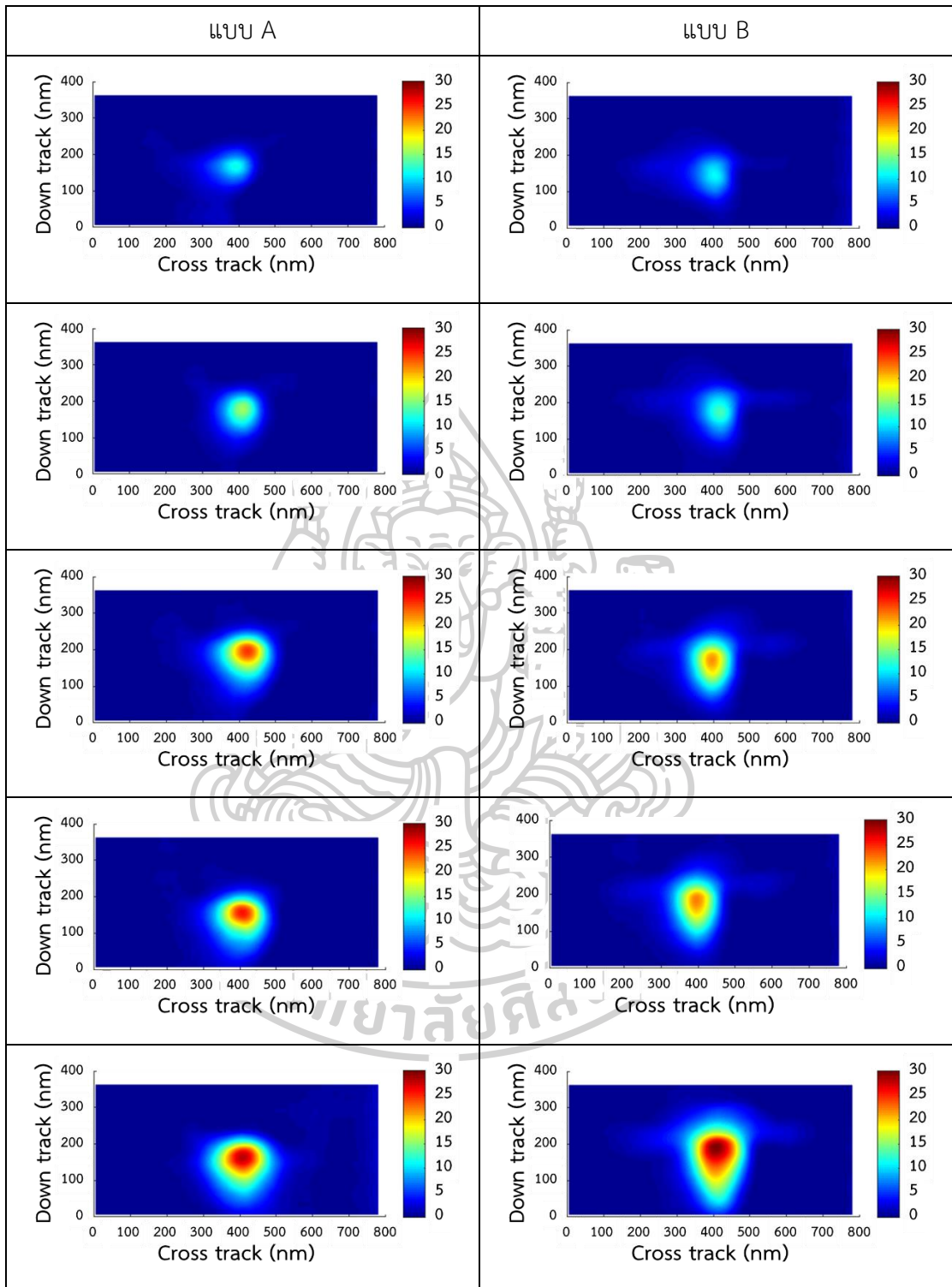
รูปที่ 4.2 หัวเขียนแม่เหล็กแบบซิลด์ล้อมรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ก) หัวเขียนแม่เหล็กแบบ A และ (ข) หัวเขียนแม่เหล็กแบบ B

พารามิเตอร์ของหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ประกอบด้วยความกว้างของโพลหลัก (pole width : PW) ความหนาของโพลหลัก (pole thickness : PT) ช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ด้านข้าง (side gap : SG) ช่องว่างระหว่างโพลหลักกับเทรลลิงซิลด์ (write gap : WG) และช่องว่างระหว่างโพลหลักกับลีดดิ้งซิลด์ (leading gap : LG) ทั้งนี้เมื่อพารามิเตอร์ของหัวเขียนที่กล่าวมาเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนแม่เหล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบ แสดงดังรูปที่ 4.2

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็ก เริ่มจากการนำเอาแผ่นเวเฟอร์ (wafer) ซึ่งเป็นแผ่นที่บรรจุหัวเขียนแม่เหล็กจำนวนมากมาตัดเป็นสไลด์เดอร์บาร์ (slider bar) แสดงดังรูปที่ 4.3 แล้วนำสไลด์เดอร์บาร์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า เพื่อให้ได้หัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดแตกต่างกัน หลังจากนั้นนำไปตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนด้วยเครื่อง MFM เพื่อทำการหาแนวโน้มระหว่างขนาดของหัวแม่เหล็กกับค่าความต่างเฟสสูงสุด กำหนดพื้นที่สำหรับวัดสนามแม่เหล็กเป็น 800 นาโนเมตร x 400 นาโนเมตร และแบ่งความละเอียดในการวัดข้อมูลเป็น 256 พิกเซล x 64 พิกเซล หลังจากนั้นนำหัวเขียนแม่เหล็กที่ทำการวัดสนามแม่เหล็กแล้ว ไปทำการถ่ายภาพหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อนำภาพที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลเทียบกับสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก

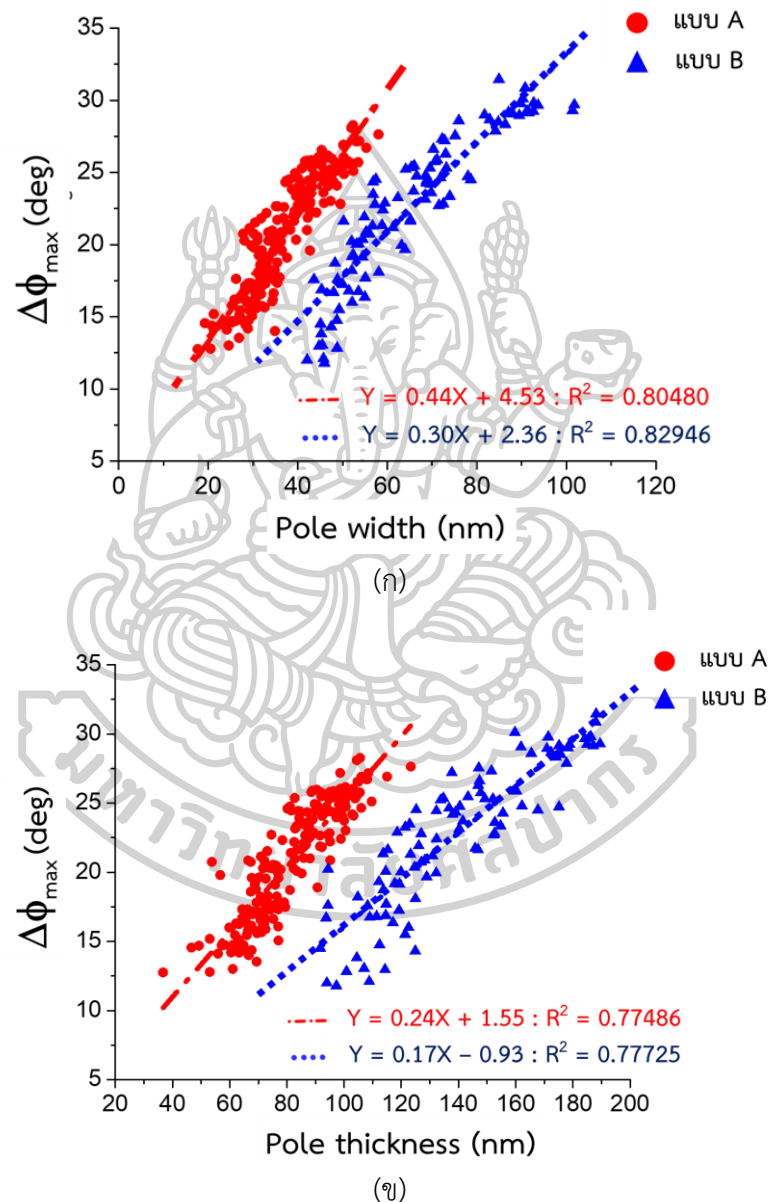


รูปที่ 4.3 หัวเขียนที่อยู่ในรูปสไลด์เดอร์บาร์



รูปที่ 4.4 ภาพสนามแม่เหล็กบางส่วนที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MFM ของหัวเขียนทั้ง 2 แบบ

ภาพสนามแม่เหล็กที่มีขนาดหัวเขียนแตกต่างกันบางส่วนที่ได้จากการวัด แสดงดังรูปที่ 4.4 แถบสีด้านข้างแสดงถึงค่าความต่างเฟส ซึ่งสีฟ้าแทนบริเวณที่มีค่าความต่างเฟสต่ำ สีแดงแทนบริเวณที่มีค่าความต่างเฟสสูงทำการพิจารณาค่าความต่างเฟสสูงสุดที่ได้จากการวัดกับขนาดของหัวเขียนพบว่า ค่าความต่างเฟสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างและความหนาของหัวเขียนแม่เหล็กขนาดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.5

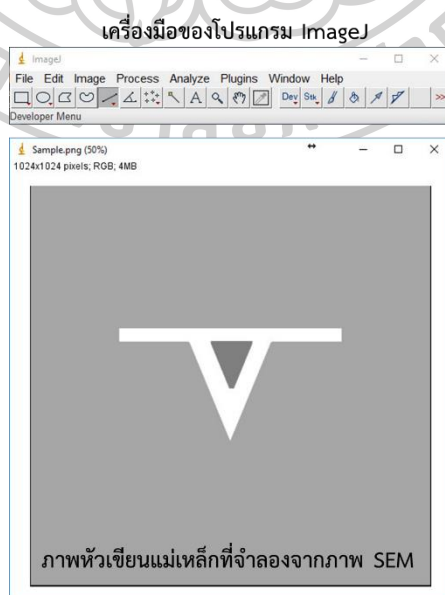


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสสูงสุด ($\Delta\phi_{\max}$) กับ (ก) ความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (PW) และ (ข) ความหนาหัวเขียนแม่เหล็ก (PT) ของกลุ่มตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็กทั้ง 2 แบบ

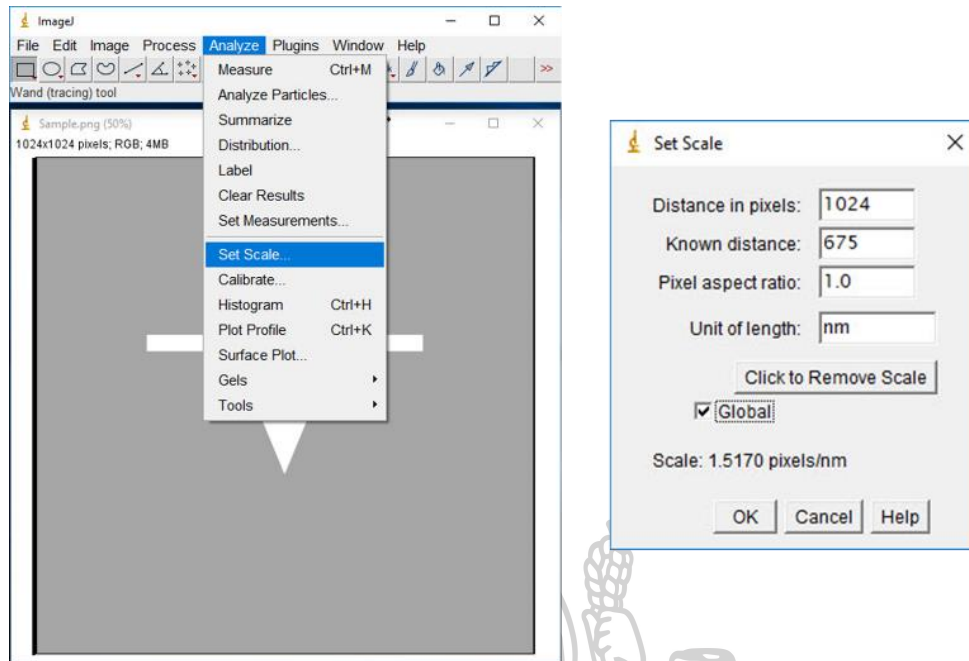
เนื่องจากการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน จำเป็นต้องใช้ข้อมูลทั้งในแนวครอสแตรีกและดาวน์แตรีกของสนามแม่เหล็กในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จึงทำให้ต้องเพิ่มพื้นที่ในการวัดสนามแม่เหล็กเป็น 800 นาโนเมตร x 800 นาโนเมตร และความละเอียดในการวัดสนามแม่เหล็กเป็น 256 พิกเซล x 256 พิกเซล เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลในแนวดาวน์แตรีก แต่เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่และความละเอียดในการวัดสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ระยะเวลาในการวัดสนามแม่เหล็กต่อ 1 หัวเขียนเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงสุ่มเลือกหัวเขียนแม่เหล็กจากกลุ่มตัวอย่างทั้งสองแบบ จำนวนแบบละ 4 หัว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อต่อ ๆ ไป เพื่อลดเวลาในการวัดสนามแม่เหล็ก

4.2 การวัดพารามิเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการทดลองที่ใช้ในการทดลอง

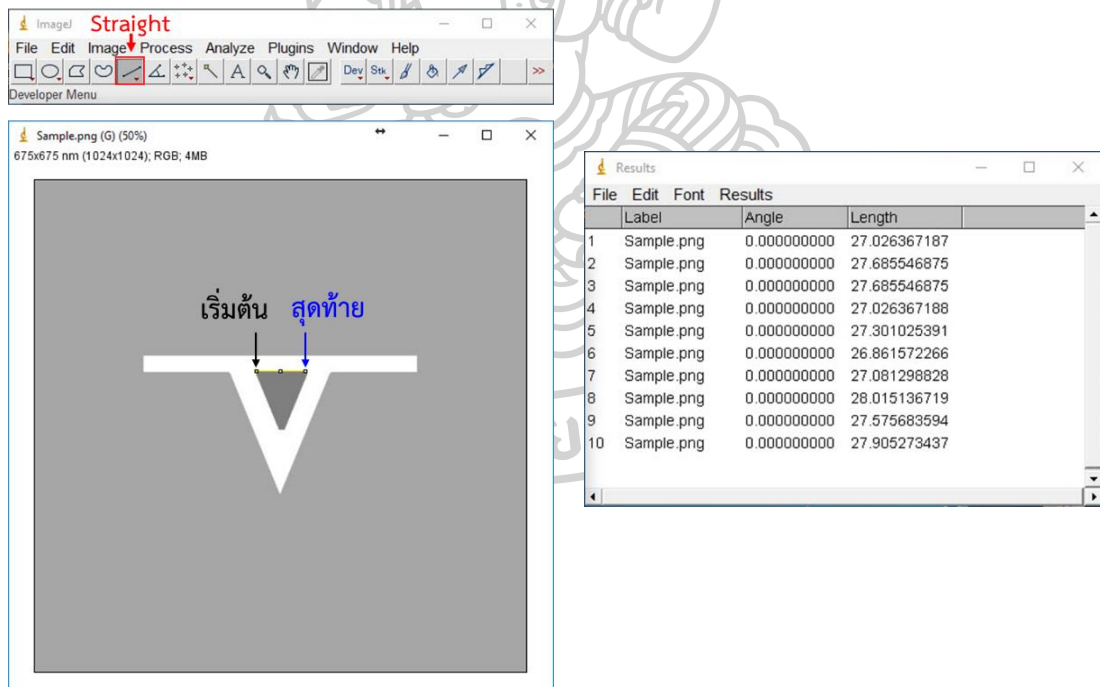
การวัดพารามิเตอร์ของตัวอย่างหัวเขียนแม่เหล็ก ทำได้โดยการถ่ายภาพหัวเขียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งกำหนดพื้นที่และความละเอียดในการถ่ายภาพเป็น 675 นาโนเมตร x 675 นาโนเมตร และ 1024 pixel x 1024 pixel ตามลำดับ จากนั้นนำภาพ SEM ที่ได้มาทำการวัดพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม ImageJ แสดงดังรูปที่ 4.6 กำหนดสเกล (scale) ของรูปภาพในอยู่ในหน่วยนาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7 จากนั้นทำการวัดหัวเขียนด้วยเครื่องมือของโปรแกรมที่เรียกว่า Straight โดยลากเส้นตรงจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ต้องการวัดจนถึงตำแหน่งสุดท้าย แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) โดยการวัดพารามิเตอร์หนึ่ง ๆ จะทำการวัด 10 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ข) แล้วนำค่าที่ได้ไปทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างหัวเขียนทั้งหมดที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม ImageJ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ของหัวเขียนที่เปิดด้วยโปรแกรม ImageJ



รูปที่ 4.7 การตั้งค่าสเกลในการวัดให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตร



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 การวัดหัวเข็ญแม่เหล็ก (ก) การวัดพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือ Straight และ (ข) ค่าที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

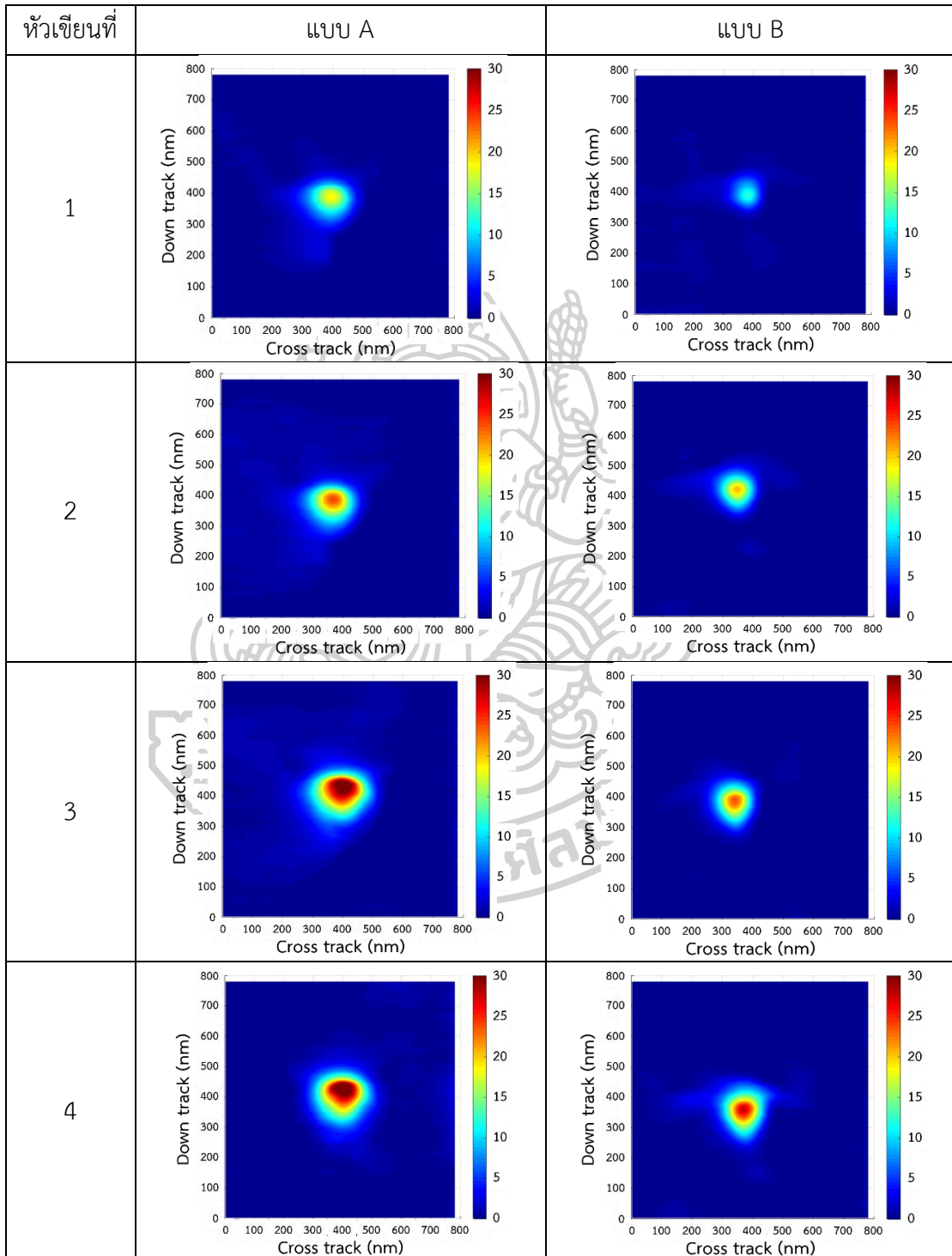
พารามิเตอร์		หัวเขียนที่ 1	หัวเขียนที่ 2	หัวเขียนที่ 3	หัวเขียนที่ 4
หัวเขียน แบบ A	PW (nm)	26.73±0.38	38.19±0.17	54.70±0.12	57.30±0.16
	PT (nm)	53.85±0.13	73.56±0.19	104.90±0.45	105.12±0.12
	SG _L (nm)	57.02±0.40	56.24±0.50	59.80±0.14	62.12±0.28
	SG _R (nm)	56.56±0.30	55.98±0.23	60.12±0.33	67.73±0.45
	WG (nm)	27.54±0.14	27.57±0.21	27.43±0.22	32.9±1.25
	LG (nm)	149.37±0.30	129.00±0.38	141.79±0.82	148.61±0.42
หัวเขียน แบบที่ B	PW (nm)	31.68±0.09	53.46±0.29	61.00±0.54	67.19±0.23
	PT (nm)	78.29±0.20	96.64±0.33	120.04±0.25	130.76±0.60
	SG _L (nm)	26.33±0.05	30.31±0.07	29.08±0.10	26.23±0.39
	SG _R (nm)	31.64±0.09	32.99±0.05	33.05±0.12	33.00±0.04
	WG (nm)	20.42±0.18	21.59±0.32	21.20±0.30	23.27±0.24
	LG (nm)	100.92±0.33	86.22±0.40	90.97±0.50	103.54±0.36

4.3 การศึกษาความเข้มข้นแม่เหล็กของหัวเขียน

หัวเขียนแม่เหล็กในยุคก่อนเป็นหัวเขียนแบบไม่มีซิลด์ล้อมรอบโพลหลัก ซึ่งโพลหลักของหัวเขียนถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณปลายโพลสูง ส่งผลให้ความเข้มข้นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแปรผันตามขนาดของโพลหลัก กล่าวคือ เมื่อหัวเขียนมีขนาดของโพลหลักเล็กลงจะทำให้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาหัวเขียนให้มีซิลด์แม่เหล็กล้อมรอบโพลหลัก เพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการเพิ่มซิลด์ให้กับหัวเขียนนั้นจะส่งผลต่อความเข้มข้นแม่เหล็กด้วย

จากการทบทวนงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นแม่เหล็กได้แก่ ขนาดของโพลหลัก (PW และ PT) และขนาดช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ (gap) ของหัวเขียน [14] เนื่องจากขนาดของโพลหลักส่งผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากหัวเขียน และขนาดของช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ ส่งผลต่อฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้าสู่ซิลด์ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจึงใช้หัวเขียนมีลักษณะต่างกัน 2 แบบ เพื่อศึกษาว่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันอย่างไร โดยหัวเขียนแบบ A จะมีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ กว้างกว่าหัวเขียนแบบ B แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.1

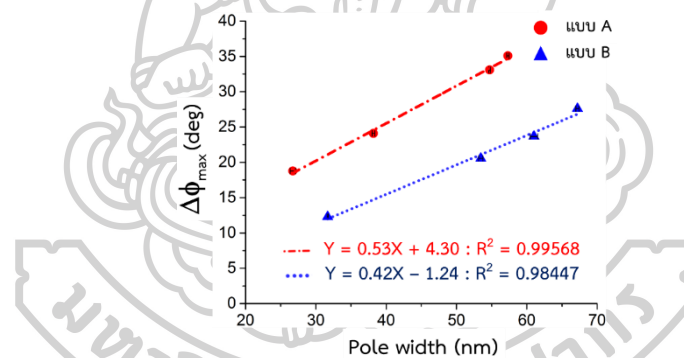
ในการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็ก ผู้วิจัยใช้หัวเขียนแบบมีซิลด์ล้อมรอบที่ลักษณะของซิลด์แตกต่างกัน 2 แบบ ๆ ละ 4 ตัวอย่าง แล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า AC ปริมาณ 30 มิลลิแอมป์ให้กับหัวเขียน เนื่องจากเป็นชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเขียนข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั่วไป



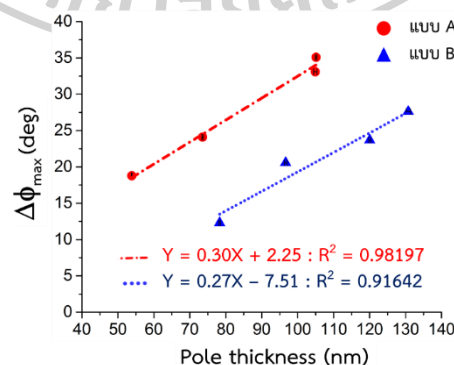
รูปที่ 4.9 ภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนทั้ง 2 แบบ เมื่อหัวเขียนมีมีขนาดบริเวณโพลหลักต่างกัน

และเป็นปริมาณที่ทำให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนเริ่มอ้อมตัว [15] หลังจากนั้น ทำการวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่หัววัดเคลื่อนด้วยสารแม่เหล็กอ่อน (Ni) ผลที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กแสดงรูปที่ 4.9 สีที่ปรากฏในภาพสนามแม่เหล็กแสดงถึงค่าความต่างเฟส โดยบริเวณสีแดงแสดงถึงบริเวณที่มีค่าความต่างเฟสสูงและบริเวณสีน้ำเงินแทนบริเวณที่มีค่าความต่างเฟสต่ำ

จากภาพสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก พบว่าค่าความต่างเฟสสูงสุดแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียนแม่เหล็ก กล่าวคือเมื่อความกว้างและความหนาของหัวเขียนทั้ง 2 แบบมีขนาดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต่างเฟสสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวเขียนกับค่าความต่างเฟสสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนไปยังหัววัดแม่เหล็กเป็นไปตามความสัมพันธ์ $B = \phi / A$ สามารถอธิบายได้ว่าหัวเขียนที่มีพื้นที่หน้าตัดของโพลหลัก (A) ขนาดใหญ่จะทำให้มีปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากหัวเขียนมากกว่าหัวเขียนที่มีพื้นที่หน้าตัดของโพลหลักขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.11 จึงทำให้ค่าความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนที่มีขนาดใหญ่มีค่ามากกว่าหัวเขียนที่มีขนาดเล็ก

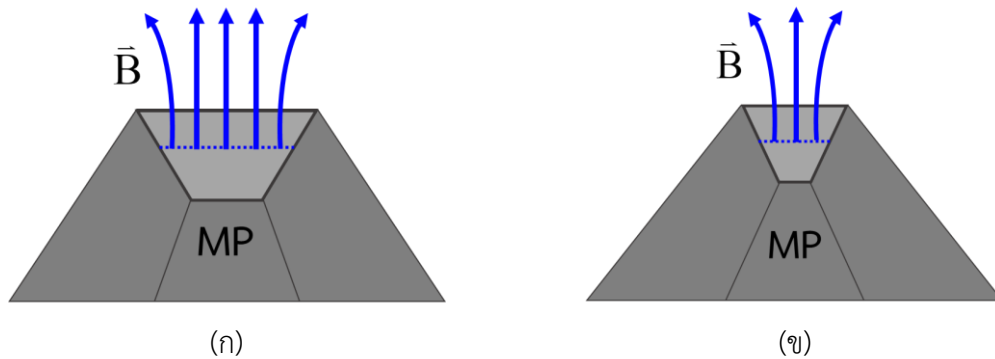


(ก)

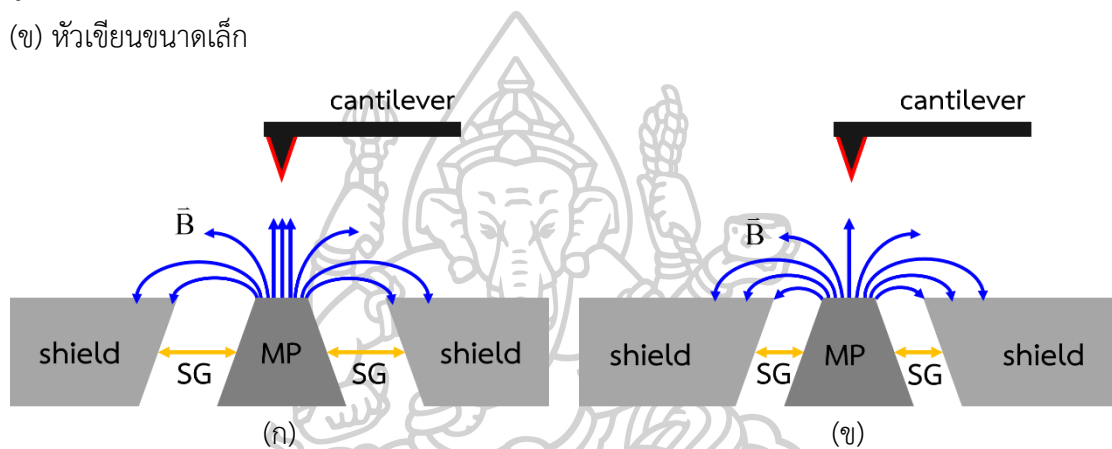


(ข)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างเฟสสูงสุด ($\Delta\phi_{max}$) กับ (ก) ความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (PW) และ (ข) ความหนาหัวเขียนแม่เหล็ก (PT)



รูปที่ 4.11 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อ (ก) หัวเขียนมีขนาดใหญ่ และ (ข) หัวเขียนขนาดเล็ก

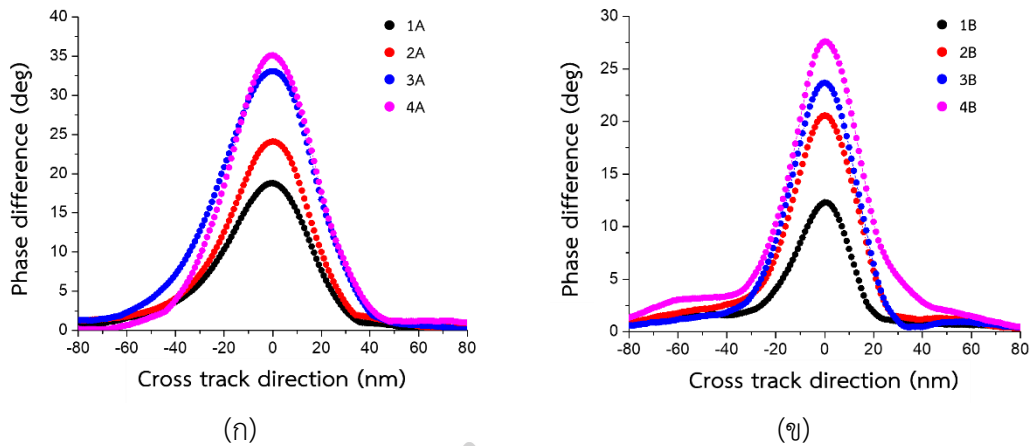


รูปที่ 4.12 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากหัวเขียนเมื่อช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ต่างกัน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต่างเฟสสูงสุดของหัวเขียนแบบ A กับแบบ B พบว่าหัวเขียนแบบ A ให้ค่าความต่างเฟสสูงสุดมากกว่าหัวเขียนแบบ B เนื่องจากช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ของหัวเขียนแบบ B มีขนาดแคบกว่าหัวเขียนแบบ A ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนพุ่งเข้าสู่ซิลด์ของหัวเขียนได้ง่ายกว่าพุ่งไปยังหัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.12

4.4 การศึกษาเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กของหัวเขียน

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า นอกจากขนาดของโพลหลักของหัวเขียนแล้วยังมีขนาดของช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ของหัวเขียนแม่เหล็กที่ส่งผลต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก [9] ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาผลกระทบของช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างขนาดของช่องว่างระหว่างโพล หลักกับซิลด์ต่อขนาดของหัวเขียนบริเวณโพลหลักกับเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็ก

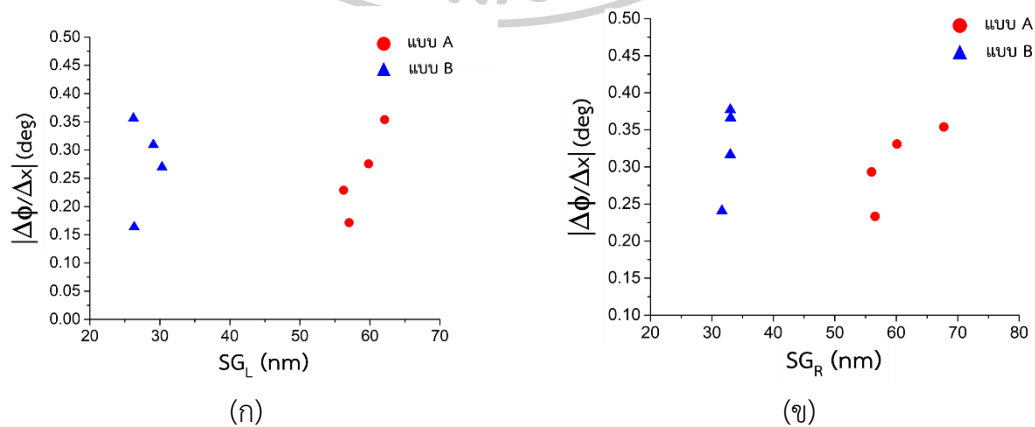


รูปที่ 4.13 เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแทร็คของหัวเขียน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B

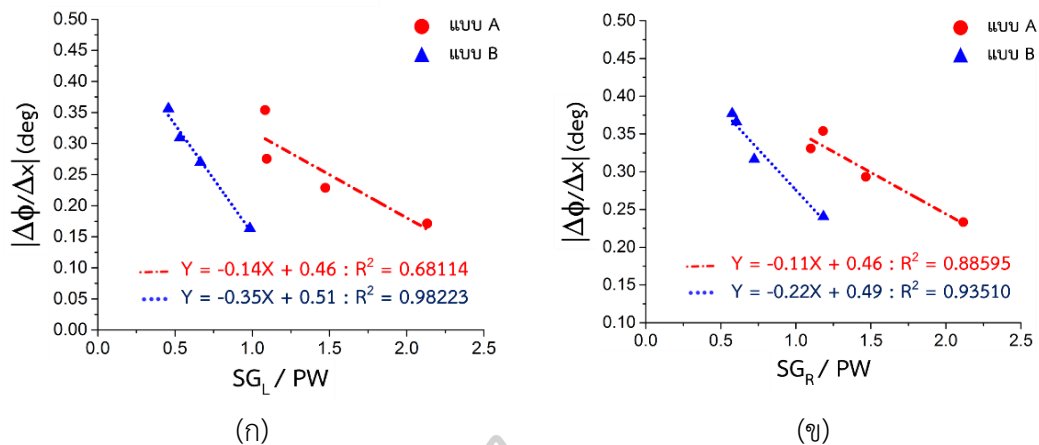
ในการศึกษาผลกระทบของช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ผู้วิจัยใช้เส้นข้อมูลที่ผ่านจุดที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแทร็คและแนวดาวน์แทร็ค จากข้อมูลที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กในหัวข้อที่ 4.2 มาใช้วิเคราะห์ผลต่อไป

4.4.1 การพิจารณาเกรเดียนต์ในแนวครอสแทร็ค

เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวครอสแทร็คของหัวเขียนทั้งสองแบบ แสดงดังรูปที่ 4.13 เมื่อนำข้อมูลเกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็ค ($|\Delta\phi/\Delta x|$) มาหาความสัมพันธ์กับขนาดช่องว่างด้านข้าง (SG) พบว่าพบว่าเป็นกรณีที่ขนาดของช่องว่างด้านข้างมีขนาดใกล้เคียงกัน เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กในแนวดาวน์แทร็คมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.14 แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านข้างต่อความกว้างโพลหลัก (SG/PW) กับเกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟสในแนวครอสแทร็ค ($|\Delta\phi/\Delta x|$) พบว่าเมื่อ SG/PW เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟสมีแนวโน้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.15



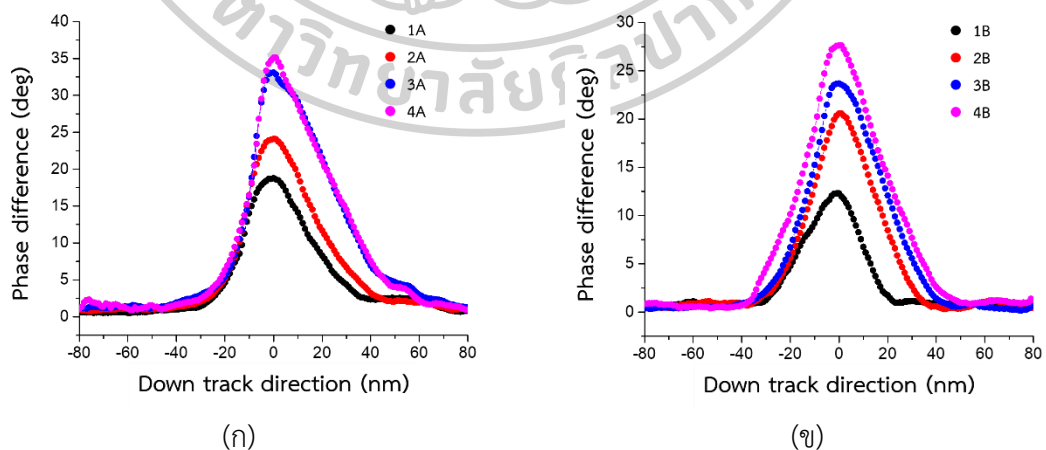
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนต์ของค่าความต่างเฟสกับช่องว่างด้านข้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านซ้าย และ (ข) ช่องว่างด้านขวา



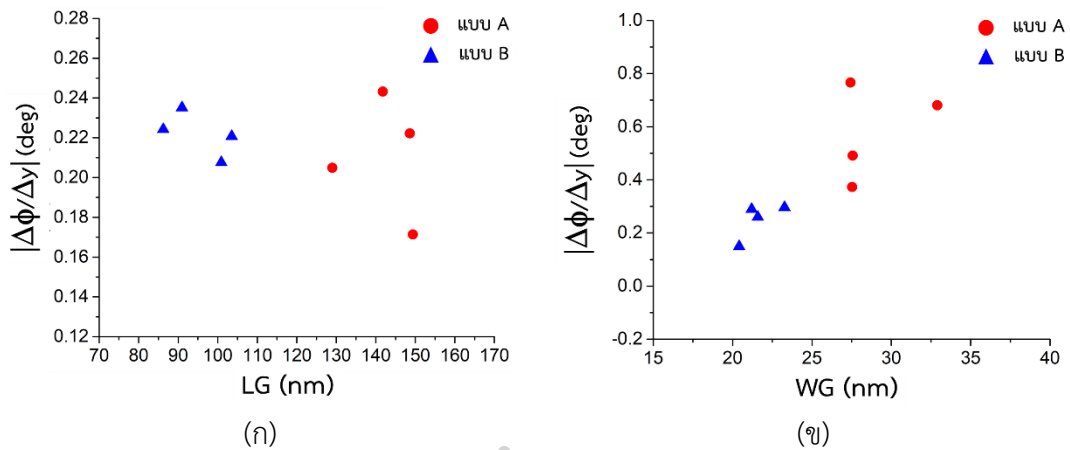
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างด้านข้างกับความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านซ้าย และ (ข) ช่องว่างด้านขวา

4.4.2 การพิจารณาเกรเดียนท์ในแนวดาวน์แทร็ค

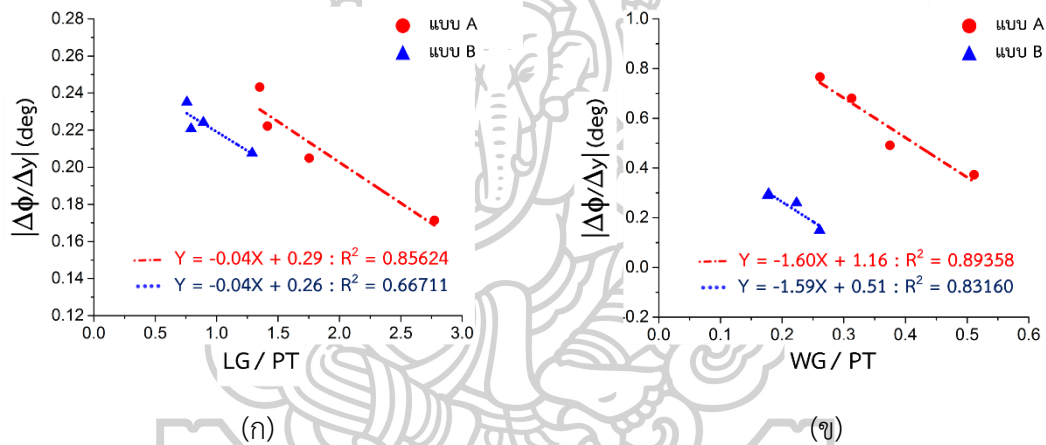
เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวดาวน์แทร็คของหัวเขียนทั้งสองแบบ แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อนำข้อมูลเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวดาวน์แทร็ค ($|\Delta\phi/\Delta y|$) มาหาความสัมพันธ์กับขนาดของช่องว่างด้านหน้าและด้านหลัง พบว่าเกรเดียนท์กับขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังไม่มีความสัมพันธ์กัน แสดงดังรูปที่ 4.17 แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังต่อความความหนาโพลหลักกับเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวดาวน์แทร็ค ($|\Delta\phi/\Delta y|$) พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังต่อความความหนาโพลหลักเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสมีแนวโน้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 เส้นข้อมูลที่มีค่าความต่างเฟสสูงสุดในแนวดาวน์แทร็คของหัวเขียน (ก) หัวเขียนแบบ A และ (ข) หัวเขียนแบบ B



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับช่องว่างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านหน้า และ (ข) ช่องว่างด้านหลัง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างกับความกว้างของหัวเขียนแม่เหล็ก (ก) ช่องว่างด้านหน้า และ (ข) ช่องว่างด้านหลัง

จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสกับอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างกับขนาดหัวเขียนบริเวณโพลหลักทั้งในแนวครอสแตร็คและดาว์นแตร็คมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยเกรเดียนท์จะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างกับขนาดหัวเขียนเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อหัวเขียนที่ใช้ในงานวิจัยมีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์แตกต่างกัน 2 แบบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนหัวเขียน เนื่องจากการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง หัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้จึงต้องมีความหนาแน่นที่ปลายโพลหลักสูง และการกระจายตัวทั้งในแนวครอสแตร็คและดาวน์แตร็คของสนามแม่เหล็กที่น้อย ซึ่งในการลดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการเพิ่มซิลด์แม่เหล็กให้กับหัวเขียนแม่เหล็ก ซิลด์แม่เหล็กที่ล้อมรอบโพลหลักจะส่งผลต่อความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก โดยผลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะอยู่ในรูปแบบข้อมูลของค่าการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสมีความสัมพันธ์กับความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการประมวลผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาอัลกอริทึม สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าความต่างเฟสสูงสุดเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์กับขนาดของโพลหลัก และค่าเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์กับขนาดช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์

ในการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนที่มีขนาดของโพลหลักต่างกัน พบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างและความหนาบริเวณโพลหลักของหัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดเพิ่ม และเมื่อนำความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนที่มีลักษณะของซิลด์ต่างกัน 2 แบบมาเปรียบเทียบกัน พบว่า หัวเขียนแม่เหล็กแบบ A ให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าหัวเขียนแม่เหล็กแบบ B เนื่องจากหัวเขียนแม่เหล็กแบบ A มีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์กว้างกว่าหัวเขียนแม่เหล็กแบบ B จึงทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแบบ A พุ่งเข้าหาซิลด์ได้ยากกว่าหัวเขียนแม่เหล็กแบบ B แต่จะพุ่งไปยังหัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้ง่ายกว่า ส่งผลให้สามารถตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็กแบบ A ได้มากกว่าหัวเขียนแม่เหล็กแบบ B

ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบของช่องว่างด้านข้างต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแนวครอสแตร็ค พบว่าในขณะที่ขนาดของช่องว่างด้านข้างมีขนาดใกล้เคียงกัน เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กในแนวครอสแตร็คมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านข้างต่อความกว้างโพลหลักกับเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวครอสแตร็ค พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านข้างต่อความกว้างโพลหลักเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ทำให้ทราบว่า

เกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวคอรอสแทรกซ์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่างด้านข้างเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความกว้างของโพลหลักด้วย

สุดท้ายทำการศึกษามลกระทบของช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแนวคอรอสแทรกซ์ พบว่าในขณะที่ขนาดของช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังมีขนาดใกล้เคียงกัน เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กในแนวคอรอสแทรกซ์มีค่าต่างกัน ผู้วิจัยจึงพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังต่อความหนาโพลหลักกับเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวคอรอสแทรกซ์ พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังต่อความหนาโพลหลักเพิ่มขึ้น เกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสค่าลดลง ทำให้ทราบว่าเกรเดียนท์ของค่าความต่างเฟสในแนวคอรอสแทรกซ์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่างด้านหน้าและด้านหลังเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความหนาบริเวณโพลหลักด้วยด้วย

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการศึกษาความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนแม่เหล็ก และเนื่องจากการตรวจสอบคุณภาพของหัวเขียนแม่เหล็กอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตหัวเขียนแม่เหล็ก กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบประสิทธิภาพของหัวเขียนแม่เหล็กก่อนนำไปใช้งานจริงได้ นอกจากนี้ผลที่จากการทดลองยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหัวเขียนแม่เหล็กให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้



รายการอ้างอิง

- [1] M. Mallery, A. Torabi, and M. Benakli, "One terabit per square inch perpendicular recording conceptual design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 4, pp. 1719-1724, 2002.
- [2] Y. Kanai, Y. Jinbo, T. Tsukamoto, S. J. Greaves, K. Yoshida, and H. Muraoka, "Finite-Element and Micromagnetic Modeling of Write Heads for Shingled Recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 3, pp. 715-721, 2010.
- [3] K. Yamakawa *et al.*, "High Field-Gradient Design of Single-Pole Write-Head With Planar Pole Structure," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 3, pp. 730-737, 2010.
- [4] S. Suping, G. Lijie, L. Shaoping, and M. Sining, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.
- [5] S. Khizroev and a. D. Litvinov. *Perpendicular Magnetic Recording*. Springer Netherlands, 2006.
- [6] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe, "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution," *Applied Physics Letters*, vol. 50, no. 20, pp. 1455-1457, 1987.
- [7] (8 December 2016). *History of IBM magnetic disk drives*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_IBM_magnetic_disk_drives.
- [8] U. Boettcher, H. Li, R. A. de Callafon, and F. E. Talke, "Dynamic Flying Height Adjustment in Hard Disk Drives Through Feedforward Control," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 7, pp. 1823-1829, 2011.
- [9] S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, "Trailing Shield Head Recording in Discrete Track Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 2408-2410, 2006.
- [10] D. Z. Bai *et al.*, "High Density Perpendicular Recording With Wrap-Around Shielded Writer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 3, pp. 722-729, 2010.
- [11] W. Lu, K. Hatakeyama, G. Egawa, S. Yoshimura, and H. Saito, "Characterization of Magnetic Field Distribution in a Trailing-Edge Shielded Head by Frequency-

- Modulated Magnetic Force Microscopy," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 6, pp. 1479-1482, 2010.
- [12] Z.-M. Yuan, C. L. Ong, S. Ang, B. Liu, S. H. Leong, and M. Zhang, "Writer Footprint Measurement on Spindisk and Media Transition Curvature Characteristics," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 5, pp. 1738-1743, 2012.
- [13] Y. Tang, S. Song, and L. Guan, "Characterization of Adjacent Track Erasure in Perpendicular Recording by a Stationary Footprint Technique," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 2, pp. 744-750, 2013.
- [14] Y. Kanai, S. J. Greaves, K. Yamakawa, A. Hajime, H. Muraoka, and Y. Nakamura, "A single-pole-type head design for 400 Gb/in² recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 2, pp. 687-695, 2005.
- [15] H. Ikegami and T. Yamashita, "<Overshoot current phaseamplitude control for hard disk drive write current.pdf>," *United States Patent*, 2005.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	บุษกรณ์ แซ่ลี้ม
วัน เดือน ปี เกิด	30 สิงหาคม 2533
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
ปัจจุบัน	กำลังศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
ที่อยู่ปัจจุบัน	146 ถ.สวนตะไคร้ ต.สนามจันทร์ อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	Saelim.B, Damrongsak.B et.al, "Magnetic Force Microscopy Characterization of Perpendicular Magnetic Writers with Wrap-around Shield", Journal of Physics: Conf, Series 901, 2017

