



การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง  
ด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์



โดย  
นางสาวอิสรา ดอเลาะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง  
ด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
ภาควิชาฟิสิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF PERPENDICULAR MAGNETIC WRITE HEADS  
USING FINITE ELEMENT SIMULATIONS**



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

**Master of Science Program in Physics**

**Department of Physics**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2015**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การวิเคราะห์  
สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์”  
เสนอโดย นางสาวอิสรา คอเลาะ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทริยา คำรงค์ศักดิ์)

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

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มยุรี หาญสุกานุสรณ์)

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

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)

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



55306210 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : ไฟไนท์เอลิเมนต์ / หัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง

อิสรา คอเลาะ : การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้งด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.บดินทร์ คำรงค์ดี. 110 หน้า.

แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR) ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ของสนามแม่เหล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้อมูลทางทฤษฎีสนับสนุนการอธิบายลักษณะและกระบวนการผลิตของหัวเขียนแม่เหล็ก ในส่วนแรกแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของขดลวดอย่างง่ายได้ถูกจำลองขึ้นเพื่อประเมินผลของความเข้มสนามแม่เหล็ก จากผลการจำลองพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ในส่วนต่อไปแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของหัวเขียน PMR ได้ถูกจำลองขึ้นเพื่อพิจารณาผลกระทบของการออกแบบขดลวดและรูปทรงปลายโพลหลัก การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันสองแบบ ได้แก่ ขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้ก จากผลการจำลองพบว่าหัวเขียนที่มีขดลวดแบบเกลียวให้สนามแม่เหล็กค่อนข้างสูงกว่าหัวเขียนที่มีขดลวดแบบแพนเค้ก นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมของปลายโพลสี่เหลี่ยมคางหมู (TA) ตั้งแต่ 0-14 องศา จากผลการจำลองพบว่าสนามแม่เหล็กสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มขึ้น 0-4 องศา และค่อยๆ ลดลงเล็กน้อยเมื่อมุมสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มขึ้น 6-14 องศา เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการลดลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ส่งผ่านปลายโพลหลัก นอกจากนี้ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความกว้างสนามแม่เหล็กลดลงอย่างมากเมื่อมุมสี่เหลี่ยมคางหมูเพิ่มขึ้น ในระหว่างกระบวนการขัดหรือการกัดของการผลิตหัวบันทึกแม่เหล็กส่งผลให้ความกว้างและความสูงของปลายโพลหลักเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆ กัน การจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินขนาดและความกว้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากผลกระทบของกระบวนการขัด สุดท้ายผู้วิจัยได้พัฒนาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ระหว่างความกว้างสนามแม่เหล็กของการบันทึกข้อมูลจากการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์และผลการวัดโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

55306210: MAJOR: PHYSICS

KEY WORD: FINITE ELEMENT SIMULATIONS / PERPENDICULAR MAGNETIC WRITE HEAD

ISRA DOLOH: MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF PERPENDICULAR MAGNETIC WRITE HEADS USING FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR: BADIN DAMRONGSAK, Ph.D., 110pp.

A three-dimensional solid model of PMR write heads was developed in this thesis for finite element analysis of the magnetic field. This aimed to provide theoretical information for the characterization and fabrication of magnetic write heads. Firstly, finite element simulations of a simple coil model were performed in order to evaluate the magnetic field intensity. Results revealed a good agreement with those from theoretical calculation. In the further sections, finite element simulations of PMR write heads were performed to investigate the effect of coil designs and shapes of the main write pole. Two different designs of the induction coil were studied including helical and pancake coils. Simulation results shown that the magnetic field of the magnetic write head using a helical coil is somewhat stronger than that of the write head with a pancake coil. In addition, effects of the variations of the angle of the trapezoidal pole tip, from 0-14 degree, were determined. Simulation results revealed that the peak magnetic flux density increased with increasing the trapezoidal angle from 0-4 degree and gradually decreased from 6-14 degree. This is due to the reduction of the magnetic flux passing through the main pole. Moreover, simulation results shown that the width of the magnetic field profile significantly decreased when the trapezoidal angle increased. During a lapping or etching process in manufacturing of magnetic recording heads, the pole width and the throat height are varied simultaneously. Finite element simulations were then employed to evaluate the effect of lapping process on the magnitude and the width of the magnetic field profile. In the last section, the transfer function between the magnetic write width from finite element simulations and those from measurement results by magnetic force microscopy were developed.

---

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature.....

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จเรียบร้อยได้ก็ด้วยความเสียสละ ความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในการกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ดี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย และคอยให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จครบถ้วนสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทริยา คำรงค์ดี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี หาญสุภานุสรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณทางบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่คอยสนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตลอดการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ Mr. Ittipon Cheowanish ผู้จัดการอาวุโสแผนกปฏิบัติการหัวอ่าน-เขียน และ Mr. Karnt Saengkaew ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมทดสอบผลิตภัณฑ์บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในส่วนของข้อมูลต่างๆ ที่เป็นความรู้แก่งานวิจัย ขอขอบพระคุณ Mr. Chakkrit Supavasuthi ผู้อำนวยการระดับสูงบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่ให้ความสะดวกในการทำการวิจัยตลอดจนพนักงานทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำเร็จได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน สำหรับกำลังใจ แรงผลักดัน และความสนับสนุนในด้านต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ ให้คำปรึกษาด้านโปรแกรม คำปรึกษาด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ และคอยให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ให้ความช่วยเหลือให้ผู้วิจัยได้รับความสำเร็จทางการศึกษานี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน.....	6
2.1.1 กฎของบีโอดี-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law).....	6
2.1.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law).....	7
2.1.3 กฎของเกาส์ (Gauss's Law).....	8
2.1.4 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law).....	10
2.1.5 การเหนี่ยวนำ (induction).....	10
2.1.6 วงจรเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic circuits).....	12
2.1.7 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	14
2.1.8 การกำเนิดแมกเนติกไดโพลโมเมนต์	
(magnetic dipoles moment).....	16
2.1.9 สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material).....	16
2.2 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก: ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	20
2.3 ระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	21
2.3.1 ข้อจำกัดความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิใน LMR.....	21



บทที่	หน้า
2.3.2 ระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้งฉาก.....	22
2.4 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	23
2.5 สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวนอนใน 2 มิติ...	28
2.6 ประสิทธิภาพของหัวเขียนและสนามแม่เหล็กในบริเวณช่องว่าง ของปลายโพล.....	29
2.7 การประมาณค่าสนามแม่เหล็กถาวรสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็ก ของ SPH.....	30
2.8 คุณสมบัติที่ดีของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งฉาก.....	32
2.8.1 ความเข้มสนามแม่เหล็กสูง.....	32
2.8.2 สนามแม่เหล็กย้อนกลับหรือสนามแม่เหล็กกลับข้างแตร็คด้าน ข้างต่ำ.....	32
2.8.3 เกรเดียนท์สนามแม่เหล็กสูง.....	33
2.8.4 สนามแม่เหล็กออกนอกแตร็คต่ำหรือการสับแตร็คที่อยู่ติดกัน....	34
2.8.5 ความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์.....	34
2.8.6 สนามแม่เหล็กคงข้างต่ำ.....	34
2.9 การเตรียมขนาดหัวเขียนด้วยกระบวนการจัดเปิดผิวหน้า.....	34
2.10 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force Microscope: MFM).....	36
2.11 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	39
2.11.1 ทฤษฎี.....	39
2.11.2 การแก้ปัญหาการนำกระแสไฟฟ้า.....	39
2.11.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	39
2.11.4 การแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กคงที่.....	40
2.11.5 กระบวนการแก้ปัญหา.....	40
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง....	41
3 การสร้างแบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44
3.1 การทดสอบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	44

บทที่	หน้า
3.1.1 การสร้างแบบจำลองของขดลวด โซลินอยด์.....	44
3.1.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์.....	47
3.1.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟ ไนท์เอลิเมนต์และจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์... ..	48
3.2 โครงสร้างของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลอง.....	50
3.3 การสร้างแบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลด้วย วิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์.....	53
3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์.....	53
3.3.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ.....	53
3.3.3 การสร้างเอลิเมนต์.....	54
3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	56
3.4.1 พิจารณาข้อมูลบนระนาบต่างๆ.....	56
3.4.2 พิจารณาข้อมูลเป็นเส้น.....	58
4 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ด้วยการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์.....	60
4.1 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน ที่มีลักษณะขดลวดต่างกัน.....	60
4.2 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน ที่มีปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู.....	65
4.2 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเกิดจาก กระบวนการขั้วเปิดผิวหน้าสไลเดอร์.....	72
4.4 การเปรียบเทียบผลของการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์กับ ผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	83
5 สรุปและอภิปรายผล.....	92
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	104
ประวัติผู้วิจัย.....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงค่าต่างๆ ในแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์.....	49
3.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
3.3	ค่าสนามแม่เหล็กอ้อมตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	53
4.1	ค่าสนามแม่เหล็กอ้อมตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	61
4.2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองหัวเขียนบันทึกแม่เหล็กเนื่องจากผลของ การขัดเปิดผิวหน้า.....	73
4.3	สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{max}$ กับระยะ YH.....	80
4.4	สมการแทนผลลัพธ์จากไฟไนต์เอลิเมนต์.....	82
4.5	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความกว้าง (PW) และความหนา (PT) กับ ความกว้างของฟลักที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กที่ออกจาก ปลายโพล.....	88
4.6	สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดกับขนาดความ กว้าง.....	89
4.7	สมการทำนายและแสดงสมการสัมพันธ์.....	90



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การเติบโตของการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	1
1.2	ส่วนประกอบของหัวเขียนที่มีการเขียนข้อมูลแบบแนวตั้ง.....	3
1.3	แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง.....	4
2.1	สนามแม่เหล็กที่จุด P ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านส่วนย่อยๆ $d\vec{r}$ .....	7
2.2	สนามแม่เหล็กรอบเส้นลวด.....	8
2.3	ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ย่อยๆ $d\vec{A}$ .....	9
2.4	ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านระนาบ A .....	9
2.5	มุมมองด้านข้างของขดลวดทั้งสองที่อยู่ติดกัน.....	11
2.6	วงจรเส้นแรงแม่เหล็ก (ขดลวดทอรอยด์).....	12
2.7	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวม ( $\vec{B}$ ) ในขดลวดทอรอยด์พันบนสารแม่เหล็ก	14
2.8	โมเมนต์แม่เหล็ก.....	16
2.9	ชิ้นส่วนสารเฟอร์โรแมกเนติกที่มีการจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็กแบบสุ่ม และการจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็ก ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ภายนอก.....	17
2.10	ชิ้นส่วนสารเฟอร์โรแมกเนติกที่มีการจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็กเมื่อนำ สนามแม่เหล็กภายนอกออกที่อุณหภูมิต่ำกว่า $T_c$ และการจัดเรียงตัว โมเมนต์แม่เหล็กเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า $T_c$ .....	17
2.11	ฮิสเทอรีซิสลูป (B-H loop).....	18
2.12	M-H ลูปของสารชนิดสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างแข็งและอย่างอ่อน.....	19
2.13	โครงสร้างและส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	20
2.14	โครงสร้างระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งและแนวนอน.....	21
2.15	โครงสร้างแบบจำลองภาพแม่เหล็กเนื่องจากการมีชั้น SUL.....	23
2.16	โครงสร้างการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางตรงกันข้าม....	24
2.17	ทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็ก.....	24
2.18	กระบวนการเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในช่วงเวลา T1 T2 และ T3.....	25
2.19	บิตถูกเขียนเรียงกันเป็นวงกลมในแนวรัศมีบนแผ่นบันทึกข้อมูล.....	26
2.20	ระยะความสูงในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน เรียกว่า ความสูงการบิน.....	27

รูปที่		หน้า
2.21	โครงสร้างของแตร็คข้อมูลที่เกิดจากมุมเอียงน้อยกว่า 0 และมากกว่า 0.....	27
2.22	สนามแม่เหล็กและรูปทรงของสนามแม่เหล็กที่เท่ากัน.....	28
2.23	แผนภาพแสดงตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบพิกัดนำมาใช้ในการคำนวณ สนามแม่เหล็ก.....	31
2.24	แผนผังแสดงกลไกการลบที่แตกต่างกัน.....	33
2.25	ภาพถ่ายของสไลเดอร์จากเครื่อง SEM.....	36
2.26	แผนภาพตำแหน่งการจัดเรียงของอิเล็กตรอนเลปปีงไกด์ หรือ ELG.....	36
2.27	หลักการทํางานและส่วนประกอบของกึ่งตัวนำตัวเร่งแม่เหล็ก.....	37
2.28	ภาพที่ได้จาก MFM บนแผ่นบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและรูปทรงเรขาคณิต ของปลายหัวเขียนที่กระแสดังกล่าว.....	38
2.29	ผังงานกลไกการทํางานในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรม สำเร็จรูปโดยทั่วไป.....	42
3.1	แบบจำลองของขดลวด โซลินอยด์ที่สร้างจากโปรแกรมสำเร็จรูป.....	45
3.2	ลักษณะรูปแบบเอลิเมนต์.....	45
3.3	การแบ่งเมชที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	46
3.4	ภาพตำแหน่งของการดึงข้อมูลเพื่อทํางานวิเคราะห์.....	47
3.5	พารามิเตอร์ขดลวดโซลินอยด์ในสองมิติ.....	48
3.6	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจาก การคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์.....	48
3.7	โครงสร้างแบบจำลองสามมิติของหัวเขียนใน.....	50
3.8	แท่งแม่เหล็กของหัวเขียนบันทึกข้อมูลในมุมมองต่างๆ.....	51
3.9	พารามิเตอร์ที่บริเวณปลายโพล.....	54
3.10	แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่อยู่ภายในผิวปิด.....	54
3.11	รูปทรงของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า.....	55
3.12	เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	55
3.13	ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ XY.....	56
3.13	(ต่อ) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ YZ.....	57

รูปที่	หน้า	
3.14	ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ ZX.....	57
3.15	การกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนระนาบ ZX.....	58
3.16	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้จากการ FEM.....	58
3.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับตำแหน่งต่างๆ พร้อมแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	59
4.1	ลักษณะโครงสร้างหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งของขดลวดแบบแพนเค้ก...	61
4.2	ลักษณะหัวเขียน PMR ที่มีขนาดของขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้ก.....	62
4.3	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของแบบจำลองหัวเขียน ในแนวครอสแตร็คและ ดาวน์แตร็ค.....	63
4.4	ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Bmax กับระยะห่างจาก ABS ของ แบบจำลองหัวเขียน.....	64
4.5	ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดกับกระแส ที่ถูกจ่ายให้กับขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้ก.....	64
4.6	โครงสร้างการเขียนข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	65
4.7	ลักษณะแตร็คข้อมูลของหัวเขียน PMR ที่มีลักษณะปลายโพลเป็นรูปทรง สี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยแกนหัวเขียนทำมุมเอียงสัมพันธ์กับเส้นรอบวงแตร็ค...	66
4.8	ลักษณะแตร็คข้อมูลของหัวเขียน PMR ที่มีลักษณะปลายโพลเป็นรูปทรง สี่เหลี่ยมคางหมูโดยแกนหัวเขียนทำมุมเอียงสัมพันธ์กับเส้นรอบวงแตร็ค..	66
4.9	ตำแหน่งของมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (ในมุมมอง ABS).....	67
4.10	สนามแม่เหล็กบนระนาบ ZX ของหัวเขียน PMR ที่มีขนาดมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (TA) แตกต่างกัน.....	68
4.11	เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีมุม TA ขนาดต่างๆกัน (ก) ในแนวครอสแตร็ค และ (ข) ในแนวดาวน์แตร็ค.....	69
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างมุม TA กับความกว้างของข้อมูล FWHM.....	70
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างมุม TA กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดและ เส้นสีน้ำเงินแทนปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของปลาย โพลหลัก.....	71

รูปที่	หน้า	
4.14	พารามิเตอร์ที่บริเวณปลายโพล.....	72
4.15	ผลของหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการขุดเปิดผิวหน้าในระนาบ ZX.....	74
4.16	ผลการจำลองการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน เนื่องจากกระบวนการขุดเปิดผิวหน้าในระนาบ XY และ YZ.....	75
4.17	เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ขนาดปลายโพลหลักต่างกัน.....	76
4.18	เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะ YH ต่างๆ ของหัวเขียนขนาด 92.43 นาโนเมตร.....	77
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับตำแหน่ง ครอสแตร็คและดาวน์แตร็คที่ระยะห่างจากปลายโพลต่างตั้งแต่ 0 (ABS) ถึง 100 นาโนเมตร.....	79
4.20	ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Bmax กับระยะห่างจาก ABS (Y height) ของหัวเขียนที่มีขนาดต่างกัน.....	80
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง PW ของปลายโพลกับค่า Bmax และ FWHM...	81
4.22	สนามแม่เหล็กในมุมมองสามมิติ ของหัวเขียน PMR ที่ระยะความสูง 10 นาโนเมตร ที่ได้จาก FEM และความแตกต่างเฟสจากการวัด ด้วย MFM ที่ปลายโพล.....	84
4.23	การกระจายตัวสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลหลักด้าน ABS ในระนาบ ZX ของข้อมูลจากเครื่อง MFM กับ ข้อมูลจาก FEM.....	85
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของฟิสิกสนามแม่เหล็ก.....	87
4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดกับขนาดความกว้าง ของปลายโพลหลัก ที่วัดจากเครื่อง MFM กับ ข้อมูลจาก FEM.....	88
4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของปลายโพลหลักของข้อมูลที่ได้ จากเครื่อง MFM กับ ข้อมูลจาก FEM.....	89
4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดของปลายโพลหลัก ของข้อมูลที่ได้จากเครื่อง MFM กับข้อมูลจาก FEM.....	90

รูปที่		หน้า
ก.1	แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่ายไม่มีมุมเฟลอร์และมีมุมเฟลอร์.....	105
ก.2	แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่ายที่อยู่ภายในผิวดัด.....	106
ก.3	เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่าย.....	107
ก.4	ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR อย่างง่าย.....	108
ก.5	เส้นทางฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR อย่างง่ายที่มีมุมเฟลอร์.....	109



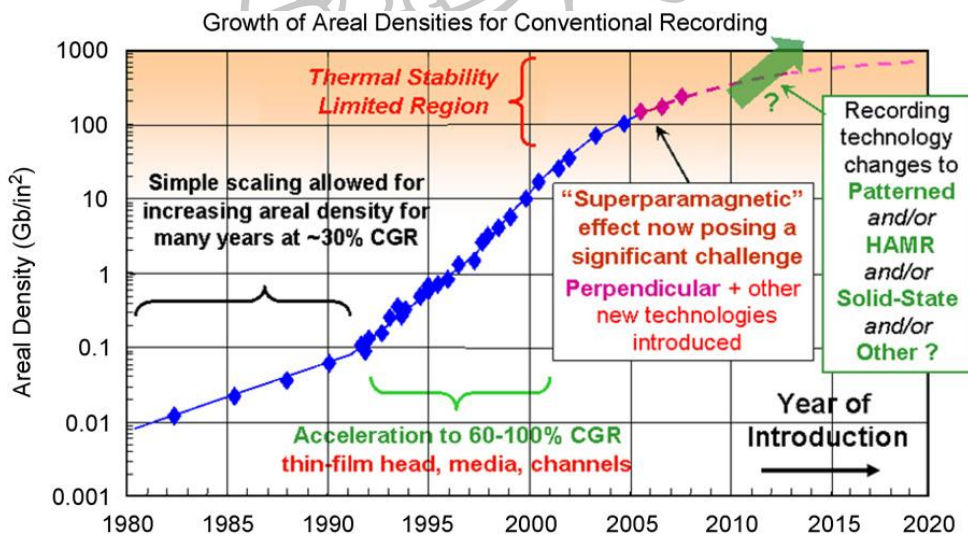


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระยะเวลา 40 ปีที่ผ่านมาเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording technology) เพื่อต้องการผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีราคาถูกลง แต่ยังคงความเร็วในการประมวลผลสูงและเพิ่มขนาดความจุข้อมูลหรือความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากขึ้น การพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) ของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กได้มีการเติบโตมากขึ้นในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา รูปที่ 1.1 แสดงเห็นถึงการเติบโตของการพัฒนาระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและแผนการพัฒนาในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กตั้งแต่อดีตจนถึงปีคริสต์ศักราช 2020



รูปที่ 1.1 การเติบโตของการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยแสดงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของการบันทึกข้อมูลเทียบกับปีคริสต์ศักราชในการพัฒนา สังเกตว่าอัตราการเติบโตของการพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะชะลอตัวอย่างมีนัยสำคัญ ปัญหาพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยทั่วไป คือ ประสิทธิภาพการเขียน (writability) อัตราสัญญาณอ่านข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนจากแผ่นบันทึกข้อมูล (signal-to-noise) และความไม่เสถียรทางอุณหภูมิ (thermal stability) ข้อจำกัดดังกล่าวเชื่อกันว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความจุประมาณ 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว

ที่มา: Daniel Z. Bai R. Wood. "Future hard disk drive systems." J. Magn. Magn. 321, (2009): 555–561.

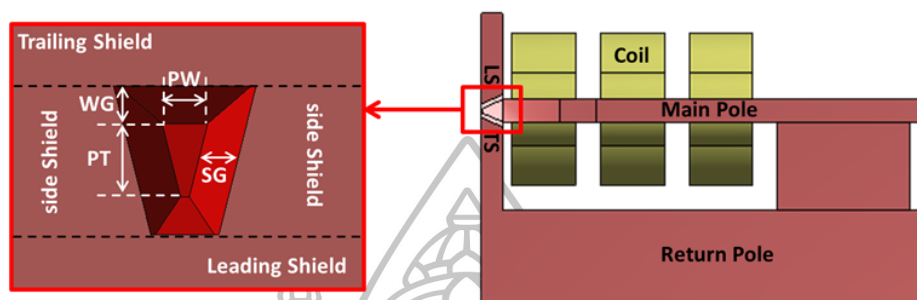
ก่อนปี 2005 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเป็นแบบแนวนอน (Longitudinal Magnetic Recording: LMR) แต่เนื่องจากมีความต้องการที่จะเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลที่มากขึ้น เทคโนโลยีดังกล่าวจึงไม่เพียงพอที่จะสร้างความหนาแน่นในการเก็บข้อมูลให้มากเพราะด้วยขีดจำกัดความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal instability) [1-3] หรือขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic) การลดปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้วัสดุที่มีค่าแอนไอโซโทรปีสูงๆ ในการผลิตแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก [4] อย่างไรก็ตามเป็นไปได้สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอนเพราะว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนแบบแนวนอนให้สนามแม่เหล็กที่ต่ำในการเขียนข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าปัญหาด้านขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (Perpendicular Magnetic Recording: PMR) [5-6] การเพิ่มขึ้นของชั้นแม่เหล็กอ่อนในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านการเขียนข้อมูลแม่เหล็กและสามารถเปลี่ยนแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกได้ ถึงแม้ว่าแผ่นบันทึกข้อมูลจะทำจากวัสดุที่มีค่าแอนไอโซโทรปีที่สูงก็ตาม

ต่อมาอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้มีความหนาแน่นต่อพื้นที่เท่ากับ  $1 \text{ Tbit/in}^2$  หรือมากกว่า [7] ดังนั้นจึงมีความต้องการหัวเขียนบันทึกแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพในการเขียนบันทึกสูง โดยคุณสมบัติที่สำคัญของหัวเขียน PMR จะต้องมีความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลหลักสูงเพียงพอที่จะสามารถสลับทิศทางของขั้วโมเมนต์แม่เหล็กในแผ่นมีเดียให้เปลี่ยนจากสถานะ “0” ไปเป็นสถานะ “1” หรือเปลี่ยนจากสถานะ “1” ไปเป็นสถานะ “0” และสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน PMR จะต้องมีเกรเดียนท์ตามแนวครอสแทร็คสูงด้วยเพื่อลดขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล ซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดความจุหรือความหนาแน่นข้อมูลต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น [8] ในการออกแบบหัวเขียนให้มีประสิทธิภาพสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดขนาดปลายโพลหลัก การออกแบบให้มีมุมต่างๆ ที่บริเวณปลายโพลหลัก [9] และการสร้างซิลด์แม่เหล็กรอบปลายโพล [10] เป็นต้น

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐานได้แก่ โยค (yoke) หรือ โพลเขียน (write pole) และขดลวด (coil) แสดงดังรูปที่ 1.2 โพลเขียนทำมาจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน ที่ปลายด้านหนึ่งของโพลเขียนถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กมากเพื่อเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล เรียกว่า โพลหลัก (Main Pole: MP) โดยมีความกว้างอยู่ในระดับนาโนเมตร ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเรียกว่า โพลย้อนกลับ (Return Pole: RP) จะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของ

โพลหลักมากเพื่อลดปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กให้มีขนาดน้อยจนไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ไหลภายในโยคเนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด



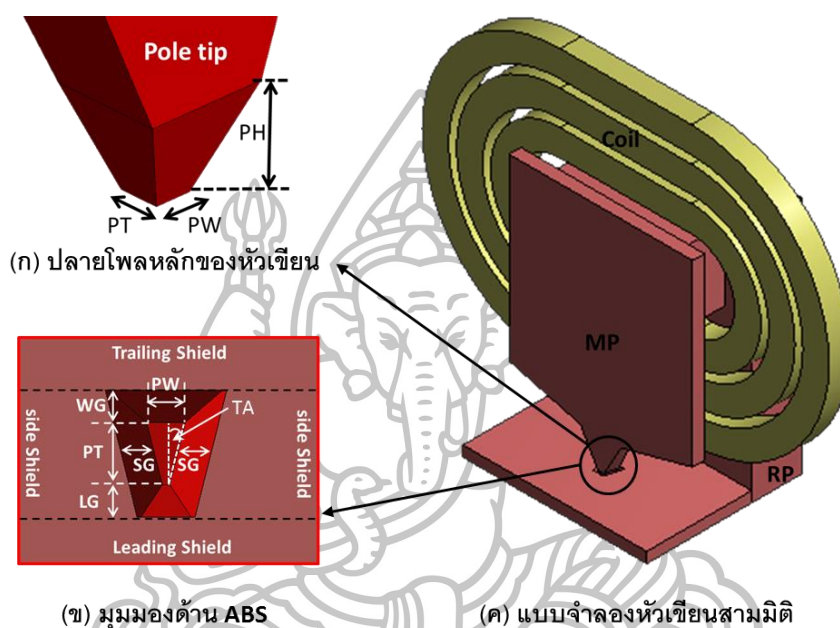
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของหัวเขียนที่มีการเขียนข้อมูลแบบแนวตั้ง

ปัจจัยในการควบคุมเกรเดียนต์สนามแม่เหล็กปัจจุบันได้มีการเพิ่มฟังก์ชันของหัวเขียนแม่เหล็กให้มีผนังป้องกันสนามแม่เหล็ก (shield) [10-13] ยกตัวอย่าง เช่น ชิลด์ด้านหลัง (Trailing Shield: TS) ชิลด์ด้านข้าง (Side Shield: SS) และชิลด์ล้อมรอบ (Wrap-Around Shield: WAS) ตัวอย่างในรูปที่ 1.2 แสดงหัวเขียนแม่เหล็กแนวตั้งแบบ SS พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กได้แก่ ช่องว่างระหว่าง MP กับชิลด์ เช่น ช่องว่างระหว่าง MP กับ TS (Write Gap: WG) ช่องว่างระหว่าง MP กับ SS (Side Gap: SG) เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่สามารถควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด [14-15] ขนาดและจำนวนขดลวดที่ใช้ในหัวเขียน ขนาดของปลายโพลหลัก [16-18] และวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่นำมาใช้ผลิตหัวเขียน [19] เป็นต้น

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในหัวเขียน PMR จึงได้มีการนำเอาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองโดยอาศัยสมการพื้นฐานของแมกเนติกส์ แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สามารถใช้ยืนยันผลการทดลองรวมถึงใช้วิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลองได้ นอกจากนี้แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้ทำนายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ออกแบบขึ้นก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์นั้นจริง ดังนั้นแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์จึงเป็นเครื่องมือสำคัญชิ้นหนึ่งที่ไม่นอกจากช่วยสร้างความเข้าใจพฤติกรรมทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นแล้วยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการศึกษาคุณสมบัติของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีขนาดปลายโพลแตกต่างกัน โดยเราสนใจบริเวณ MP ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับใช้ในการบันทึกข้อมูล โดยขนาดของ MP จะเป็น

ตัวกำหนดความเข้มและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ความกว้างปลายโพล (Pole Width: PW) ความหนาปลายโพล (Pole Thickness: PT) ความสูงปลายโพล (Pole Height: PH) และมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Angle: TA) จากรูปที่ 1.3(ข) ประกอบ



รูปที่ 1.3 แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีลักษณะขดลวดแบบเกลียว (helical coil) และแพนเค้ก (pancake coil)
2. เพื่อศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ปลายโพลหลักมีมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Angle: TA)
3. เพื่อศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีขนาดปลายโพลหลักแตกต่างกัน

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

คุณสมบัติที่สำคัญของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะต้องมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณปลายโพลหลักสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเขียนบันทึก โดย

สนามแม่เหล็กที่ออกมาจะต้องมีความกว้างของการกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวคอรอสแทริกสูงด้วยเพื่อลดขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล ซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดความจุหรือความหนาแน่นข้อมูลเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด ขนาดและจำนวนขดลวดที่ใช้ในหัวเขียน ขนาดของปลายโพลหลักและวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่นำมาใช้ผลิตหัวเขียน ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลกระทบของลักษณะของขดลวด มุมสี่เหลี่ยมคางหมูและขนาดของปลายโพลหลักที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า

#### 1.4 ขอบเขตของงาน

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหัวเขียน PMR โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยประสิทธิภาพของหัวเขียน PMR จะพิจารณาจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะของขดลวด มุมสี่เหลี่ยมคางหมู (TA) และขนาดของปลายโพลหลักที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีขนาดและลักษณะขดลวดที่แตกต่างกัน
2. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากการมีมุมสี่เหลี่ยมคางหมูของปลายโพล
3. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กที่ผลิตจากหัวเขียน PMR ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโพลหลักโดยกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าและสามารถทำนายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดปลายโพลหลักด้วยสมการความสัมพันธ์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
4. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับการวิเคราะห์ในการแก้ปัญหาทางด้านการสร้างและออกแบบหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐานโดยจะกล่าวถึงกฎของบีโอดี-ซาวาร์ต กฎของแอมแปร์ กฎของเกาส์ กฎของฟาราเดย์ วงจรเส้นแรงแม่เหล็ก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในเนื้อสาร การกำเนิดแมกเนติกไดโพลโมเมนต์ และสารเฟอร์โรแมกเนติก จากนั้นจะกล่าวถึงเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยข้อจำกัดความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแวนอน ระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังกล่าวถึงกระบวนการเขียนข้อมูล สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแวนอนใน 2 มิติ การประมาณค่าสนามแม่เหล็กถาวรสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กของ SPH คุณสมบัติที่ดีของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง การเตรียมขนาดหัวเขียนด้วยกระบวนการจัดเปิดผิวหน้า การวัดสนามแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

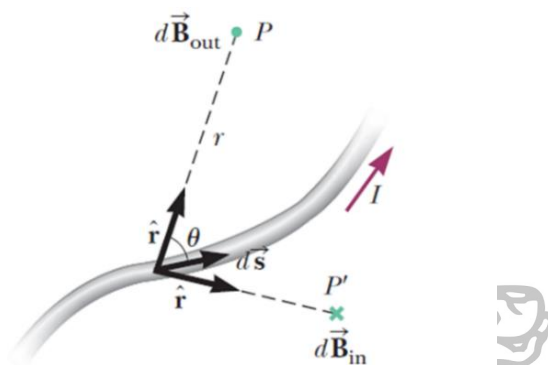
### 2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน

#### 2.1.1 กฎของบีโอดี-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law)

ไม่นานหลังจากการค้นพบของ Oersted ในปี 1819 ว่าเข็มทิศถูกเบี่ยงเบนด้วยตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน Jean-Baptiste Biot (1774–1862) และ Félix Savart (1791–1841) ได้ทำการทดลองเชิงปริมาณในการออกแรงที่กระทำโดยกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงกับแม่เหล็กจากผลการทดลองของพวกเขา Biot-Savart ได้แสดงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ให้สนามแม่เหล็กที่จุด  $P$  ดังรูปที่ 2.1 ในเทอมกระแสไฟฟ้าที่ผลิตสนามแม่เหล็ก

สำหรับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าคงที่  $I$  ไหลผ่านส่วนย่อย  $dS$  ของความยาวเส้นลวด  $S$  ที่จุด  $P$  มีค่าเท่ากับ  $dB$  (ในรูปที่ 2.1) ซึ่งการแสดงสมการดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของการสังเกตการทดลองต่อไปนี้

- เวกเตอร์  $d\vec{B}$  มีทิศตั้งฉากกับ  $d\vec{s}$  (ซึ่งมีทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า) และ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ  $\hat{r}$  มีทิศทางจาก  $d\vec{s}$  ไปยังจุด  $P$
- ขนาดของ  $d\vec{B}$  แปรผกผันกับสัดส่วนของ  $r^2$  เมื่อ  $r$  คือ ระยะทางจาก  $d\vec{s}$  ไปยังจุด  $P$
- ขนาดของ  $d\vec{B}$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าและ  $\sin\theta$  เมื่อ  $\theta$  เป็นมุมระหว่าง  $d\vec{s}$  กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ  $\hat{r}$



รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กที่จุด  $P$  ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านส่วนย่อยๆ  $d\vec{s}$

ที่มา: R.A. Serway and J.W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics." California: Brooks/cole, 2010.

ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกกันว่า กฎของบิโอดี-ซาวาร์ต ได้ดังนี้

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\mu_0$  คือ ค่าคงที่ เรียกว่า ค่าสภาพซึมซับแม่เหล็กในอากาศ (permeability of free space) มีค่าเท่ากับ

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \quad (2.2)$$

สังเกตว่าสนามแม่เหล็ก  $d\vec{B}$  ในสมการที่ (2.1) เป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านส่วนย่อย  $d\vec{s}$  ถ้าต้องการหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำทั้งเส้น  $\vec{B}$  จะต้องอินทิเกรตไปตามเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน ดังนั้นจะได้ว่า

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

กฎของแอมแปร์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดยาวอนันต์และขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน คือเมื่อพิจารณาเส้นทางปิดใดๆ เราจะได้ผลรวม

สนามแม่เหล็กกรอบเส้นทาบปิด  $S$  มีปริมาณเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นๆ เขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

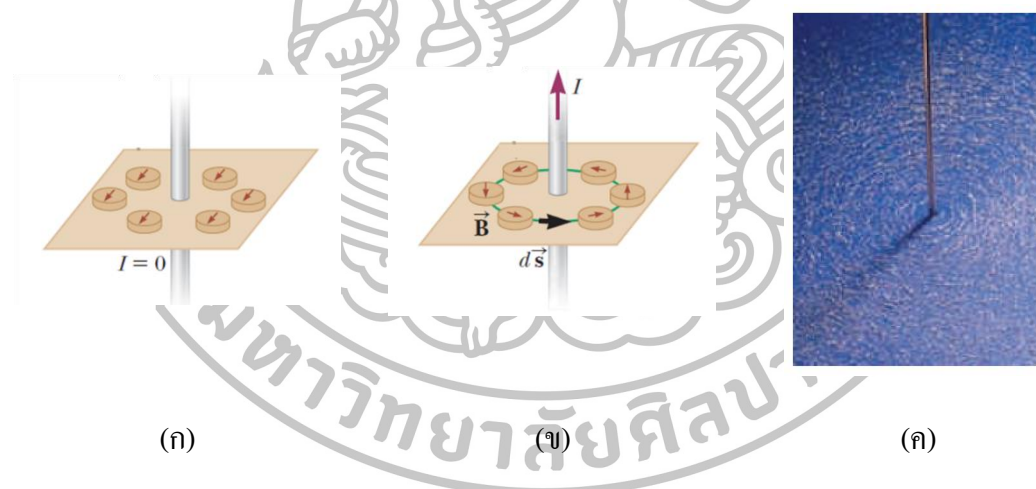
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.4)$$

พิจารณาสนามแม่เหล็กของเส้นลวดยาวอนันต์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคางที่และระบบมีความสมมาตรสูง จะเห็นว่าไม่มีสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้าไม่มีการไหลผ่านเส้นลวด แต่เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการไหลผ่านเส้นลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกรอบเส้นลวดตัวนำ โดยเราสามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้จากการสมมติให้มีเส้นทาบปิดรอบเส้นลวดตัวนำที่อยู่ห่างออกไปจากเส้นลวดเป็นระยะ  $r$  ซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะมีค่าคงที่ตลอดเส้นทาบปิดและทิศทางของสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะมีทิศเดียวกันกับทิศทางของส่วนย่อยๆ เส้นลวดตัวนำ  $d\vec{s}$  ดังนั้น จากสมการที่ (2.5) เราจะได้ว่า

$$\vec{B} \oint d\vec{s} = \vec{B}(2\pi r) = \mu_0 I \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กกรอบเส้นลวดเมื่อ (ก) ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด (ข) มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด และ (ค) ภาพจริงของสนามแม่เหล็กที่เกิดรอบๆเส้นลวดเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ที่มา: R.A. Serway and J.W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics." California: Brooks/cole, 2010.

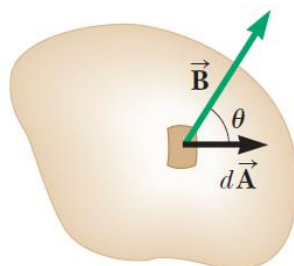
### 2.1.3 กฎของเกาส์ (Gauss's Law)

พิจารณาพื้นที่ส่วนย่อยๆ  $d\vec{A}$  บนผิวของรูปทรงใดๆ ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ถ้าสนามแม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวเป็น  $\vec{B}$  ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่  $d\vec{A}$  มีค่าเป็น  $\vec{B} \cdot d\vec{A}$  เมื่อ  $d\vec{A}$  คือ



ปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวและมีขนาดเท่ากับพื้นที่  $d\vec{A}$  ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด  $\Phi_B$  ที่พุ่งผ่านพื้นผิวจะได้ดังนี้

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.7)$$



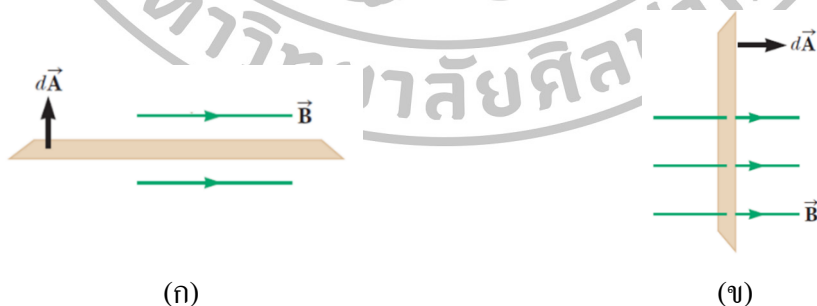
รูปที่ 2.3 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ย่อยๆ  $d\vec{A}$  คือ  $\vec{B} \cdot d\vec{A}$  ( $d\vec{A}$  คือปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิว)

ที่มา: R.A. Serway and J.W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics." California: Brooks/cole, 2010.

ในกรณีของระนาบพื้นที่  $A$  ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ  $\vec{B}$  ซึ่งทำมุม  $\theta$  กับ  $d\vec{A}$  ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านระนาบดังกล่าวมีค่ามีค่าเท่ากับ

$$\Phi_B = BA \cos \theta \quad (2.8)$$

รูปที่ 2.4 ถ้าสนามแม่เหล็กขนานกับระนาบ  $A$  ( $\theta = 0^\circ$ ) ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบ  $A$  ( $\theta = 90^\circ$ ) ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $BA$  (ค่ามากที่สุด) หน่วยของฟลักซ์แม่เหล็กคือ  $T \cdot m^2$  หรือเวเบอร์ (Weber : Wb) โดยที่  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot m^2$



รูปที่ 2.4 ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านระนาบ  $A$  (ก) มีค่าเป็นศูนย์เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศขนานกับระนาบ  $A$  และ (ข) มีค่ามากที่สุดเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับระนาบ  $A$

ที่มา: R.A. Serway and J.W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics." California: Brooks/cole, 2010.

ในกรณีที่พื้นผิวปิดจะเขียนฟลักซ์แม่เหล็กได้เป็น

$$\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.9) เป็นกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก สมการนี้แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปและออกพื้นที่ผิวปิดใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าใช้ทฤษฎีของไดเวอร์เจนซ์ (divergence theorem) จะเขียนได้ว่า

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int (\nabla \cdot \vec{B}) d\tau = 0 \quad (2.10)$$

เนื่องจาก  $d\tau$  คือ ชิ้นส่วนเล็กๆ ของปริมาตรจึงมีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นจะเขียนกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กได้เป็น

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

#### 2.1.4 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

เราจะใช้กฎของฟาราเดย์เพื่อนำไปสู่การอธิบายตัวกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่รู้จักกันดี นอกจากนั้นยังมีความสำคัญต่อระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กอีกด้วย กฎของฟาราเดย์ถูกนำมาใช้เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจถึงการเหนี่ยวนำศักย์ไฟฟ้าในหัวอ่าน โดยข้อมูลบิตที่ถูกบันทึกลงบนแผ่นบันทึก กฎของฟาราเดย์ช่วยให้เราสามารถคำนวณหาบางปรากฏการณ์ที่เวลาได้

กฎของฟาราเดย์กล่าวว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก หรือ emf ถูกเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำที่มีจำนวนขดลวด  $N$  รอบ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านขดลวดตัวนำต่อเวลา

$$\text{emf} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.12)$$

หน่วยของ emf คือ โวลต์ (Volt: V) หน่วยของฟลักซ์แม่เหล็ก คือ เวเบอร์ และหน่วยของเวลา คือ วินาที ดังนั้นหน่วยของ โวลต์จะเท่ากับเวเบอร์ต่อวินาที

ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ของขดลวดตัวนำอาจจะคำนวณจากความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก  $\vec{B}$  โดยใช้สมการ (2.7) เครื่องหมายลบในสมการที่ (2.12) จะชี้ให้ทราบว่า emf มีทิศทางเป็นไปตามกระแสที่ไหล ซึ่งมีฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มเข้าไปให้กับฟลักซ์แม่เหล็กที่มีอยู่แล้ว ทำให้ emf มีขนาดลดลง นั่นคือแรงดันเหนี่ยวนำค่านี้มีบทบาทในการสร้างฟลักซ์ขึ้นมาในทิศทางข้าม (กฎของเลนซ์)

#### 2.1.5 การเหนี่ยวนำ (induction)

เราจะนิยามความเหนี่ยวนำ (inductance) หรือความเหนี่ยวนำตัวเอง (self-inductance) ว่าเป็นอัตราส่วนของเส้นฟลักซ์เชื่อมโยงทั้งหมดกับกระแสไฟฟ้าที่มันเชื่อมโยงอยู่ คือ

$$L = \frac{N\Phi_B}{\bar{I}} \quad (2.13)$$

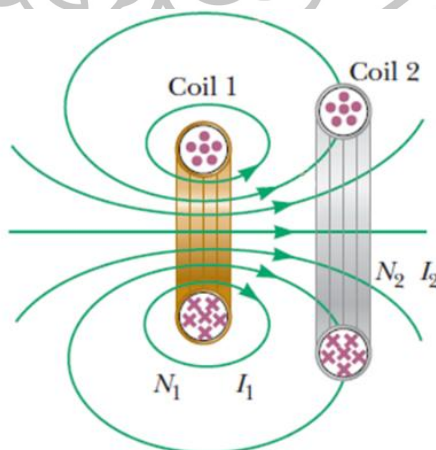
เมื่อกระแสไฟฟ้า  $\bar{I}$  ไหลผ่านขดลวดทอรอยด์  $N$  รอบ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด  $\Phi_B$  และฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยง (magnetic flux linkage)  $N\Phi_B$  ในขดลวดแต่ละวง จากนิยามดังกล่าวสามารถใช้ได้เฉพาะในตัวกลางของสารแม่เหล็กเชิงเส้นเท่านั้นเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กแปรตามกระแสไฟฟ้า ซึ่งเราจะไม่นิยามความเหนี่ยวนำในสารเฟอร์โรแมกเนติก ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry: H) ซึ่งเท่ากับหน่วยเวเบอร์ต่อแอมแปร์ (Wb/A)

ก่อนหน้านี้ในหัวข้อกฎของฟาราเดย์ เราจะเห็นว่าถ้าฟลักซ์ผ่านเส้นทางปิดเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ดังนั้นเรานำสมการที่ (2.14) แทนในสมการที่ (2.13) จะได้

$$\text{emf}_L = -L \frac{d\bar{I}}{dt} \quad (2.14)$$

เนื่องจาก  $L$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สมการนี้จะมีค่าสำคัญเมื่อเรานำมาคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านจากหัวอ่านในหัวบันทึกโดยการเปลี่ยนฟลักซ์จากการแปลงแผ่นบันทึกข้อมูล

เมื่อพิจารณาขดลวดสองขดที่วางอยู่ใกล้กัน ดังรูปที่ 2.5 เมื่อกระแสไฟฟ้า  $\bar{I}_1$  มีการเปลี่ยนแปลงในขดที่ 1 จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น โดยฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนจากขดที่ 1 จะพุ่งผ่านขดที่ 2 และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่ 2 ตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำร่วม (mutual induction)



รูปที่ 2.5 มุมมองด้านข้างของขดลวดทั้งสองที่อยู่ติดกัน

ที่มา: R.A. Serway and J.W. Jewett. "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics." California: Brooks/cole, 2010.

ดังนั้น ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านขดลวดที่ 2 จากฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (2.15) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในขดลวดที่ 1

$$\Phi_{21} = M_{21} \bar{I}_1 \quad (2.15)$$

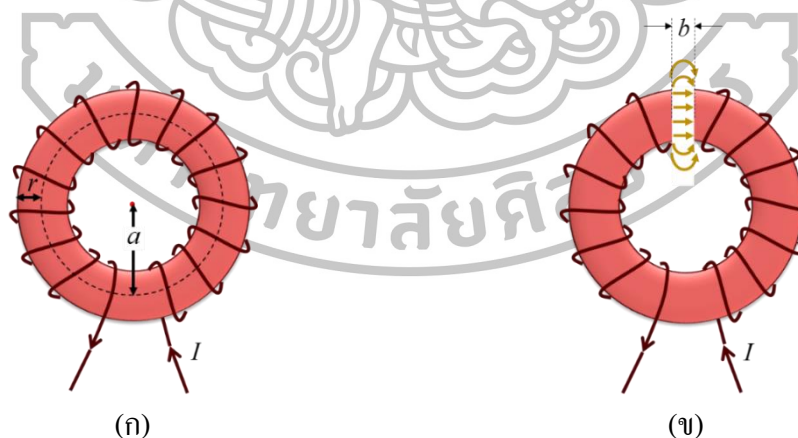
เมื่อ  $\Phi_{21}$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งพุ่งผ่านขดลวดที่ 2 จากฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่ 1  
 $M_{21}$  คือ ความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดที่ 2 อันเนื่องมาจากขดที่ 1  
 $\bar{I}_1$  คือ กระแสไฟฟ้าในขดที่ 1

### 2.1.6 วงจรแม่เหล็ก (magnetic circuits)

วงจรแม่เหล็กของขดลวดทอรอยด์ที่มีจำนวนขดลวด  $N$  รอบ มีกระแสไฟฟ้า  $\bar{I}$  ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่กับสารแม่เหล็กรูปวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) โดยที่สารแม่เหล็กมีค่าความสามารถซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r$  ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\bar{B}$  ในสารแม่เหล็กรูปวงแหวนเป็น

$$\bar{B} = \frac{\mu_r \mu_0 N \bar{I}}{l}, \quad l = 2\pi a \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\mu_0$  คือ ความสามารถซึมซับแม่เหล็กในอากาศ  
 $\mu_r$  คือ ความสามารถซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)



รูปที่ 2.6 วงจรแม่เหล็ก (ขดลวดทอรอยด์) (ก) ไม่มีช่องว่างของอากาศ (ข) มีช่องว่างของอากาศ มีขดลวดจำนวน  $N$  รอบ

เนื่องจากสารแม่เหล็กรูปวงแหวนมีพื้นที่หน้าตัด  $\pi r^2$  ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวจะเท่ากับ

$$\Phi \equiv \pi r^2 \bar{B} = \frac{\pi r^2 \mu_r \mu_0 N \bar{I}}{l} \quad (2.17)$$

และเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf มีค่าเท่ากับ  $NI$  และ  $\mathfrak{R}$  คือ ความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ของวงแหวนแม่เหล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและสมบัติของสารแม่เหล็กก็คือเทอมของ  $l/\pi r^2 \mu_r \mu_0$  ดังนั้น จากสมการที่ (2.17) จะได้ว่า

$$\Phi = \frac{\text{mmf}}{\mathfrak{R}} \quad (2.18)$$

ต่อไปเราจะพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสำหรับวงจรรสารแม่เหล็กรูปวงแหวนที่มีช่องว่างของอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) เนื่องจากความยาวของวงจรรแม่เหล็ก  $l$  แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอากาศและสารแม่เหล็ก ซึ่งความยาวของวงจรรแม่เหล็กจะเท่ากับ  $2\pi r - b$  และความยาวช่องว่างที่เป็นอากาศเท่ากับ  $b$  ดังนั้นความต้านทานแม่เหล็กรวมของวงจรรแม่เหล็กที่มีช่องว่างของอากาศจะได้เป็น เมื่อช่องว่างมีขนาดแคบมากเมื่อเทียบกับขนาดของวงแหวนแม่เหล็ก ( $b \ll r$ ) เราสมมติให้ที่บริเวณช่องว่างไม่มีการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กออกจากพื้นที่หน้าตัด  $\pi r^2$

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 = \frac{1}{\mu_r \mu_0 \pi r^2} \{2\pi a + (\mu_r - 1)b\} \quad (2.19)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.18) จะได้ฟลักซ์แม่เหล็กที่พื้นที่หน้าตัด  $\pi r^2$  ที่บริเวณช่องว่างเป็น

$$\Phi = \frac{\mu_r \mu_0 \pi r^2 NI}{2\pi a + (\mu_r - 1)b} \quad (2.20)$$

และสนามแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่างจะได้เป็น

$$\bar{B}_{\text{gap}} = \frac{\Phi}{\pi r^2} = \frac{\mu_r \mu_0 NI}{2\pi a + (\mu_r - 1)b} \quad (2.21)$$

เนื่องจากว่าสนามแม่เหล็กเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ เราจะได้ว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในวงแหวนแม่เหล็ก  $\bar{B}_{\text{core}}$  มีค่าเดียวกับความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่าง  $\bar{B}_{\text{gap}}$

$$\bar{B}_{\text{core}} = \bar{B}_{\text{gap}} \quad (2.22)$$

ในทางกลับกันความเข้มสนามแม่เหล็กในบริเวณช่องว่าง  $\bar{H}_{\text{gap}}$  มีค่าไม่เท่ากับสนามแม่เหล็กในวงแหวนแม่เหล็ก  $\bar{H}_{\text{core}}$  เนื่องจาก  $\bar{B}_{\text{gap}} = \mu_0 \bar{H}_{\text{gap}}$  และ  $\bar{B}_{\text{core}} = \mu_r \mu_0 \bar{H}_{\text{core}}$

ดังนั้น

$$\bar{H}_{\text{core}} = \frac{1}{\mu_r} \bar{H}_{\text{gap}} \quad (2.23)$$

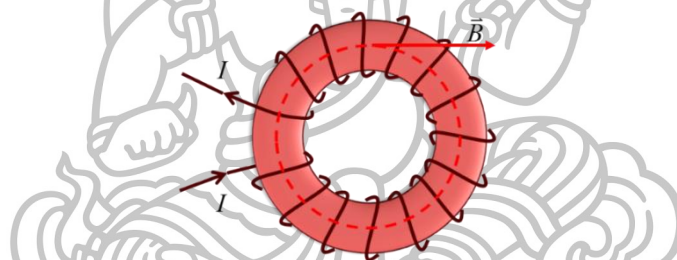
ซึ่งเราจะเห็นได้ว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางนั้น องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับผิวรอยต่อมีความต่อเนื่องสำหรับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\vec{B}$  แต่ไม่มีความต่อเนื่องสำหรับความเข้มแม่เหล็ก  $\vec{H}$

### 2.1.7 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

เพื่อความสะดวกในการอธิบายถึงสภาวะแม่เหล็กของสารใดๆ จึงได้มีการกำหนดเวกเตอร์แมกนีไทเซชัน (magnetization:  $\vec{M}$ ) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment:  $\vec{m}$ ) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตรเช่นเดียวกับความเข้มสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\vec{m}}{\Delta V} \quad (2.24)$$

สำหรับสนามแม่เหล็กรวม  $\vec{B}$  ของสารใดๆ จะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กภายนอกรวมกับสนามแม่เหล็กจากค่าแมกนีไทเซชันของสาร



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวม ( $\vec{B}$ ) ในขดลวดทอรรอยด์พันบนสารแม่เหล็ก  
ขดลวดทอรรอยด์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากรูปเราจะขดลวดทอรรอยด์พันสารแม่เหล็กรูปวงแหวน โดยที่สนามแม่เหล็กรวมของระบบมีค่าดังสมการที่ (2.25)

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\vec{B}_0$  คือ สนามแม่เหล็กจากขดลวดมีหน่วยเป็นเทสลา

$\mu_0$  คือ ความสามารถซึมซับได้ทางแม่เหล็กในอากาศมีค่าเท่ากับ  $1.2567 \times 10^{-6} \text{ J/A}^2 \text{ m}$

$\vec{M}$  คือ แมกนีไทเซชันมีหน่วยแอมแปร์ต่อเมตร

ถ้านำสารแม่เหล็กรูปวงแหวนออกแมกนีไทเซชัน  $\vec{M}$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้สนามแม่เหล็กรวมเท่ากับ

$$\vec{B} = \vec{B}_0 = \mu_0 n \vec{I} \quad (2.26)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนรอบของความยาวขดลวดต่อหนึ่งหน่วยความยาว

$\vec{I}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด

ดังนั้นเราจะได้ว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเมื่อมีกระแส  $I$  ไหลผ่านขดลวดทอรรอยด์ที่มีจำนวนขดลวด  $N$  รอบ ยาว  $l$  มีค่าเท่ากับ

$$\vec{H} = n\vec{I} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $n = N/l$  เราสามารถเขียนสมการความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมของขดลวดทอรรอยด์ที่พันสารแม่เหล็กรูปวงแหวนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.28)

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.28)$$

$\vec{H}$  และ  $\vec{M}$  มีหน่วยวัดเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (หน่วยวัดในระบบ SI)

ถ้ามีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดคงที่ตลอดเวลา สำหรับวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกนั้นค่า  $\mu_0\vec{M}$  มักจะมีค่ามากกว่า  $\mu_0\vec{H}$  ในบางครั้งค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันอาจใช้ในความหมายเดียวกันได้ ดังนั้นจึงทำให้สามารถประมาณสมการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กได้เป็น  $\vec{B} = \mu_0\vec{M}$  ซึ่งเราจะพบว่าสนามแม่เหล็กรวม  $\vec{B}$  จะขึ้นอยู่กับค่าแมกนีไทเซชัน  $\vec{M}$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสาร โดยทั่วไปแล้วในสารแม่เหล็กใดๆ  $\vec{M}$  เป็นสัดส่วนกับ  $\vec{H}$  โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.29)

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\chi_m$  คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ของสารใดๆ

ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของสารใดๆ เป็นปริมาณทางกายภาพที่อธิบายถึงคุณสมบัติของวัสดุในสนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุทั้งหมดสามารถจำแนกตามค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กออกเป็นสามกลุ่ม [20] ดังนี้

สารไดอะแมกเนติก (diamagnetic)  $-1 < \chi_m < 0$

สารพาราแมกเนติก (paramagnetic)  $0 < \chi_m \ll 1$

สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)  $\chi_m \gg 1$

เมื่อนำค่า  $\vec{M}$  ในสมการที่ (2.29) ไปแทนในสมการที่ (2.28) จะได้

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} \quad (2.30)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปสมการ (2.31)

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ความสามารถซึมซับแม่เหล็ก (magnetic permeability)

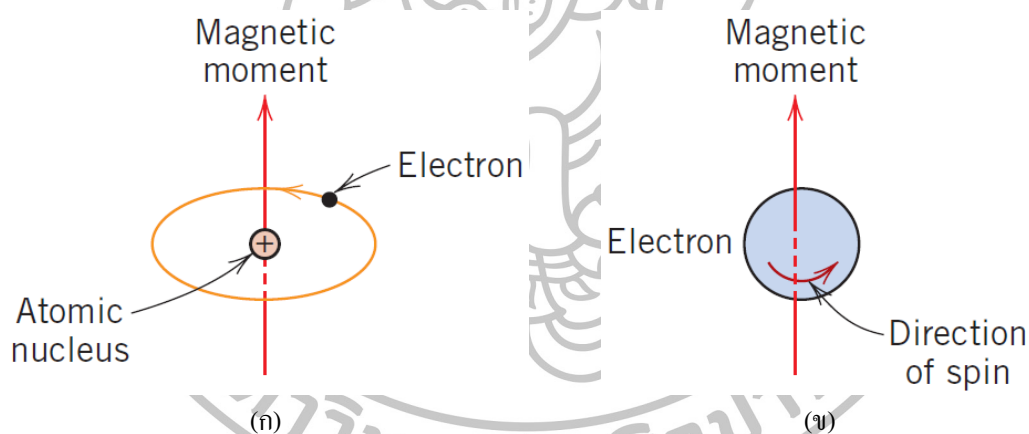
มีค่าเท่ากับ  $\mu_0(1 + \chi_m)$  หรือ  $\mu_0\mu_r$

$\mu_0$  คือ ความสามารถซึมซับแม่เหล็กในอากาศ

$\mu_r$  คือ ความสามารถซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)

### 2.1.8 การกำเนิดโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment)

สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่โคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน การโคจรของอิเล็กตรอนก็เทียบได้กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงเล็กๆ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กมากและมีสนามแม่เหล็กตลอดแนวการโคจรของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูป 2.8(ก) ในทำนองเดียวกันสภาวะแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศตามแกนของการหมุนรอบตัวเองดังแสดงในรูป 2.8(ข) โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเองนี้จะมีทิศทางได้เพียง 2 ชนิดคือทิศขึ้นและทิศลง ซึ่งเป็นทิศที่ขนานกันแต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนแต่ละตัวในอะตอมจึงถูกมองได้ว่าเป็นแม่เหล็กชิ้นเล็กๆ ที่มีโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการโคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเอง โดยทั่วไปค่าของโมเมนต์แม่เหล็ก อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า โบฮร์แมกนีตอน (bohr magneton:  $\mu_B$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  ซึ่งแต่ละอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็กเป็นทั้งค่าบวก (หมุนขึ้น) และลบ (หมุนลง)



รูปที่ 2.8 โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน และ (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

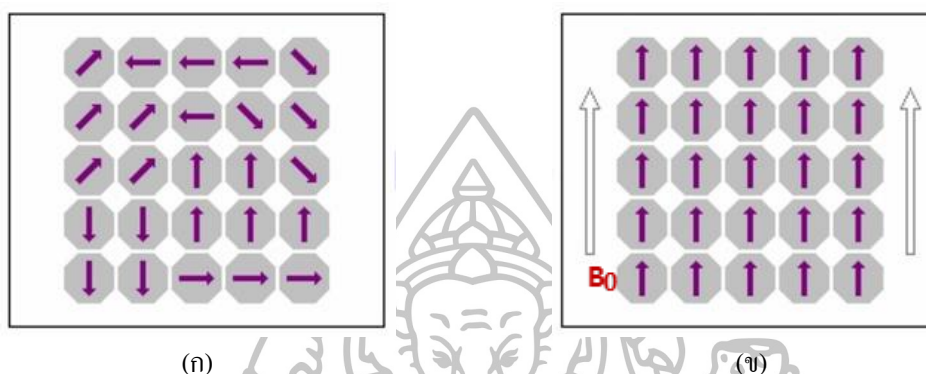
ที่มา: W.D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering." John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 2007.

### 2.1.9 สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material)

เมื่อสารแม่เหล็กอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกแมกนีไทเซชันของสารจะเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเปลี่ยนแปลงทิศทางอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก แต่เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกสารแม่เหล็กยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กอยู่ เราจะเรียกสารแม่เหล็กจำพวกนี้ว่าสารเฟอร์โรแมกเนติก โดยทั่วไปสารเฟอร์โรแมกเนติกจะประกอบไปด้วยส่วนของโมเมนต์แม่เหล็กหลายโดเมน (domain) ในแต่ละโดเมนจะประกอบไปด้วยอะตอมหลายๆ



อะตอม ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็กทิศทางเดียวกันทั้งโดเมน และแต่ละโดเมนจะถูกคั่นด้วยกำแพงโดเมน (domain wall) ก่อนสารเฟอร์โรแมกเนติกจะถูกกระตุ้นโดยสนามแม่เหล็กภายนอกทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะจัดเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายเป็นแบบสุ่มทำให้ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของสารทั้งก้อนมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 2.9(ก)

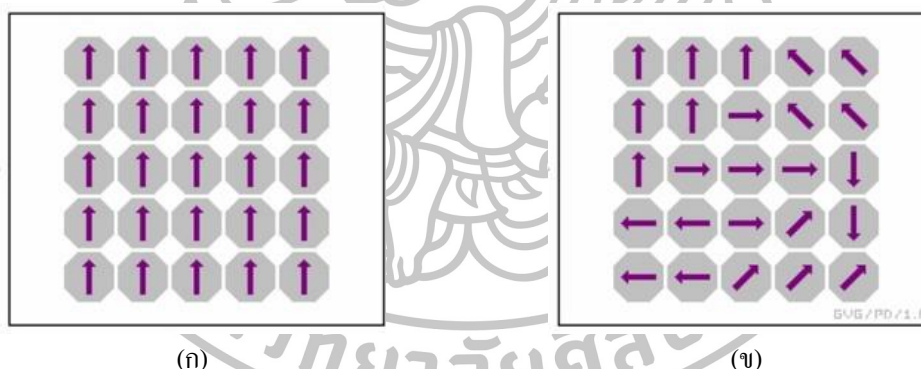


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 ชั้นส่วนสารเฟอร์โรแมกเนติก (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กแบบสุ่ม (ข) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก

ที่มา: August 2016. Available from <https://www.linkedin.com/pulse/measuring-principle-oxygen-through-paramagnetic-property-fontes>



(ก)

(ข)

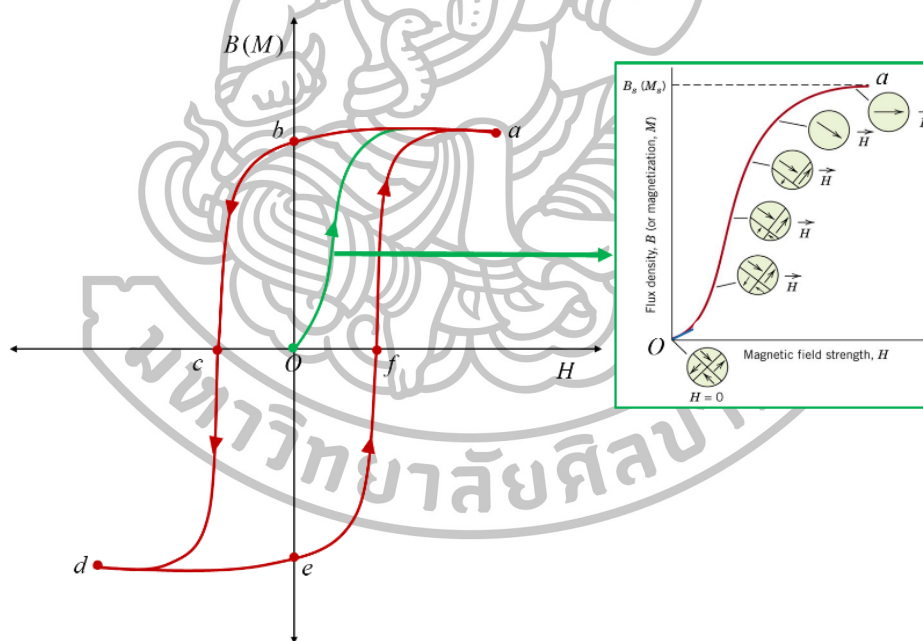
รูปที่ 2.10 ชั้นส่วนสารเฟอร์โรแมกเนติก (ก) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_c$  และ (ข) การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า  $T_c$

ที่มา: August 2016. Available from <https://www.linkedin.com/pulse/measuring-principle-oxygen-through-paramagnetic-property-fontes>

เมื่อสารเฟอร์โรแมกเนติกอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนเปลี่ยนแปลงทิศทางให้อยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยรูปที่ 2.9(ข) แสดงลักษณะของการจัดเรียงตัวโมเมนต์แม่เหล็กของสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกเมื่อถูกกระตุ้นโดยสนามแม่เหล็กภายนอก  $B_0$  ซึ่งจะเห็นว่าโมเมนต์แม่เหล็กมีการปรับให้แนวโมเมนต์แม่เหล็กขนานกันอย่างถาวร เนื่องจากแรงระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่อยู่ติดกันทำให้เมื่อมีการ

นำเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกสารเฟอร์โรแมกเนติกยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้ในสภาวะอุณหภูมิปกติพลังงานความร้อนไม่สามารถที่จะกระตุ้นทำให้โมเมนต์แม่เหล็กเปลี่ยนทิศทางได้ แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิกำหนดซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉพาะเจาะจงของสารหรือที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (curie temperature:  $T_C$ ) จะทำให้สารเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติกลายเป็นสารพาราแมกเนติกดังรูปที่ 2.10

สารเฟอร์โรแมกเนติกมีบทบาทอย่างมากกับอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้ นำเอาคุณสมบัติของสารเฟอร์โรแมกเนติกมาประยุกต์ใช้คือเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หรือเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยคุณสมบัติของสารเฟอร์โรแมกเนติกมีความสำคัญมากในการนำมาทำเป็นหัวอ่าน หัวเขียน และแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คุณสมบัติของสารเฟอร์โรแมกเนติกสามารถบอกได้ด้วยฮิสเทอรีซิสลูป โดยฮิสเทอรีซิสลูป คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแม่เหล็ก  $H$  กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ของวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกดังแสดงในรูปที่ 2.11

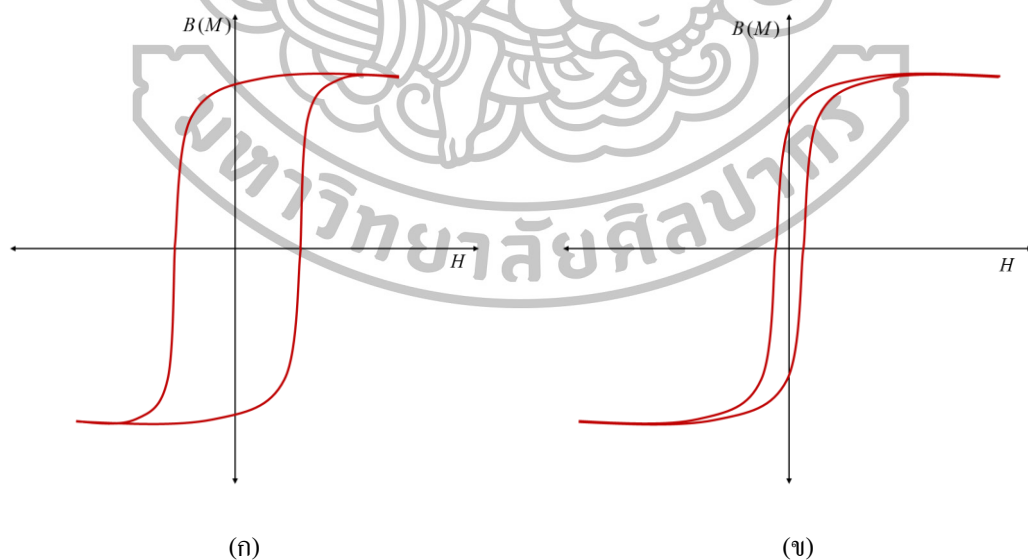


รูปที่ 2.11 ฮิสเทอรีซิสลูป (B-H loop)

เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก  $H$  เข้าไปในวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  เพิ่มขึ้น (ตามเส้นโค้ง  $o-a$ ) จนกระทั่งจนถึงจุดอิ่มตัวที่จุด  $a$  สารแม่เหล็กจะถึงจุดอิ่มตัวที่มีค่า  $B$  สูงสุด (saturation magnetic flux density:  $B_s$ ) เพราะแมกนีไทเซชันในสารแม่เหล็กมีทิศทางไปในแนวเดียวกันทั้งหมด และต่อมาเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงถึงศูนย์เส้นโค้งตามปริมาณ  $H$  จะไม่กลับมาในแนวเส้นโค้งเดิม (เส้นโค้ง  $o-a$ ) แต่จะเปลี่ยนแปลง

ไปตามเส้นโค้ง  $a-b$  ซึ่งสังเกตได้ว่า วัสดุจะยังคงแสดงสถานะแม่เหล็กอยู่แม้จะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกก็ตาม โดยแสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  เท่ากับ  $B_r$  ที่จุด  $b$  ถูกเรียกว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงเหลือ (remanence magnetic flux density:  $B_r$ ) ค่า  $H$  ของโลหะจะลดลงเป็นศูนย์หรือหมดสถานะแม่เหล็กอีกครั้งเมื่อใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามในปริมาณความเข้มเท่ากับ  $H_c$  ที่จุด  $c$  ซึ่งเรียกว่า โคเออร์ซิวิตี ถ้าให้สนามแม่เหล็กกลับทิศหรือติดลบมากขึ้น ก็จะทำให้โลหะมี  $B$  ตามเส้นโค้ง  $c-d$  ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  จะมีค่าสูงสุดแต่ทิศทางตรงข้ามกับ  $B_s$  ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ว่า  $-B_s$  และเมื่อลดปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  จนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ ที่จุด  $e$  ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็น  $-B_r$  ต่อมาเมื่อเพิ่ม  $H$  ในทิศทางตรงกันข้ามผลที่ได้คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  จะไม่ทับโค้ง  $o-a$  แต่จะเป็นโค้ง  $e-f-a$  ซึ่งการไต่วงที่สมบูรณ์ 1 รอบเรียกว่า ฮิสเทอรีซิสลูป

ค่า  $H_c$  ในฮิสเทอรีซิสลูปจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความยากง่ายของการสร้างวัสดุให้มีสภาพเป็นแม่เหล็กหรือการลบล้างความเป็นแม่เหล็กและ ค่า  $B_r$  บ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บพลังงานแม่เหล็ก สำหรับสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างแข็งหรือสารแม่เหล็กถาวร (hard ferromagnetic material) จะแสดงลักษณะฮิสเทอรีซิสลูปดังรูปที่ 2.12(ก) ซึ่งจะเห็นว่าความกว้างของลูปกว้างมากเมื่อเทียบกับฮิสเทอรีซิสลูปของสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อนหรือสารแม่เหล็กชั่วคราว (soft ferromagnetic material) ดังรูปที่ 2.12(ข)



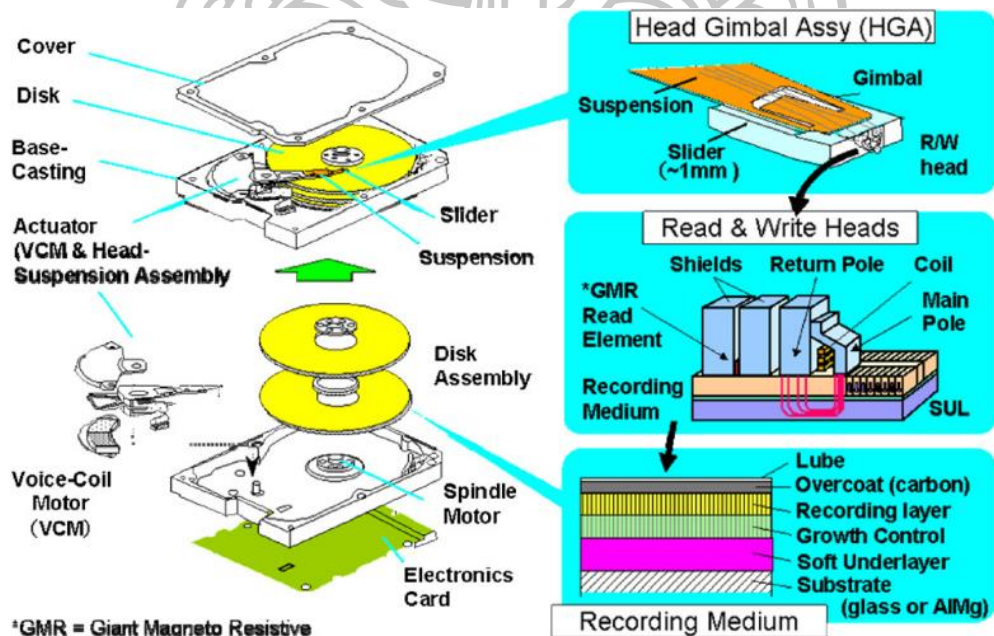
รูปที่ 2.12 M-H ลูปของ (ก) สารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างแข็ง (ข) สารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อน

ดังนั้นสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างแข็งจึงเหมาะสมมากในการนำมาใช้ผลิตอุปกรณ์ที่ต้องการความเป็นแม่เหล็กสูงและลบล้างความเป็นแม่เหล็กได้ยาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ควรมีในแผ่น

บันทึกข้อมูลแม่เหล็กและในส่วนของสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อนที่มีลักษณะของฮีสเตอร์ซิส ลูปแคบและ  $B_c$  ต่ำๆ นั้นเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีของหัวเขียนที่ไม่ต้องการความเป็นแม่เหล็กถาวรแต่ต้องการให้มีความง่ายต่อการลบล้างความเป็นแม่เหล็กและไม่มีการกักเก็บพลังงานแม่เหล็กเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวเขียน

## 2.2 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก: ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD)

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลประเภทงานแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูล (magnetic platter) หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (head magnetic recording) ซึ่งมีหัวอ่าน (reader) หัวเขียน (writer) และแผ่นวงจรไฟฟ้า (electronic card) ในรูปที่ 2.13 แสดงชิ้นส่วนเชิงกลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้แก่ ฝาครอบ(cover) ฐาน (base casting) แอสเซมบลีหัว (Head Stack Assembly: HSA) ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยๆ คือ ขดลวดเสียง (voice coil) แขนระบบการขับเคลื่อน (actuator arm) แอสเซมบลีกิมบอลหัว (Head Gimbal Assembly: HGA) (เป็นชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยซัสเพนชัน (suspension) และสไลเดอร์ (slider) ) ซึ่งเราจะสนใจเฉพาะในส่วนของระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก



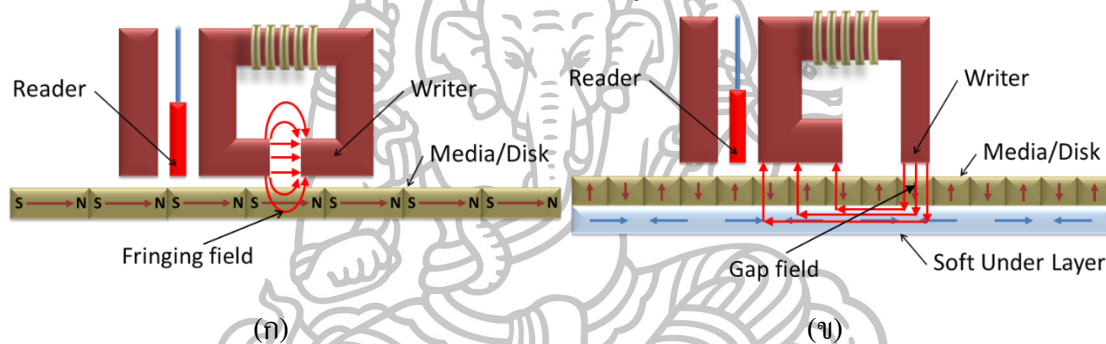
รูปที่ 2.13 โครงสร้างและส่วนประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รูปด้านขวามือเป็นโครงสร้างของระบบการบันทึกข้อมูลในแนวตั้ง หัวเขียนมีลักษณะเป็นแบบซิงเกิลโพลเฮด ซึ่งใช้ในฮาร์ดดิสก์รุ่นใหม่ โดยมีระยะห่างของขั้วขั้วด้านหลังกับโพลเพื่อให้เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กที่ดีขึ้น [21]

ที่มา: R. Wood. "Future hard disk drive systems." J. Magn. Magn. 321, (2009): 555–561.

## 2.3 ระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ระบบบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ระบบการบันทึกข้อมูลแนวอนกับระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้ง โดยทั้งสองมีความแตกต่างอย่างชัดเจน กล่าวคือ ระบบการบันทึกข้อมูลแบบเก่า (แนวอน) มีโครงสร้างแบบริงเฮด (Ring Head: RH) และแผ่นบันทึกจะมีทิศทางของแมกนีไทเซชันในแนวระนาบ ดังรูปที่ 2.14(ก)

ส่วนระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้งมีโครงสร้างของหัวเขียนเป็นแบบซิงเกิลโพลเฮด (Single Pole Head: SPH) แผ่นบันทึกจะมีทิศทางของแมกนีไทเซชันตั้งฉากกับผิวของแผ่นบันทึก และยังมี การเพิ่มของชั้นแม่เหล็กอ่อนใต้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก เพื่อบังคับให้สนามแม่เหล็กจากซิงเกิลโพลเฮดมีทิศตั้งฉากกับชั้นสารแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.14(ข)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (ก) แนวอน (LMR) และ (ข) แนวตั้ง (PMR)

### 2.3.1 ข้อจำกัดความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวอน

ตั้งแต่เริ่มผลิตฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟจนถึงปี 2005 การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเป็นแบบแนวอนมาโดยตลอด แต่เมื่อเวลาผ่านไปมีความต้องการในการเพิ่มขนาดความจุข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟจึงได้มีการพัฒนาหัวเขียนและแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กขึ้น เนื่องจากความจุข้อมูลจะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของการกระจายสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อต้องการให้ฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟมีความจุเพิ่มขึ้นขนาดข้อมูลหรือบิตข้อมูลจะต้องมีขนาดเล็กลง ซึ่งถ้าต้องการให้ข้อมูลมีขนาดเล็กลงเราต้องลดขนาดของหัวเขียนให้เล็กลงด้วย แต่เมื่อหัวเขียนมีขนาดเล็กลงส่งผลให้จะต้องลดขนาดของเกรนในแผ่นบันทึกลงด้วยเพื่อเพิ่มจำนวนของเกรนต่อหนึ่งบิตข้อมูล ( $N$ ) เนื่องจากการลดขนาดของเกรนจะทำให้อัตราสัญญาณอ่านข้อมูลต่อสัญญาณรบกวนจากแผ่นบันทึกข้อมูล ( $SNR$ ) ลดน้อยลงดังสมการที่ (2.32) [22]

$$SNR = 10 \log N \quad (2.32)$$

แต่เมื่อได้ทำการลดขนาดปริมาตรของเกรน (grain volume :  $V$ ) ลงจะทำให้มีผลต่อความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิ (thermal energy) โดยจะอธิบายได้ด้วยผลกระทบทฤษฎีพาราแมกเนติก ซึ่งถ้าลดขนาดเกรนลงจะทำให้กำแพงพลังงาน (energy barrier) มีค่าลดลงจึงมีผลให้ความไม่เสถียรต่ออุณหภูมิมากขึ้น ในการแก้ปัญหาทำได้โดยการเพิ่มค่าแอนไอโซโทรปี (anisotropy constant:  $K_u$ ) เพื่อคงค่าพลังงานไว้เพื่อป้องกันความผันผวนทางความร้อนของแมกนีไทเซชันภายในเกรนจะต้องมีอัตราส่วนดังนี้

$$\frac{\text{energy barrier}}{\text{thermal energy}} \propto \frac{\text{anisotropy} \times \text{volume}}{k_B \times \text{temperature}} = \frac{K_u V}{k_B T} \geq 60 \quad (2.33)$$

เมื่อ  $k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์สมาน ( $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) และ  $T$  คือ อุณหภูมิ โดยอัตราส่วนดังกล่าวจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 60 โดยขนาดเกรนจำกัดอยู่ที่ประมาณ 7 ถึง 8 นาโนเมตรสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแวนอน [23-25]

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าโคเออร์ซิวิตีให้กับแผ่นบันทึกข้อมูลจะส่งผลทำให้ยากต่อการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึก หัวเขียนจึงต้องสร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มขนาดของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ การออกแบบลักษณะรูปร่างและเพิ่มจำนวนขดลวดของหัวเขียน การเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดของหัวเขียน และการเปลี่ยนชนิดของสารแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่าความซึมซับได้ทางแม่เหล็กมากขึ้น เป็นต้น สำหรับวิธีการเพิ่มจำนวนขดลวดให้แก่หัวเขียนเพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กไม่สามารถทำได้จริง เนื่องจากปัจจุบันหัวเขียนมีขนาดเล็กลง ขนาดของขดลวดก็ต้องเล็กลงไปด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาเปลี่ยนชนิดของสารแม่เหล็กตัวใหม่

สารแม่เหล็กที่ใช้ผลิตหัวเขียนนั้นเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อน ซึ่งในปัจจุบันสารแม่เหล็กสามารถให้ค่าความหนาแน่นแม่เหล็กอิ่มตัวสูงสุดที่ 2.4 เทสลา [26] แต่ต่อมาระบบการบันทึกข้อมูลแบบแวนอนก็ไม่สามารถเพิ่มความจุได้มาก (ความจุข้อมูลสูงสุดของระบบการบันทึกแวนอนเท่ากับ  $\sim 100 \text{ Gbit/in}^2$ ) จึงได้มีการพัฒนาระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิดชุปเปอร์พาราแมกเนติกได้ดีกว่าระบบการบันทึกข้อมูลแบบเดิมหลายเท่า [27-28]

### 2.3.2 ระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้ง

ระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้งหัวเขียนจะถูกออกแบบให้บริเวณช่องว่างทางกายภาพ (physical gap) ของหัวเขียนมีขนาดกว้างกว่าระยะความสูงการบินของหัวเขียน ในการออกแบบให้ช่องว่างทางกายภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อบังคับให้สนามแม่เหล็กวิ่งผ่านไปยังชั้นเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อน (Soft-magnetic Under Layer: SUL) มากกว่าวิ่งไปยังช่องว่างทางกายภาพ (ดังรูปที่ 2.15)

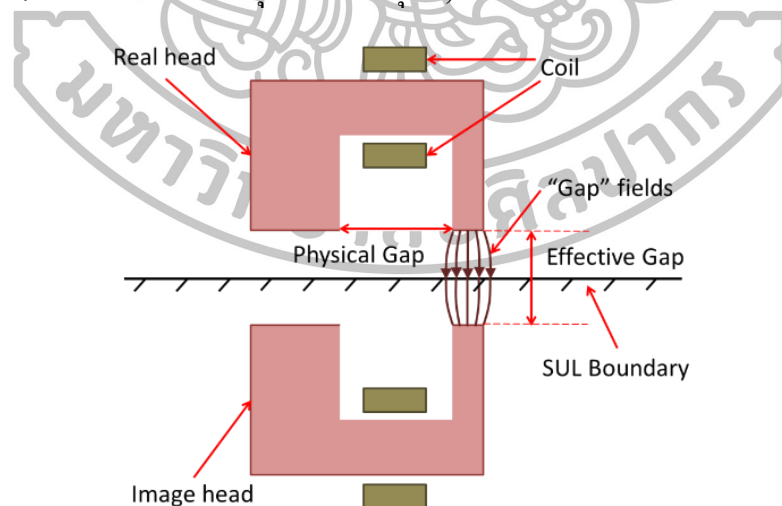
ทำให้ทิศทางสนามแม่เหล็กจากปลายหัวเขียนวิ่งเข้าสู่สารแม่เหล็กมีทิศในแนวตั้งฉาก เนื่องจากค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กในชั้นเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อนมีค่าน้อย ทำให้สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับอากาศ

อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบการบันทึกข้อมูลแนวตั้ง คือ ความหนาของชั้นแม่เหล็กอ่อนของแผ่นบันทึก ซึ่งสามารถประมาณค่าความหนาที่น้อยสุดที่จำเป็นสำหรับชั้นแม่เหล็กอ่อนหรือชั้น SUL ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.42) [29]

$$t_{\text{soft underlayer}} \geq \frac{l}{2} \frac{M_{S \text{ poletip}}}{M_{S \text{ soft underlayer}}} w_{\text{poletip}} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $w_{\text{poletip}}$  คือ ความกว้างของปลายโพลหลัก  
 $M_{S \text{ poletip}}$  คือ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของหัวเขียน  
 $M_{S \text{ soft underlayer}}$  คือ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของชั้นแม่เหล็กอ่อนหรือ SUL

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบซิงเกิลโพลเฮดใช้สนามแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่าง (gap field) ในการบันทึกข้อมูล (ในรูปที่ 2.14(ข)) โดยจะให้สนามแม่เหล็กสูงสุดประมาณ  $4\pi M_s$  (2.4 เทสลา) โดยที่  $M_s$  คือค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของคุณสมบัติสารเฟอร์โรแมกเนติกอย่างอ่อน ซึ่งต่างจากระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแวนอนที่มีหัวเขียนแบบริงเฮดที่ใช้สนามแม่เหล็กฟริงกิงฟิลด์ (fringing field) ในการบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.14(ก) โดยให้ค่าสนามแม่เหล็กน้อยกว่า  $2\pi M_s$  (<1.2 เทสลา สำหรับวัสดุที่พบในปัจจุบัน)

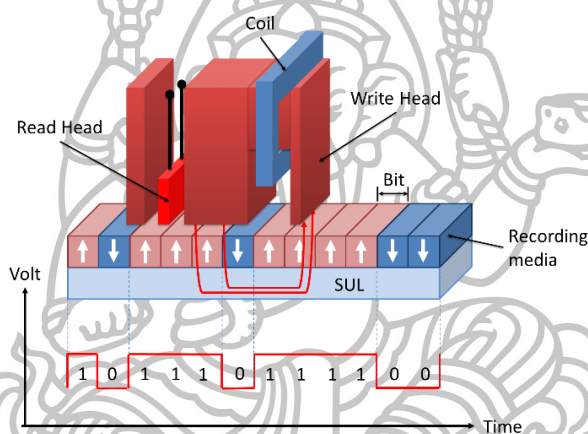


รูปที่ 2.15 โครงสร้างแบบจำลองภาพแม่เหล็ก (magnetic image model) เนื่องจากการมี SUL

ที่มา: S. Khizroev and D. Litvinov. *Perpendicular Magnetic Recording*. New York : Kluwer Academic Publishers, 2005.

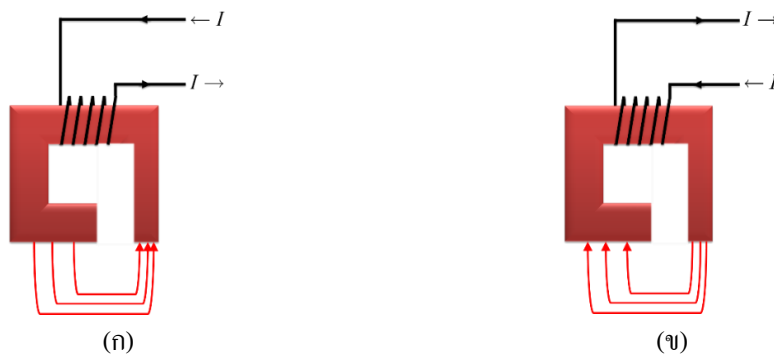
## 2.4 กระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

กระบวนการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นกระบวนการที่แปลงจากข้อมูลดิจิทัลไปเป็นข้อมูลแม่เหล็ก กล่าวคือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกป้อนข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบไบนารีจากเครื่องคอมพิวเตอร์และทำการแปลงบิตข้อมูลให้อยู่ในรูปกระแสไฟฟ้าเขียน (write current) จากนั้นกระแสไฟฟ้าเขียนจะถูกป้อนไปยังขดลวดของหัวเขียน รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบของการบันทึกข้อมูลในระบบดิจิทัลและสนามแม่เหล็ก การเก็บข้อมูลจะถูกเก็บเป็นพื้นที่เล็กๆ ในรูปแบบของแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม (ดังรูปที่ 2.16) แต่ละพื้นที่เล็กๆ ของข้อมูลเรียกว่า บิต ซึ่งแทนบิตที่มีทิศทางตรงกันข้ามด้วยข้อมูลดิจิทัล “0” และ “1”



รูปที่ 2.16 โครงสร้างการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางตรงกันข้าม

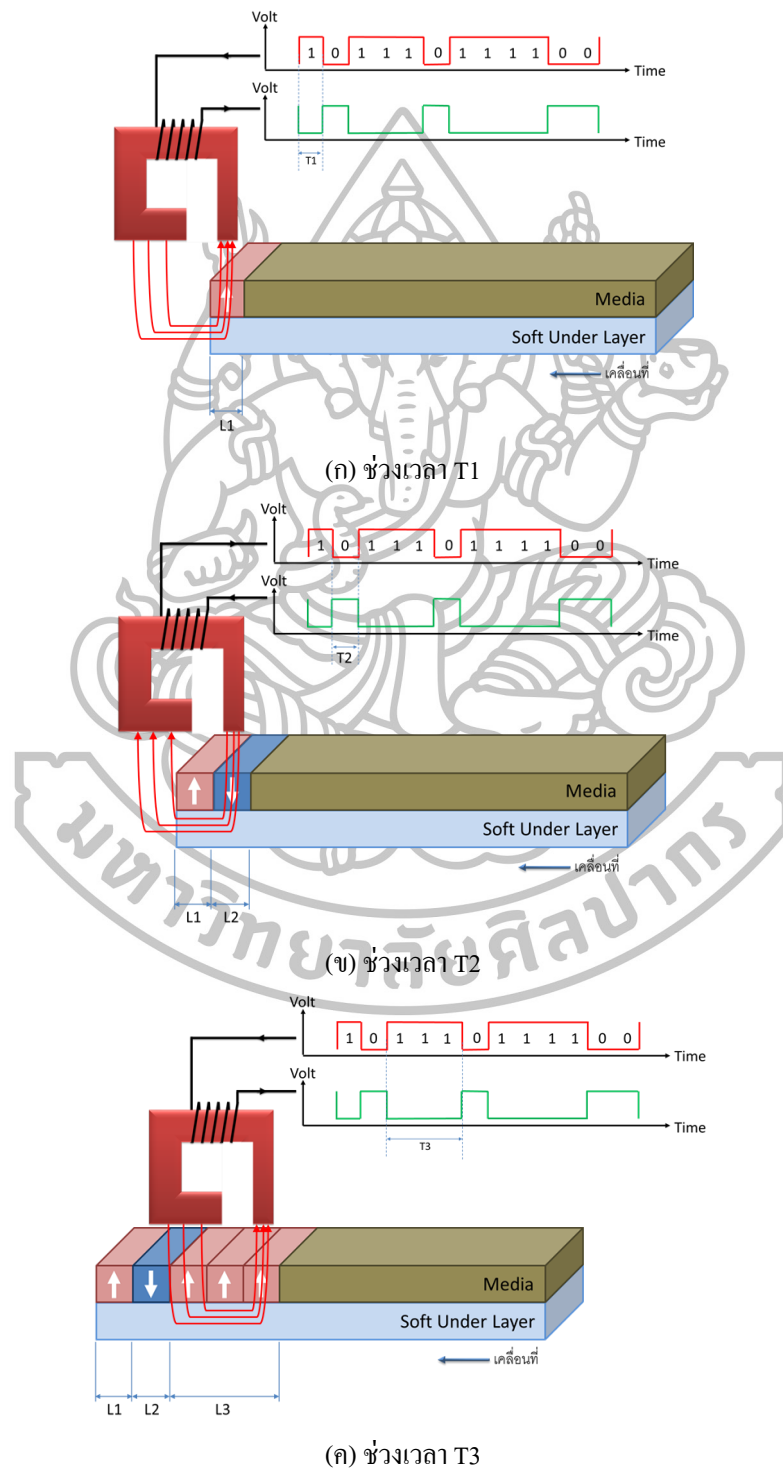
เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายใน โยค และออกมาจากปลายโพลหลักแล้วย้อนกลับไปยังปลายโพลย้อนกลับ ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ในรูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของหัวเขียนที่มีขดลวดพันอยู่รอบสารแม่เหล็ก รูปที่ 2.17(ก) และ 2.17(ข) เราจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กของทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามเนื่องจากการกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไปเหนี่ยวนำทำให้แมกนีไทเซชันของเกรนในแผ่นบันทึกข้อมูลอิมตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก



รูป 2.17 ทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็ก

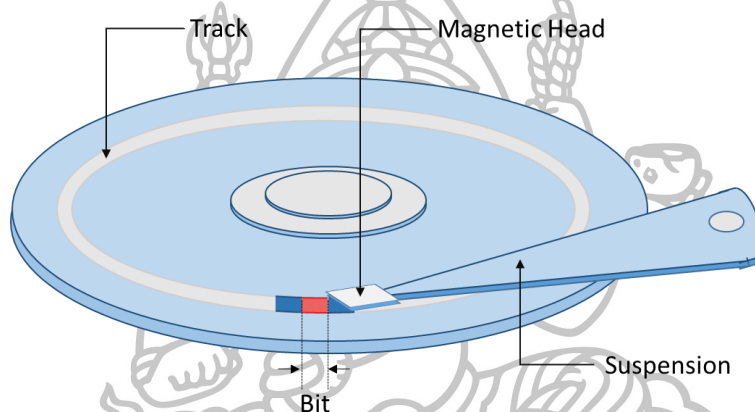


พิจารณารูปที่ 2.18 หัวเขียนถูกป้อนกระแสไฟฟ้าเขียนเข้าไปที่ขดลวดเส้นบนและป้อนกระแสไฟฟ้าเขียนกลับหัวเข้าไปที่ขดลวดเส้นล่างของหัวเขียน ดังรูปที่ 2.18(ก) พบว่าทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าจากขดลวดด้านบนและไหลออกขดลวดด้านล่าง ทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้อึดตัวไปในทิศทาง



รูปที่ 2.18 กระบวนการเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟในช่วงเวลา T1 T2 และ T3

ซึ่งมีความยาวข้อมูลบิต  $L_1$  ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นบันทึกในช่วงเวลา  $T_1$  ต่อมาเมื่อพิจารณาในช่วงเวลา  $T_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ข) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าถูกป้อนให้กับขดลวดในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับช่วงเวลา  $T_1$  ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กนี้ไหลย้อนกลับไปในทางตรงกันข้ามกับ  $T_1$  คือ มีทิศทางขึ้น และถ้าป้อนข้อมูลเดียวกันกับช่วงเวลา  $T_1$  แต่เพิ่มเวลานานขึ้นเป็นช่วงเวลาที่  $T_3$  พบว่าข้อมูลบิตจะมีความยาวเป็น  $L_3$  ซึ่งยาวกว่า  $L_1$  ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ค) เนื่องจากช่วงเวลา  $T_3$  มีการเคลื่อนที่ของแผ่นบันทึกนานกว่าช่วงเวลา  $T_1$  [30]

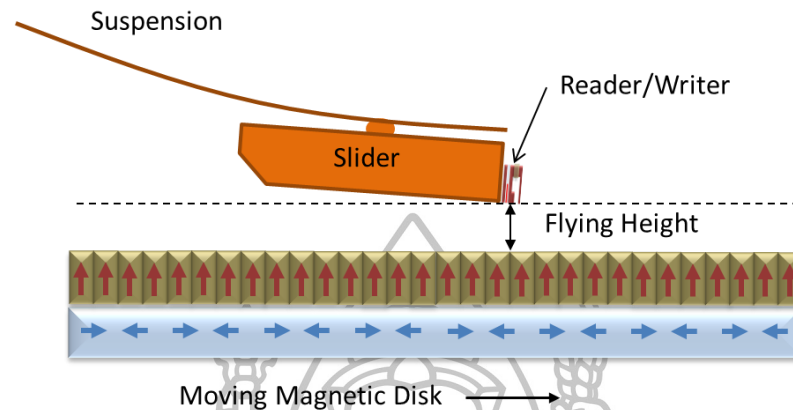


รูปที่ 2.19 บิตถูกเขียนเรียงกันเป็นวงกลมในแนวรัศมีบนแผ่นบันทึกข้อมูล

ในระหว่างการเขียน (บันทึก) ข้อมูลนั้นแผ่นบันทึกข้อมูลจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วคงที่ตั้งแต่ 5,000 RPM ถึง 15,000 RPM บิตถูกเขียนเรียงกันเป็นวงกลมในแนวรัศมีบนแผ่นบันทึกข้อมูลเรียกว่า แทร็ค (track) (ดังรูปที่ 2.19) แผ่นบันทึกข้อมูลมีจำนวนแทร็คหลายหมื่นแทร็ค และในแต่ละแทร็คมีหลายล้านบิต เมื่อบันทึกข้อมูลครบหนึ่งแทร็ค สไลเดอร์พร้อมหัวเขียนและหัวอ่านจะถูกเลื่อนไปยังอีกแทร็ค

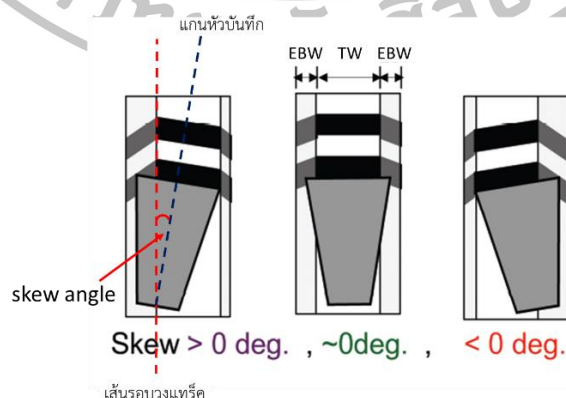
ในขณะที่มีการบันทึกข้อมูลสไลเดอร์จะลอยนิ่งอยู่เหนือผิวด้านบนของแผ่นบันทึกข้อมูลในระยะความสูงประมาณ 7 นาโนเมตร ระยะความสูงดังกล่าวเรียกว่า ความสูงการบิน (flying height) ดังรูปที่ 2.20 ประกอบ สไลเดอร์จะถูกติดตั้งอยู่บนชัชเป็นชั้นที่แนบมากับมอเตอร์ขดลวดเสียง (voice coil motor) ผ่านแขนขับเคลื่อน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้มอเตอร์ขดลวดเสียงในการเลื่อนหัวเขียนและหัวอ่าน โดยมอเตอร์ขดลวดเสียงจะทำงานร่วมกับข้อมูลเซอร์โว (servo pattern) [31] ก่อนการใช้งานแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีการเขียนข้อมูลเซอร์โวกระจายอยู่รอบๆ แทร็คเพื่อแสดงตำแหน่งของแต่ละแทร็คได้และทำให้เลื่อนไปยังแทร็คต่อไป ระยะห่างระหว่างแทร็คที่อยู่ติดกันนั้นจะมีระยะห่างประมาณเศษหนึ่งส่วนหนึ่งแสนนิ้วหรือน้อยกว่า

สำหรับการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เราสามารถทำได้โดยการลดขนาดของบิต ให้เล็กลงการลดขนาดของบิตสามารถทำได้สองแกนด้วยกัน คือ ถ้าต้องการลดความยาวในแกน



รูปที่ 2.20 ระยะความสูงในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน เรียกว่า ความสูงการบิน  
ที่มา: Hard disk drive functionality. August 2016. Available from <http://www.dataclinic.it/data-recovery/hard-disk-functionality.htm>

เส้นรอบวง (ลดความกว้างด้านดาวน์แทร็ค) ต้องทำการเพิ่มความไวของหัวเขียนและหัวอ่านพร้อมทั้งเพิ่มความไวในการหมุนของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก การลดขนาดของบิตในแกนนี้เรียกว่าการเพิ่มจำนวนบิตต่อระยะความยาวหนึ่งนิ้ว (bit per inch) แต่ถ้าลดขนาดในแนวรัศมีหรือลดความกว้างของแทร็ค (ลดความกว้างด้านครอสแทร็ค) จะต้องลดขนาดของหัวเขียนและเพิ่มประสิทธิภาพระบบกลไกของมอเตอร์ขดลวดและเซอร์โว การลดขนาดความกว้างแทร็คนี้เรียกว่าการเพิ่มจำนวนแทร็คต่อระยะความยาวหนึ่งนิ้ว (track per inch)

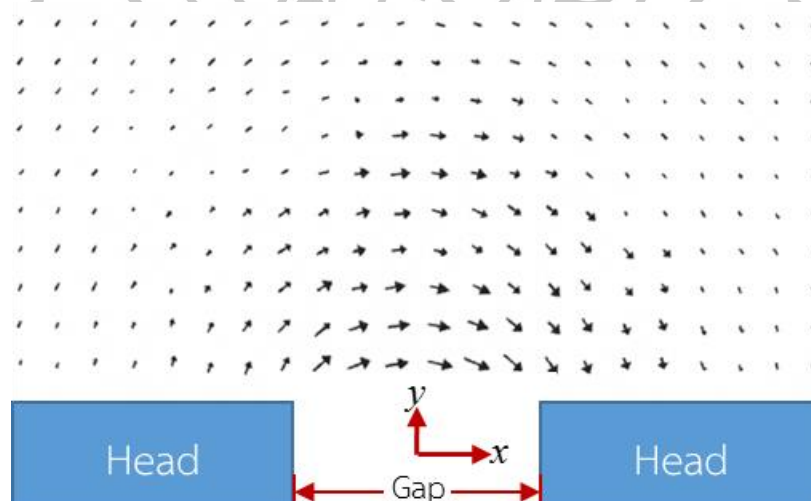


รูปที่ 2.21 โครงสร้างของแทร็คข้อมูลที่เกิดจากมุมเอียงน้อยกว่า 0 และมากกว่า 0  
ที่มา: K. Miura, E. Yamamoto, H. Aoi, and H. Muraoka. "Skew angle effect in shingled writing magnetic recording." Physics Procedia. 16, (2011): 2–7.

หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไม่ได้บินอยู่บนแผ่นบันทึกทำมุม 0 องศาเสมอ โดยทั่วไป หัวบันทึกจะถูกออกแบบมาให้บินทำมุมเอียง (Skew Angle: SA) ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนของหัวบันทึก ข้อมูลแม่เหล็กกับเส้นรอบวงของแทร็ค เนื่องจากผลของมุมดังกล่าวพบว่าแทร็คข้อมูลจะมีสองส่วน คือ ส่วนของความกว้างของข้อมูล (Track Width: TW) และแถบด้านข้าง (side band) หรือแถบลบ ข้อมูล (Erase Band Width: EBW) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ดังนั้นอีกวิธีหนึ่งในการที่จะเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สามารถทำได้โดยการลดขนาดของแถบด้านข้างหรือแถบลบ ข้อมูลเพื่อเพิ่มจำนวนแทร็คข้อมูลขึ้น โดยการลดขนาดของแถบลบข้อมูล 30% เนื่องจากการ ออกแบบให้หัวบันทึกบินทำมุมตั้ง 0-10 องศา พบว่าแทร็คพิชลดลง 7% โดยการควบคุมมุมเอียง [32]

## 2.5 สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแวนอนใน 2 มิติ

สนามแม่เหล็กฟริงกฟิลด์บริเวณใกล้เคียงกับช่องว่างของหัวเขียนที่เกิดจากการ เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.22 หัวลูกศรแสดงถึงทิศทางของสนาม แม่เหล็กและขนาดความยาวของลูกศรแทนความเข้มของสนามแม่เหล็ก สังเกตที่กึ่งกลางช่องว่าง เหนือช่องว่างขึ้นไปทิศทางของลูกศรเรียงอยู่ในแนวราบอย่างมีประสิทธิภาพและที่บริเวณอื่นๆ ทิศทางของลูกศรจะทำมุมต่างๆ กับแนวราบหรือกับแกน  $x$  ก่อนอื่นเราจะพิจารณาสมการอย่างง่าย เพื่อช่วยต่อความเข้าใจและหลังจากนั้นจะพิจารณาสมการที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.22 สนามแม่เหล็กและรูปทรงของสนามแม่เหล็กที่เท่ากัน

ที่มา: Kanu G. Ashar. "Magnetic Disk Drive Technology." IEEE Press. (1997): 46-51.

สนามแม่เหล็กมีรูปทรงเป็นวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยสนามแม่เหล็กตลอดแนวเส้นรอบวงจะมีค่าเท่ากัน จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) สนามแม่เหล็กรอบแท่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งตัวนำ สนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าเท่ากับ  $i/2\pi r$  เมื่อ  $r$  คือรัศมีของเส้นทางวงกลม ในกรณีของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีขนาดช่องว่างที่เล็กมาก สนามแม่เหล็กมีรูปทรงเป็นวงกลมและมีค่าสนามแม่เหล็กในแนวรัศมี  $r$  เป็น  $ni/\pi r$  แอมแปร์ต่อเมตร โดยที่  $i$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด  $n$  คือ จำนวนรอบของขดลวดและ  $ni$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่าง ส่วน  $\pi r$  ที่แทน  $2\pi r$  นั้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กจะทำการอินทิเกรตแค่ครึ่งวงกลมเท่านั้น ซึ่งต่างจากกฎของแอมแปร์ที่อินทิเกรตเต็มรอบวงกลม

สำหรับหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวนอนความสนใจหลักคือสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน  $x$  ดังนั้นจะต้องแปลงสนามแม่เหล็กจากระบบทรงกระบอก  $(r, \theta)$  เป็นระบบคาร์ทีเซียน  $(x, y)$  สนามแม่เหล็กขององค์ประกอบในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จะได้ดังนี้

$$H_x = \frac{ni}{\pi} \frac{y}{(x^2 + y^2)}, \quad H_y = \frac{ni}{\pi} \frac{x}{(x^2 + y^2)} \quad (2.34)$$

และในกรณีของหัวเขียนบันทึกแม่เหล็กแบบริงเฮดสามารถคำนวณหาค่าขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ได้ดังสมการที่ (2.35) และ (2.36) ตามลำดับ

$$H_x(x, y) = \frac{H_g}{\pi} \left[ \arctan \frac{x+g/2}{y} - \arctan \frac{x-g/2}{y} \right] \quad (2.35)$$

$$H_y(x, y) = -\frac{H_g}{2\pi} \ln \left[ \frac{(x+g/2)^2 + y^2}{(x-g/2)^2 + y^2} \right] \quad (2.36)$$

ในสมการที่ (2.35) และ (2.36)  $g$  คือ ความกว้างของช่องว่าง และ  $H_g$  ความเข้มสนามแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่างของหัวเขียนที่เกิดจากการกระตุ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด (รูปที่ 2.14(ก)) หน่วยของ  $H_x$  และ  $H_y$  เหมือนกับหน่วยของ  $H_g$  [33]

## 2.6 ประสิทธิภาพของหัวเขียนและสนามแม่เหล็กในบริเวณช่องว่างของปลายโพล

วงจรมแม่เหล็กของหัวเขียนบันทึกแบบริงเฮดสามารถประมาณค่าได้ด้วยอนุกรมของสองความต้านทานแม่เหล็ก ที่บริเวณช่องว่างของหัวเขียนและที่แท่งแม่เหล็กของหัวเขียน ความต้านทานแม่เหล็กดังกล่าวแทนด้วย  $\mathfrak{R}_g$  และ  $\mathfrak{R}_c$  โดยที่

$$\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g}, \quad \mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $g$  และ  $l_c$  คือ ระยะความยาวช่องว่างและแท่งแม่เหล็กของหัวเขียน  
 $A_g$  และ  $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดช่องว่างและแท่งแม่เหล็กตามลำดับ  
 $\mu$  คือ ความสามารถซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

แรงเคลื่อนแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขโดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดจะถูกหารระหว่างค่าความต้านทานแม่เหล็กดังกล่าว เนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็กตัดผ่านเฉพาะบริเวณช่องว่าง ซึ่งค่าประสิทธิภาพของหัวเขียนแสดงดังสมการที่ (2.38)

$$\eta = \frac{R_g}{R_g + R_c} = \frac{1}{1 + (l_c \mu_0 / g \mu)(A_g / A_c)} \quad (2.38)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กรวมคือ แอมแปร์-เทิร์น  $ni$  ซึ่งเป็นผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตัดผ่านแท่งหัวเขียนและช่องว่าง คือ  $ni = H_g g + H_c l_c$  ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของหัวเขียนในเทอมของแอมแปร์-เทิร์นหรือแรงเคลื่อนแม่เหล็กกำหนดได้ดังนี้

$$\eta = \frac{H_g g}{H_c l_c + H_g g} = \frac{H_g}{ni} \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.39) จะได้  $H_g$  เท่ากับ

$$H_g = \eta \frac{ni}{g} \quad (2.40)$$

ดังนั้นนำสมการที่ (2.38) มาแทนค่าในสมการที่ (2.40) จะได้

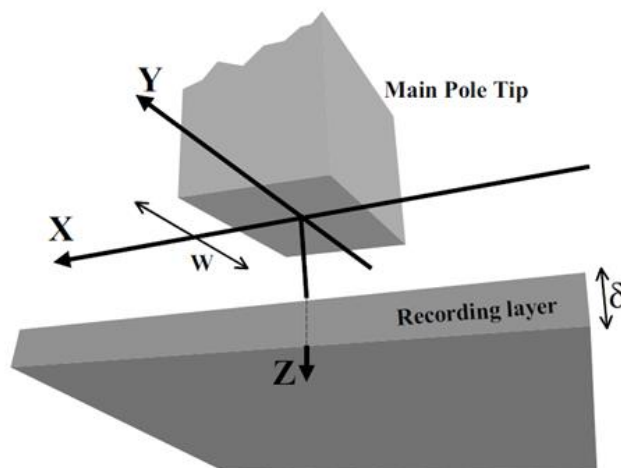
$$H_g = \frac{ni}{g + (l_c / \mu_0)(A_g / A_c)} \quad (2.41)$$

สมการที่ (2.41) เป็นสมการสุดท้าย โดยให้ค่าสนามแม่เหล็กบริเวณช่องว่างในเทอมของรูปทรงเรขาคณิตของหัวเขียน ( $n, g, l_c, A_g, A_c$ ) วัสดุแม่เหล็ก ( $\mu$ ) และกระแสไฟฟ้า ( $i$ ) ผ่านขดลวดของหัวเขียน ซึ่งสมการดังกล่าวจะนำไปแทนค่าในสมการที่ (2.35) และ (2.36) เพื่อจะทำการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่บริเวณใกล้เคียงกับช่องว่าง [33]

## 2.7 การประมาณค่าสนามแม่เหล็กถาวรสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กของ SPH

วิธีที่เร็วที่สุดในการประมาณการค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียน SPH ที่จุดอิมตัว อาจจะใช้การประมาณค่าสนามแม่เหล็กถาวร ในการประมาณค่านี้หัวเขียน SPH จะนำเสนอสนามแม่เหล็กบนแกนตั้งฉากยาวอนันต์กับสนามแม่เหล็กบนแกนครอสแทร็ค (Pole Width: PW) และคาน์แทร็ค (Pole Thickness: PT) ที่มีแมกนีไทเซชันอิมตัวสอดคล้องตามแนวแกนตั้งฉาก

ในสถานการณ์นี้องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณได้โดยตรง โดยยกตัวอย่างเช่น การจำลองประจุแม่เหล็ก [47] ดังนั้นสำหรับสนามแม่เหล็กที่จุดอิมิตตัวของหัวเขียน SPH ในกรณีที่ไม่มีชั้นแม่เหล็กอ่อนหรือชั้น SUL สามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (2.42) ถึง (2.44) เนื่องจากปัญหาดังกล่าวระบบมีความสมมาตรมันจึงเพียงพอต่อการคำนวณสนามแม่เหล็กใน 1 พิกัดฉาก  $x>0$  และ  $y>0$  [34]



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบพิกัดนำมาใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็ก  
ที่มา: S. Khizroev and D. Litvinov. "Perpendicular magnetic recording: Writing process." *J. App. Phy.* 95, 9 (2004): 4521-4537.

$$H_x = \frac{M_s}{2} \left\{ \ln \frac{\left[ y + \frac{b}{2} + \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right] \left[ y - \frac{b}{2} - \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right]}{\left[ y - \frac{b}{2} + \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right] \left[ y + \frac{b}{2} - \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right]} \right\} \quad (2.42)$$

$$H_y = \frac{M_s}{2} \left\{ \ln \frac{\left[ x + \frac{b}{2} + \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right] \left[ x + \frac{b}{2} + \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right]}{\left[ x - \frac{b}{2} - \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right] \left[ x - \frac{b}{2} + \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2} \right]} \right\} \quad (2.43)$$

$$H_z = \frac{M_s}{4} \left\{ \tan^{-1} \frac{\left( x + \frac{a}{2} \right) \left( y + \frac{b}{2} \right)}{z \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2}} - \tan^{-1} \frac{\left( x - \frac{a}{2} \right) \left( y + \frac{b}{2} \right)}{z \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2}} \right\} \\ + \frac{M_s}{4} \left\{ \tan^{-1} \frac{\left( x - \frac{a}{2} \right) \left( y - \frac{b}{2} \right)}{z \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y + \frac{b}{2} \right)^2 + z^2}} - \tan^{-1} \frac{\left( x + \frac{a}{2} \right) \left( y - \frac{b}{2} \right)}{z \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{b}{2} \right)^2 + z^2}} \right\} \quad (2.44)$$

จุดกำเนิดของพิกัดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของปลายโพลด้าน ABS บนแกนตั้งฉาก Z ทิศทางตั้งลง ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ยิ่งไปกว่านั้นสมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้อธิบายสนามแม่เหล็กของระบบที่มี SUL ซึ่งได้อธิบายแบบจำลองภาพแม่เหล็ก (magnetic image model) ไว้ก่อนหน้านี้ กล่าวอีกนัยหนึ่งเราสามารถนำสมการเดียวกันมาใช้ในการคำนวณสนามแม่เหล็กเนื่องจากการมีอยู่ของภาพหัวเขียน (image head) ในด้านอื่นๆ ของชั้นบันทึก โดยระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวเขียนจริงกับภาพหัวเขียนเท่ากับความหนาของชั้นบันทึกบวกกับระยะห่างระหว่างชั้นบันทึกและ SUL ซึ่งผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้งสองจะมีค่าเท่ากับสนามแม่เหล็กทั้งหมด

## 2.8 คุณสมบัติที่ดีของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง

### 2.8.1 ความเข้มสนามแม่เหล็กสูง (high peak field)

ดังที่ได้กล่าวมาในก่อนหน้านี้การพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่หัวเขียนจะต้องมีการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงพอเพื่อที่จะเขียนข้อมูลบนแผ่นบันทึกที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูง ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแมกนีโทเซชันอิมิตัวของวัสดุหัวเขียน ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่สามารถผลิตได้จะถูกจำกัดโดยแมกนีโทเซชันอิมิตัวที่มีอยู่ของวัสดุหัวเขียน การเพิ่มขึ้นของชั้น SUL ในแผ่นบันทึกเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะช่วยให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากและยังเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กเนื่องจากผลของภาพหัวเขียน โดยทั่วไป SPH รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่กับ SUL มีอัตราผลตอบแทนประมาณ 60% ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิมิตัว  $B_s$  [35] ข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลต่อค่าโคเออร์ซิวิตีของแผ่นบันทึกที่หัวเขียนสามารถบันทึกได้ การปรับปรุงในการออกแบบของหัวบันทึกเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างสนามสูงสุดมากกว่าค่าการจำกัดที่กล่าวข้างต้น

### 2.8.2 สนามแม่เหล็กย้อนกลับหรือสนามแม่เหล็กลบด้านข้างต่ำ (low return pole field or low Side Track Erasure: STE)

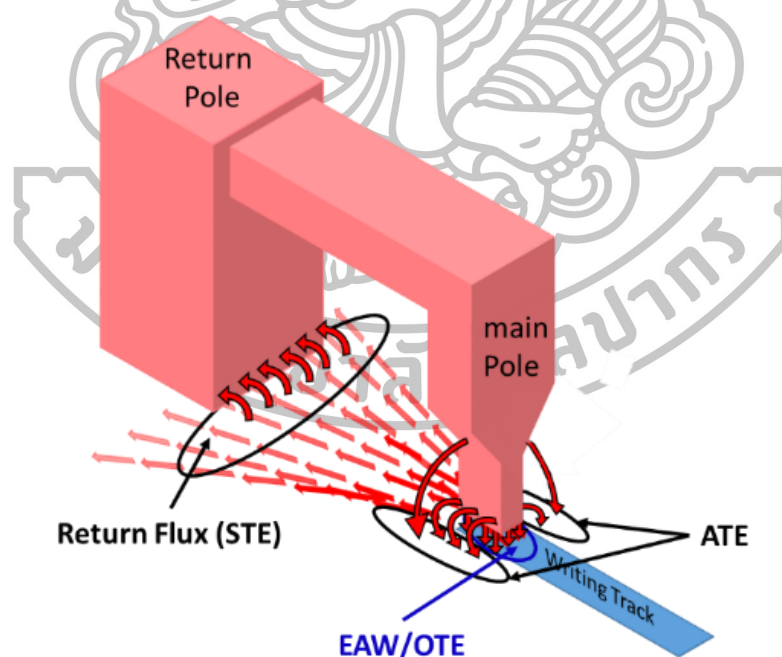
ดังแสดงในรูปที่ 2.14(ข) สำหรับหัวเขียน SPH สนามแม่เหล็กในโพลย้อนกลับ RP ควรจะต่ำเพื่อให้แน่ใจว่ามันไม่ได้เขียนข้อมูลที่ไม่พึงประสงค์ใดๆ ในแผ่นบันทึก การลบข้างข้อมูลเนื่องจากสนามแม่เหล็กย้อนกลับเรียกว่า การลบข้างแทร็คด้านข้าง (Side Track Erasure: STE) ซึ่ง STE สามารถเกิดขึ้นได้หลายแทร็คที่ไม่อยู่ในแทร็คที่จะถูกเขียนข้อมูล กำแพงพลังงานของอุณหภูมิที่ทำให้ข้อมูลแม่เหล็กย้อนกลับมีความไวมากต่อการมีอยู่ของสนามแม่เหล็กเดิม แม้ว่าสนามแม่เหล็กในโพลย้อนกลับอาจจะมีค่าต่ำแต่สนามแม่เหล็กนี้ยังสามารถทำให้เกิด STE ถ้าหัว



เขียนยังอยู่เหนือแทร็คเดิมเป็นเวลานาน ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเลือกให้โพลย้อนกลับมีขนาดใหญ่ [36] หรือการใช้หัวเขียนแบบที่เรียกว่า คัสป์ฟิลด์ซิงเกิลโพล (Cusp Field Single Pole Type: CF-SPT) [37] หัวเขียนแบบ CF-SPT มีปลายโพลหลักหรือปลายโพลเขียนอยู่ระหว่างโพลย้อนกลับสองโพล เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กกระจายตัวไปยังโพลย้อนกลับสองโพลทำให้สนามแม่เหล็กย้อนกลับมีค่าต่ำลง และหัวเขียนแบบ CF-SPT มีขดลวดแบบแพนเค้กประกบทั้งสองข้างของปลายโพลเขียน โดยถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า คัสป์ไคร์ฟ (cusp derives) จากสนามแม่เหล็กคัสป์โพลที่ไหลข้างในและรอบปลายโพลเขียนและเส้นทางย้อนกลับ

### 2.8.3 เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กสูง (high field gradient)

สำหรับความคมชัดของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลบิตในแผ่นบันทึก หัวเขียนควรสร้างสนามแม่เหล็กที่มีเกรเดียนต์สนามแม่เหล็กสูงทั้งด้านครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กสูงเป็นสิ่งสำคัญต่อข้อจำกัดของผลกระทบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น (Non-Linear Transition Shift: NLTS) ตำแหน่งการพราของการเปลี่ยนแปลงที่จุดศูนย์กลาง เป็นต้น



รูปที่ 2.24 แผนผังแสดงกลไกการลบที่แตกต่างกัน

ที่มา: M. S. U. Patwari. "Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads." in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, 2010.

#### 2.8.4 สนามแม่เหล็กออกนอกแทร็คต่ำหรือการลบแทร็คที่อยู่ติดกัน

##### (Adjacent Track Erasure: ATE)

ปัญหานี้เป็นปัญหาที่ทำทายนมากสำหรับการออกแบบหัวเขียนรุ่นใหม่ ในขณะที่มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ อัตราส่วนบิต (กำหนดโดยอัตราส่วนเชิงเส้นของความหนาแน่นบิตกับความหนาแน่นแทร็ค) ก็จะลดลง ดังนั้นความกว้างของแทร็คที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงจะอยู่ในช่วงน้อยกว่าไมครอน ปัจจุบันหัวเขียนบันทึกไม่ได้ต้องการเพียงสร้างสนามแม่เหล็กสูงด้วยการลดขนาดหัวเขียนเท่านั้น แต่ยังต้องให้สนามแม่เหล็กที่ต่ำกับแทร็คที่อยู่ติดกันด้วยเพื่อหลีกเลี่ยงการเขียนด้านที่เรียกว่า การรुकูล้ำ ซึ่งปัญหาการรुकูล้ำเป็นปัญหาที่ชัดเจนเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำในการลบข้อมูลบนแผ่นบันทึก แม้ว่าสนามแม่เหล็กบนแทร็คที่อยู่ติดกันจะมีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กนิวเคลียสของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก แต่สนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูงบนแทร็คที่อยู่ติดกันจะทำให้เกรนของแผ่นบันทึกเกิดความไม่เสถียรทางความร้อนหลังจากที่เขียนหลายครั้งจะทำให้บางส่วนหรือทั้งหมดของข้อมูลถูกลบ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า การลบข้อมูลแทร็คที่อยู่ติดกัน (Adjacent Track Erasure : ATE) [38] หรือการรบกวนแทร็คที่อยู่ติดกัน (Adjacent Track Interference : ATI)

#### 2.8.5 ความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์ (Robustness to Stray Fields)

นี่คือปัญหาที่ได้รับความสนใจมากเมื่อการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งได้รับการพิจารณาอย่างจริงจัง ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าชั้น SUL เป็นประโยชน์ในการเพิ่มสนามแม่เหล็กในการเขียนผ่านภาพหัวเขียน แต่มันมีข้อบกพร่องของตัวเองชั้น SUL เป็นวัสดุที่มีค่าซึมซับแม่เหล็กสูง ดังนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกแม้ว่าจะมีขนาดที่อ่อนมาก (~100 Oe) มีโอกาสง่ายมากที่จะไหลไปยังชั้น SUL ที่มีค่าความต้านทานแม่เหล็กต่ำและจากนั้นมุ่งเน้นไปยังปลายโพลเขียน ซึ่งอาจนำไปสู่การเขียนที่ไม่พึงประสงค์หรือลบข้อมูลก่อนหน้า การจำลองที่จำลองโดย Victora และคณะ [39] แสดงให้เห็นว่าการซึมผ่านของชั้น SUL จะลดลงโดยไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กบันทึก นอกจากนี้ยังมีการออกแบบอื่นๆ เช่น การใช้สารสังเคราะห์เอนไทเฟอร์โรแมกเนติกในชั้น SUL เพื่อลดการก่อดั้วที่ไม่พึงประสงค์ของโดเมนในชั้น SUL

#### 2.8.6 สนามแม่เหล็กคงค้างต่ำ

##### (low remnant head field/ Erase After Write: EAW)

เมื่อขดลวดของหัวเขียนถูกหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า มันต้องใช้เวลาสำหรับหัวเขียนจะคลายแมกนีไทเซชันกลับสู่สภาพคงค้างของหัวเขียน เนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการคลายแมกนีไทเซชันนี้ บางครั้งแมกนีไทเซชันในหัวเขียนอาจจะถูกทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอยู่ใน

สถานะถูกกระตุ้นกึ่งเสถียร (meta-stable state) สนามแม่เหล็กจากโพลเขียนที่สูงพอจะไปลบข้อมูลอย่างสมบูรณ์หรือลบข้อมูลบางส่วนที่เขียนไว้ก่อนหน้า ปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า การลบหลังจากเขียนข้อมูล (Erase After Write : EAW) หรือ ความคงค้างปลายโพล (pole tip remanence) นอกจากนี้ยังเป็นที่ยึดกันในชื่อ การลบข้อมูลบนแทร็คเขียน (On Track Erasure : OTE) เพราะว่าหัวเขียนลบข้อมูลของแทร็คข้อมูลเดิมแม้ว่าหัวเขียนจะถูกปิด ซึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากการลบ ATE ที่เกิดขึ้นบนแทร็คด้านข้างที่อยู่ติดกับแทร็คในขณะที่มันจะถูกเขียน รูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นกลไกการลบที่แตกต่างกันสำหรับหัวเขียนบันทึกแบบตั้งฉาก มีความจำเป็นที่หัวเขียนไม่ก่อให้เกิด EAW ในช่วงอายุของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เมื่อมีเหตุการณ์ EAW เกิดขึ้นส่งผลให้ข้อมูลที่ได้นบันทึกไว้ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เกิดความเสียหายอย่างมาก

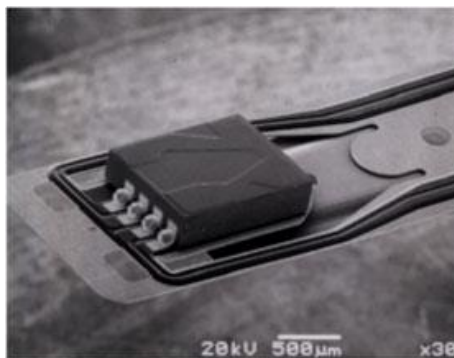
## 2.9 การเตรียมขนาดหัวเขียนด้วยกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า (lapping process)

สไลเดอร์ (slider) หรือหัวอ่านเขียนเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการอ่านและเขียนข้อมูลของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ขั้นตอนการผลิตสไลเดอร์เริ่มต้นคือจะนำเอาแผ่นเวเฟอร์ (wafer) ซึ่งเป็นแผ่นที่บรรจุสไลเดอร์จำนวนมากมาตัดเป็นสไลเดอร์บาร์ผ่านกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าและผ่านกระบวนการอื่นๆ เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติตามที่ผู้ผลิตต้องการ จากนั้นนำสไลเดอร์บาร์มาตัดเพื่อแยกสไลเดอร์แต่ละตัวออกจากกันก่อนจะนำไปประกอบเข้าเป็น HGA การผลิตสไลเดอร์เป็นขั้นตอนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำเพื่อให้สไลเดอร์นั้นอ่านและเขียนข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ

หนึ่งในกระบวนการที่สำคัญของการผลิตคือ กระบวนการขัดเปิดผิวหน้า เนื่องจากจำเป็นจะต้องทำการเปิดหัวอ่านเขียนที่บริเวณปลายของสไลเดอร์ด้านหลัง (back side) เพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับสัญญาณหากการขัดเกิดข้อผิดพลาดก็จะทำให้ค่าทางไฟฟ้าไม่เป็นไปตามเป้าหมายและการขัดเปิดผิวหน้าด้านแอร์เบริงเซอร์เฟส (Air-Bearing Surface: ABS) เพื่อควบคุมให้ได้หัวเขียนที่มีขนาดปลายโพลตามที่ต้องการซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละผลิตภัณฑ์ รูปที่ 2.25 แสดงภาพถ่ายของสไลเดอร์จากเครื่อง SEM

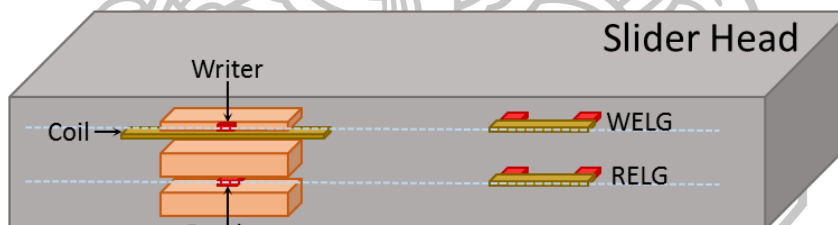
การควบคุมขนาดปลายโพลของหัวเขียนและหัวอ่านนั้น จะใช้เซ็นเซอร์ในการควบคุมขนาด จากรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงที่เป็นแบบอย่างของรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นปิ้งไกด์ (Electrical Lapping Guide: ELG) หรือเซ็นเซอร์ ELG ที่ใช้ในการควบคุมความสูงทรอท (Throat Height: TH) และความสูงเซ็นเซอร์ (Sensor Height: SH) สำหรับหัวแม่เหล็กบันทึกแนวตั้ง เมื่อนำสไลเดอร์บาร์มาขัดในด้าน ABS เซ็นเซอร์ ELG ของหัวเขียนหรือ WELG และเซ็นเซอร์ ELG ของหัวอ่านหรือ RELG ที่ถูกจัดวางให้อยู่ในชั้นเดียวกันหัวเขียนและหัวอ่านตามลำดับ [40] โดย

เซ็นเซอร์ดังกล่าวจะทำให้ค่าความผันแปรของความต้านทาน [41] ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพตามที่ต้องการ ค่าความผันแปรของความต้านทานมีความสัมพันธ์กับความต้านทานของหัวเขียนและหัวอ่านแต่ละตัวในสไลเดอร์นั้น โดยค่าความต้านทานที่ได้จะแปรผันตรงกับขนาดของหัวเขียน



รูปที่ 2.25 ภาพถ่ายของสไลเดอร์จากเครื่อง SEM

ที่มา: Storage: HDD Magnetic Head. August 2016. Available from <http://www.engis.co.jp/en/demolab/storage.html>.

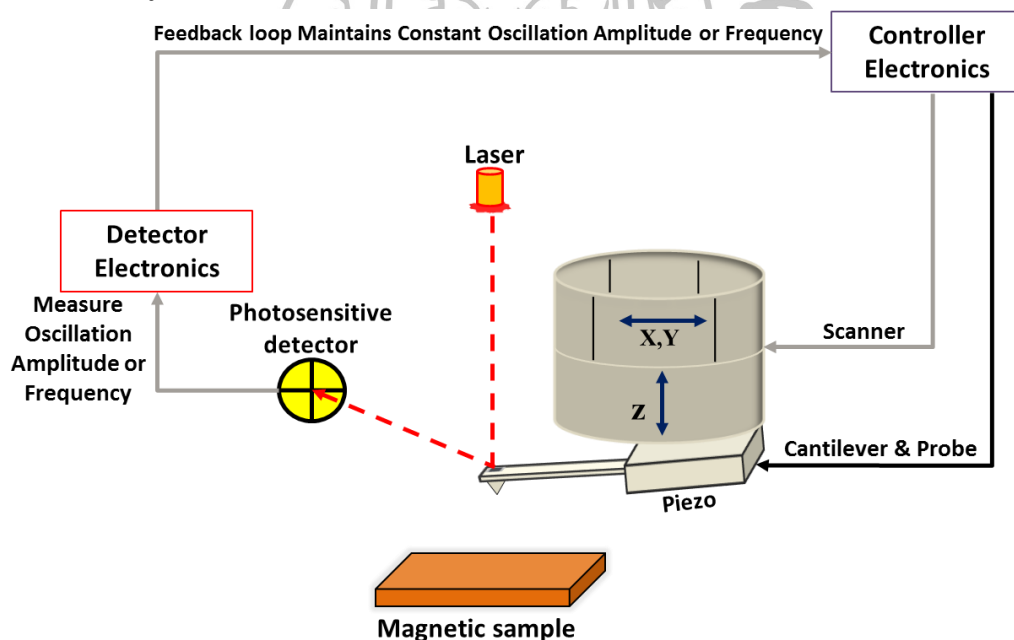


รูปที่ 2.26 แผนภาพตำแหน่งการจัดเรียงของอเล็กทริกคอลแลปปีงไกด์ หรือ ELG

## 2.10 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force Microscope: MFM)

ในปีคริสต์ศักราช 1986 Binnig และคณะ [42] ได้มีการสร้างกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM) เพื่อศึกษาลักษณะภาพพื้นผิวของวัตถุโดยอาศัยการตอบสนองของคาน โดยเมื่อคานสัมผัสบนพื้นผิวของวัตถุจะเกิดแรงที่กระทำต่อกันของคานจะทำให้คานเกิดการโค้งงอด้วยมุมต่างๆ กันตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ลงไปยังคานด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ (Photo Sensitive Detector: PSD)

เพื่อแปลงค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของคานออกมาเพื่อสร้างรูปภาพพื้นผิวของวัตถุ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนากล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมมาเป็นกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force Microscopy: MFM) โดย Martin และ Wickramasinghe ในปี 1987 [43] ซึ่งเป็นโหมดพิเศษของ AFM เพื่อศึกษาการกระจายตัวของแรงแม่เหล็กโดยเพิ่มความสามารถของคานทำให้สามารถตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กที่ออกจากวัตถุแม่เหล็กด้วยการเคลือบสารแม่เหล็กที่ปลายทิว (tip) ที่ติดกับคาน ข้อดีของ MFM คือสามารถใช้ตรวจวัดวัตถุได้ทุกสภาพผิวและสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง โดยความละเอียดของข้อมูลอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งให้ความละเอียดของภาพที่สูงจึงทำให้ MFM ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็ก วัสดุศาสตร์ และไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.27

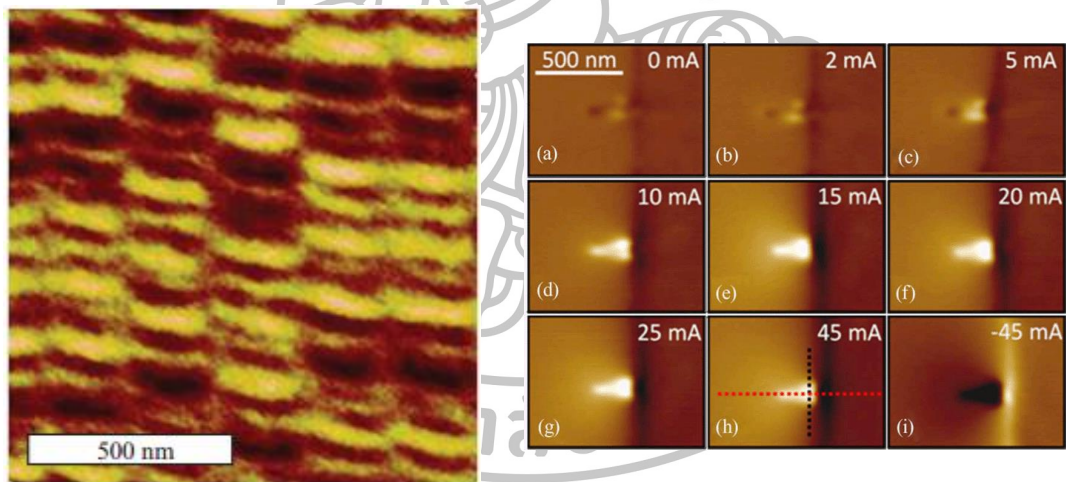


รูปที่ 2.27 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ 5 ส่วน ได้แก่ 1. หัววัดแม่เหล็ก (magnetic probe) 2. ตัวสแกนเพียโซ (piezo scanner) 3. ตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคาน (photosensitive detector) 4. ตัวป้อนกลับระบบคาน (feedback control loop) 5. ระบบการสั่นของคาน (probe oscillator (piezoelectric bimorph))

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษานาโนแม่เหล็กที่ออกมาจากวัสดุ จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการช่วยให้เห็นภาพของบิตแม่เหล็กบนพื้นผิวแผ่นบันทึกที่มีความละเอียดสูง ทิวแม่เหล็กถูกนำมาสแกนใกล้วัสดุและมีอันตรกิริยากับวัสดุแม่เหล็กทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งจะวัดความแตกต่างเฟสระหว่างการสั่นของคานที่ถูกปรับด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนกับสัญญาณที่ใช้กระตุ้นให้คานสั่น MFM กลายเป็นเทคนิคมาตรฐานใน

การกำหนด ความยาวบิต ความกว้างบิต และลักษณะของความผิดปกติของโครงสร้างบิต ในพื้นที่ความลึมหลวงของแผ่นบันทึก รูปที่ 2.28(ก) แสดงให้เห็นภาพที่ได้จาก MFM บนแผ่นบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางแม่เหล็กของบิต จากรูปที่ 2.29(ก) เป็นภาพตัวอย่างของการบันทึกแม่เหล็กแนวอน โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างพื้นที่สว่างและมีคหมายถึงบิตข้อมูลเป็น "1" ในขณะที่พื้นที่มืดหรือสว่างขนาดใหญ่อาจประกอบด้วยบิตข้อมูล "0" หลายตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นบันทึกนี้แสดงให้เห็นถึงความกว้างของบิตประมาณ 200 นาโนเมตรและอัตราส่วนบิตของ 8 : 1

นอกจากนี้ MFM ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของหัวเขียนโดยอาศัยหลักการของการ โค้งงอของคานที่ตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กของหัวเขียน กล่าวคือ เมื่อทิป MFM (MFM tip) สแกนอยู่เหนือบริเวณของปลายโพลเขียนคานจะเกิดการสั่นเนื่องจากถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน ในรูปที่ 2.28(ข) แสดงภาพของรูปทรงเรขาคณิตของปลายหัวเขียนซึ่งวัดโดยใช้ AFM และ MFM ด้วยเทคนิคในการค้นหาความสัมพันธ์กับการกระจายสนามแม่เหล็กของหัวเขียน



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.28 ภาพที่ได้จาก MFM (ก) บนแผ่นบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ข) รูปทรงทางเรขาคณิตของปลายหัวเขียนที่กระแสไฟฟ้าต่างกัน

ที่มา: (ก) R. Brunner. "Properties of Carbon Overcoats and Perfluoro-Polyether Lubricants in Hard Disk Drives." University of California, San Diego, 2009.

(ข) N. Amos, R. Fernandez, R.M. Ikkawi, M. Shachar more authors. "Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices." IEEE Magn. Lett. 1, (2010)

## 2.11 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองสนามแม่เหล็กของหัวเขียน PMR เราสามารถวิเคราะห์โดยการใช้อย่างจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป โดยใช้การจำลองแมกเนตเป็นตัวดำเนินการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้จากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำ สนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นผ่านเงื่อนไขขอบเขตหรือแม่เหล็กถาวรในการจำลองของกระบวนหัวเขียน PMR กระแสไฟฟ้าทั้งหมดในเส้นทางกระแสไฟฟ้าจะสร้างสนามแม่เหล็กภายนอกจากขดลวด แบบจำลองจะให้ผลเฉลยสำหรับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $\vec{B}$  ซึ่งได้จากการคำนวณ  $\vec{H}$

### 2.11.1 ทฤษฎี

ระบบของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณสนามแม่เหล็กมีสองขั้นตอน

1. ระบบจะดำเนินการแก้ปัญหาการนำกระแสไฟฟ้าเพื่อจำลองรูปแบบการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะคำนวณความหนาแน่นกระแส  $\vec{J}$  ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า DC ภายในตัวนำ
2. ระบบจะดำเนินการแก้ปัญหาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กที่ ซึ่งจะคำนวณสนามแม่เหล็กภายนอก  $\vec{H}$  ในรูปแบบของการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิด

### 2.11.2 การแก้ปัญหการนำกระแสไฟฟ้า

ก่อนการจำลองเพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็กจะทำการคำนวณหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำทั้งหมดที่มีกระแสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดโดยการระบุการไหลของกระแสผ่านตัวนำ

### 2.11.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ความหนาแน่นกระแส  $\vec{J}$  คือ สัดส่วนของสนามไฟฟ้าที่มีการจัดตั้งขึ้นเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \nabla \psi \quad (2.45)$$

เมื่อ	$\vec{E}$	คือ สนามไฟฟ้า
	$\sigma$	คือ สภาพนำไฟฟ้าในวัสดุ
	$\psi$	คือ ศักย์ไฟฟ้า

ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ออกจากพื้นที่เล็กๆ ใดๆ จะต้องมีการไหลของประจุภายในพื้นที่นั้น นั่นคือความหนาแน่นประจุ  $\rho(x, y, z)$  ในพื้นที่ใดๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$$\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.46)$$

เนื่องจาก  $-\sigma \nabla \psi = \vec{J}$  ดังนั้นสมการที่แสดงในเทอมของศักย์ไฟฟ้า  $\psi$  จะได้

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (2.47)$$

นี่คือสมการที่ถูกแก้ไขในขั้นตอนแรกของการจำลอง

#### 2.11.4 การแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กคงที่

หลังจากการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านั้น แบบจำลองจะทำการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กสถิตคำนวณสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของแอมแปร์และสมการของแมกเวลล์ในการอธิบายความต่อเนื่องของฟลักซ์ สมการสำหรับกฎดังกล่าวจะเท่ากับ

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.48)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.49)$$

ตามลำดับ เมื่อ  $\vec{H}(x, y)$  คือสนามแม่เหล็กและ  $\vec{J}(x, y)$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและ  $\vec{B}(x, y)$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจะคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (2.50)$$

เมื่อ  $\mu_r$  คือ ความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ และ  $\mu_0$  ความซึมซับแม่เหล็กของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m] ในการคำนวณสมการที่ (2.48) และ (2.49) แบบจำลองจะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความแม่เหล็กภายนอกที่ถูกกำหนดผ่านเงื่อนไขขอบเขต

#### 2.11.5 กระบวนการแก้ปัญหา

เริ่มต้นในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กสถิตจะคำนวณหาการนำกระแส  $\vec{J}$  ในตัวนำทั้งหมด การทำเช่นนี้จะทำให้เกิดการผิดพลาดของการแก้ปัญหาค้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับร้อยละของความผิดพลาดของการนำกระแสและเริ่มการแก้ปัญหาค้นหาอื่นโดยใช้การแบ่งเมช จากนั้นจะคำนวณสนามแม่เหล็ก  $H$  ที่จุดและกึ่งกลางจุดของขอบของแต่ละไฟไนท์เอลิเมนต์เมชที่ใช้การนำกระแสอินพุตที่ ถ้าวัดดูไม่เป็นเชิงเส้นจะคำนวณโดยใช้สนามแม่เหล็กวิธีนิวตัน-ราฟสัน



(Newton-Raphson method) ซึ่งใช้ความลาดชันของเส้นโค้ง B-H ในการคำนวณการแก้ปัญหา ประมาณค่าเชิงเส้นของการแก้ปัญหาไม่เชิงเส้น การประมาณค่านี้ถูกแทนที่ในการแก้ปัญหาไม่เชิงเส้นสำหรับ  $\bar{H}$  สำหรับการเขียนผลเฉลยของสนามแม่เหล็กหลังจากการแก้ปัญหาเสร็จสิ้นและดำเนินการวิเคราะห์ข้อผิดพลาด ในการวิเคราะห์จะทำการปรับโดยการกรองเมชที่มีข้อผิดพลาดมากที่สุดและยังคงแก้จนหยุดเมื่อพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ฟังก์ชันของการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของแบบจำลองในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไป

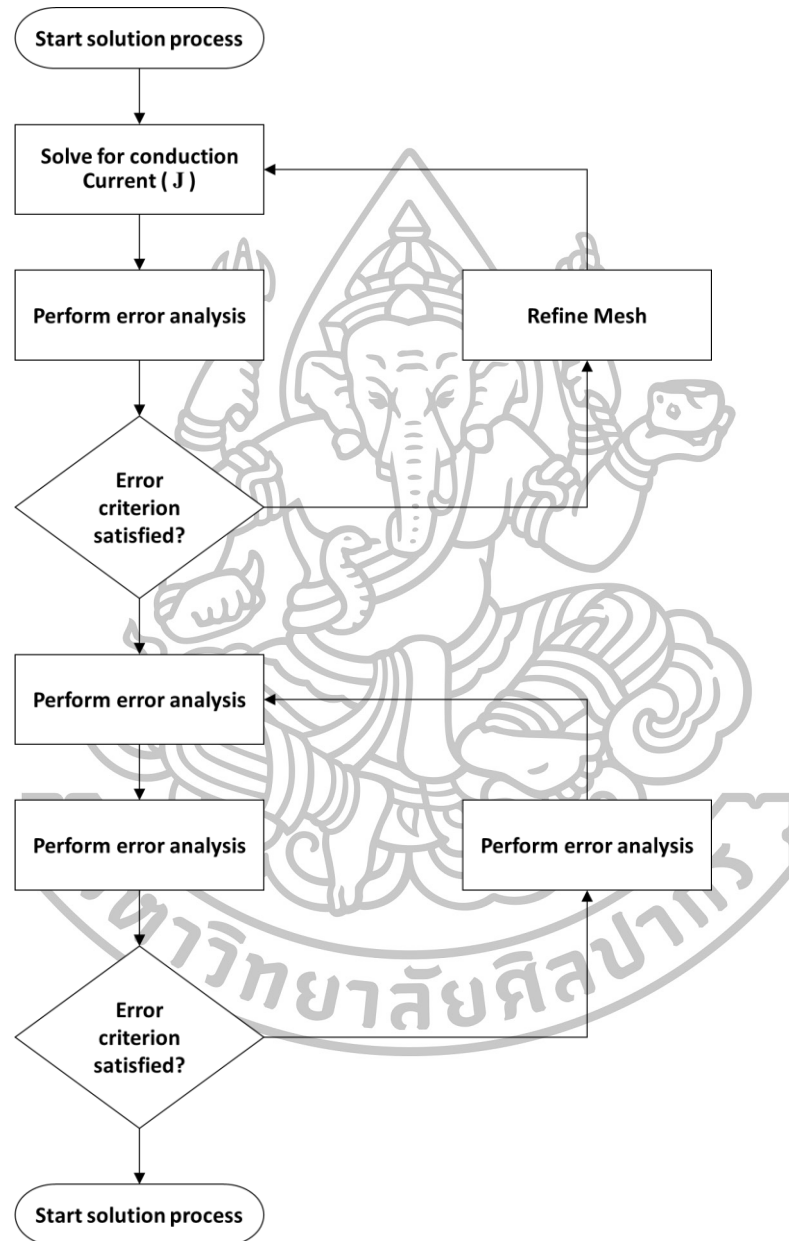
## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง

จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าปัญหาด้านขีดจำกัดขุบเปอร์พารามเมกเนติกสามารถแก้ไขได้ด้วยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (PMR) ต่อมาอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้มีความหนาแน่นต่อพื้นที่มากกว่า  $1 \text{ Tbit/in}^2$  ดังนั้นจึงมีความต้องการหัวเขียน PMR ที่มีประสิทธิภาพในการเขียนบันทึกสูง

ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการจำลองสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายและการพัฒนาหัวเขียนให้มีประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเช่น ในปี 2001 Mochizuki และคณะได้ทำการจำลองหัวเขียนแม่เหล็กแบบซิงเกิล โพลไทป์หรือ SPT เพื่อศึกษาผลกระทบของโครงสร้างหัวเขียน SPT และชั้นแม่เหล็กอ่อนหรือ SUL โดยในการจำลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังนี้ ความหนาของชั้น SUL ความสูงทรอท (throat height) หรือความสูงของปลายโพลและมุมต่างๆ ที่บริเวณปลายโพลหลัก ได้แก่ มุมสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal angle) และมุมเรียว (taper angle) พบว่าเมื่อชั้น SUL มีความหนามากขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนมีค่ามากขึ้นและมีเกรเดียนต์สนามแม่เหล็กสูง เมื่อหัวเขียนมีขนาดของความสูงทรอทมากขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กต่ำลง นอกจากนั้นเมื่อปลายหัวเขียนมีมุมสี่เหลี่ยมคางหมูมากขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กต่ำลง ซึ่งการลดลงของสนามแม่เหล็กเป็นปัญหาอย่างมากเมื่อต้องการบันทึกข้อมูลลงแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่าแอนไอโซโทรปีสูงๆ แต่การมีมุมเรียวส่งผลให้หัวเขียนผลิตสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นสูงกว่าหัวเขียนที่ไม่มีมุมเรียว [44]

ในปี 2005 Yasushi Kanai และคณะได้นำการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (JMAG-Studio) มาวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแบบ SPT โดยทำการจำลองถึงผลกระทบของการมีอยู่ของโพลย้อนกลับด้านหน้า (leading side tapered return yoke) และโพลย้อนกลับด้านหลัง (trailing side tapered return yoke) หรือแบบ CF-SPT ซึ่งเป็นหัวเขียนที่มีโพลย้อนกลับสองด้าน ซึ่งจากการจำลอง

พบว่าหัวเขียนแบบ CF-SPT สร้างสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลสูงสุดมีค่ามากกว่า 20 กิโลเออร์สเตด นอกจากนั้นเมื่อหัวเขียนมีความสูงของปลายโพลลดลงจะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นด้วยเช่นกัน [45]



รูปที่ 2.29 ผังงานกลไกการทำงานในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไป  
ที่มา: K.S. Song. “Resolution of Patterned Magnetic Media.” Massachusetts Institute of Technology, (2000): 48-52.

และในปี 2012 Lisha Wang และคณะได้นำการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์มาศึกษาหัวเขียนที่มีขั้วด้านข้างครึ่งหนึ่งและมีขั้วล้อมรอบ ซึ่งพบว่าหัวเขียนที่มีขั้วด้านข้างครึ่งหนึ่งให้

ปริมาณสนามแม่เหล็กที่สูงและมีความโค้งของแตรีกข้อมูลที่สูงเมื่อเทียบกับหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบที่ให้ปริมาณสนามแม่เหล็กต่ำแต่มีความโค้งของข้อมูลต่ำเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้มีการออกแบบหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยการใช้มุม ซึ่งพบว่าการควบคุมมุมต่างๆ ที่เหมาะสมสามารถชดเชยปริมาณสนามแม่เหล็กที่ต่ำในหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบได้และยังสามารถรักษาความโค้งของขอบแตรีกข้อมูลที่เหมาะสม [46]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลของหัวเขียน PMR โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวเขียน เช่น ลักษณะของขดลวดที่พันหัวเขียน การเพิ่มขึ้นของมุมลีเหลี่ยมคางหมูในขณะที่มีมุมเรียวสมมาตรกันบนล่าง และการเพิ่มขึ้นของขนาดปลายโพลโดยกระบวนการกัด ซึ่งเป็นผลมาจากมุมต่างๆ บริเวณปลายโพล โดยที่ปลายของหัวเขียนจะมีซิลด์ล้อมรอบ สำหรับขั้นตอนของการจำลองในงานวิจัยนี้จะอธิบายไว้ในบทต่อไป



### บทที่ 3

#### การสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจากเพื่อศึกษาคุณสมบัติของหัวเขียนที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งเราจะศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มจากการทดสอบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการจำลองปัญหาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหัวเขียน ซึ่งจะกล่าวถึงโครงสร้างของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของบริเวณปลายโพลหลัก พารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ใช้ในงานวิจัยนี้ การสร้างแบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการอธิบายความหมายจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

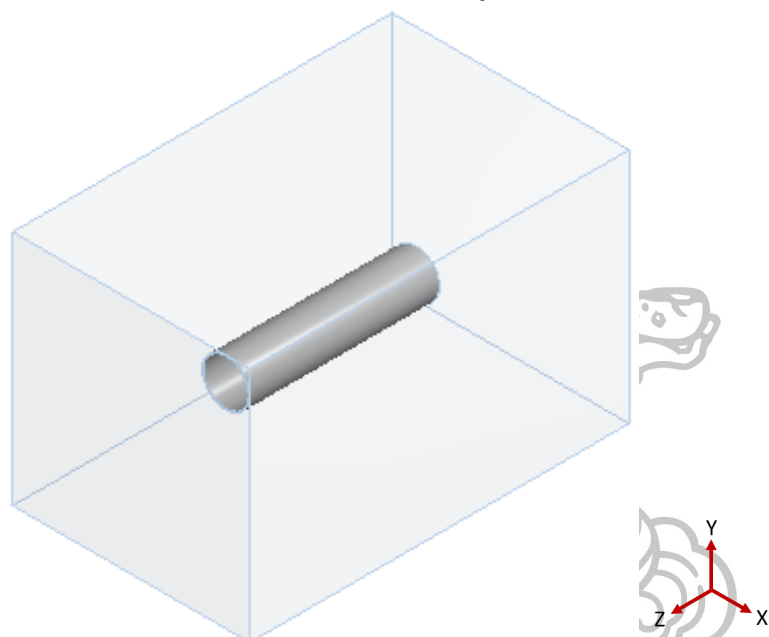
#### 3.1 การทดสอบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับปัญหาที่จะนำมาทดสอบ โปรแกรมนั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งเป็นปัญหาอย่างง่ายสามารถคำนวณหาได้ด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (analytical method) ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กที่ได้จากวิธีวิเคราะห์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องและความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์แบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจากต่อไป รายละเอียดของการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

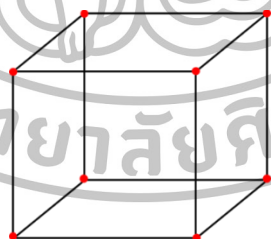
##### 3.1.1 การสร้างแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์

ผู้วิจัยได้สร้างขดลวดโซลินอยด์ โดยกำหนดให้ขดลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 48 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และมีความยาว 400 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำขดลวดได้แก่โลหะผสมทองแดง (copper alloy) ซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) เท่ากับ 1 แบบจำลองจะถูกคลุมด้วยฝิวปิด (enclosure) ซึ่งกำหนดให้ภายในฝิวปิดเป็นอากาศ แต่ละด้านของฝิวปิดจะห่างจากออกจากแบบจำลองเท่ากับ 500 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1

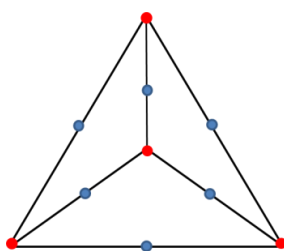
จากนั้นทำการสร้างเมช (mesh) โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูปจะทำการสร้างและกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานของโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมได้สร้างเอลิเมนต์บนขดลวดโซลินอยด์เป็นรูปทรงหกหน้าและเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสำหรับปิดปิดที่คลุมขดลวดโซลินอยด์ โดยแบบจำลองทำการแบ่งเอลิเมนต์ทั้งหมดเป็น 447101 เอลิเมนต์ ลักษณะรูปแบบของการสร้างเมชบนแบบจำลองดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์ที่สร้างจากโปรแกรมสำเร็จรูป

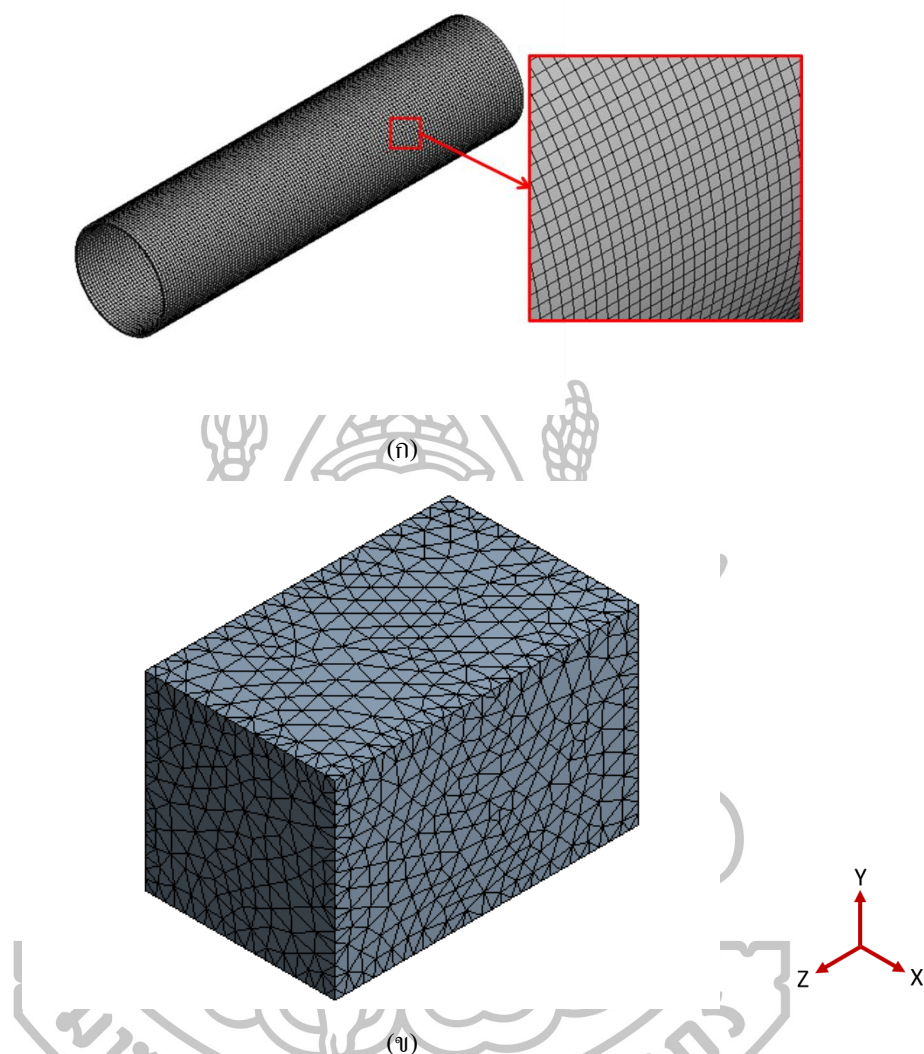


(ก)



(ข)

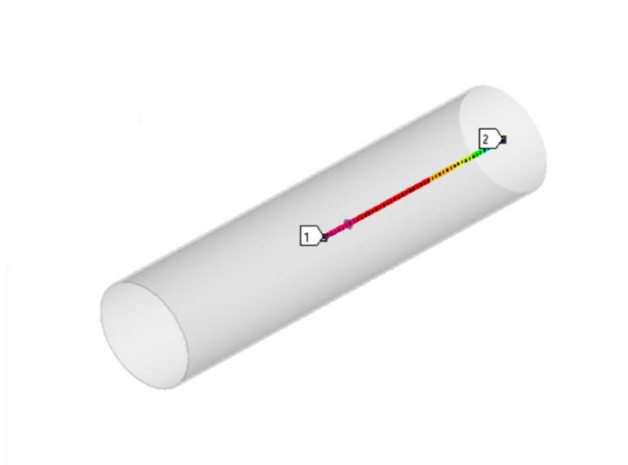
รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปแบบเอลิเมนต์ (ก) ทรงหกหน้า (ข) ทรงสี่หน้า



รูปที่ 3.3 การแบ่งเมชที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง (ก) ขดลวด โซลินอยด์ (ข) ผิวนิรภัย

หลังจากนั้นทำการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์สำเร็จรูป โดยผู้วิจัยจะกำหนดให้ขดลวด โซลินอยด์มีจำนวนรอบของขดลวดเป็น 1000 รอบต่อพื้นที่นำกระแสไฟฟ้า 8 ตารางเซนติเมตร และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเท่ากับ 100 มิลลิแอมแปร์

ในการวิเคราะห์โปรแกรมจะคำนวณหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เราสามารถกำหนดตำแหน่งที่สนใจในการดึงข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ สำหรับการทดลองนี้จะทำการดึงข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นเส้นตรงที่บริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองขดลวด โซลินอยด์ (จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เส้นตรงดังกล่าวถูกกำหนดให้มีการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 202 เอลิเมนต์หรือ 202 ข้อมูล ซึ่งเป็นจำนวนสูงสุดที่สามารถกำหนดในการดึงข้อมูลเป็นเส้นตรงของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ในบทต่อไป



รูปที่ 3.4 ภาพตำแหน่งของการตั้งข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์

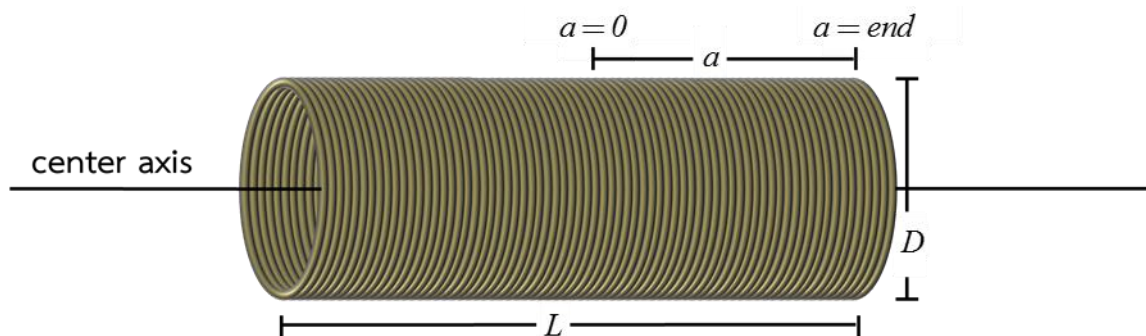
ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของขดลวด โซลินอยด์ พบว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2422.1 แอมแปร์ต่อเมตร ค่าดังกล่าวจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.1.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์

ขดลวดโซลินอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางโซลินอยด์ 48 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร จำนวนรอบของขดลวด 1000 รอบ และกำหนดให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 1 แอมแปร์ ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) [47] ในรูปที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ของขดลวดในระบบสองมิติที่ใช้ในระเบียบวิธีวิเคราะห์และค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์พบว่าที่ตำแหน่ง  $a=0$  มิลลิเมตร จะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 2425.36 แอมแปร์ต่อเมตร

$$\vec{H} = \frac{N\vec{I}}{2L} \left[ \frac{(L+2a)}{(D^2 + (L+2a)^2)^{1/2}} + \frac{(L-2a)}{(D^2 + (L-2a)^2)^{1/2}} \right] \quad (3.1)$$

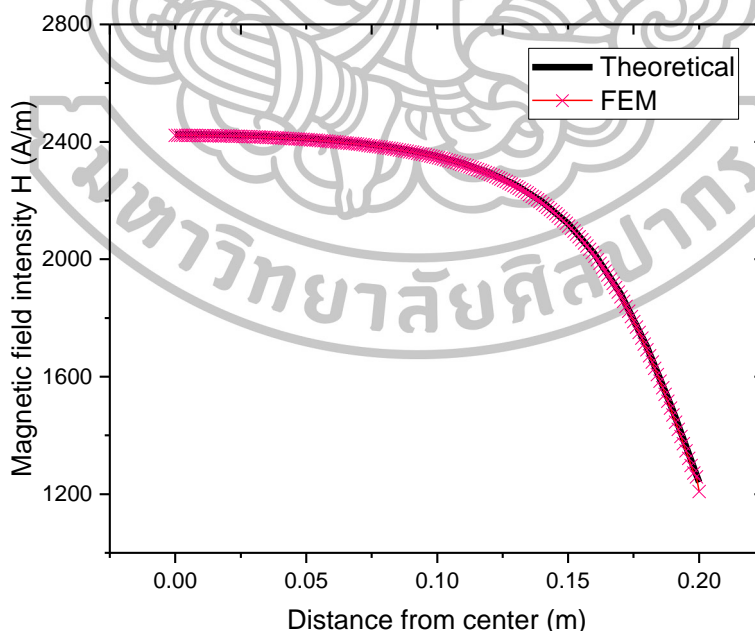
- โดยที่
- $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด
  - $L$  คือ ความยาวของโซลินอยด์(m)
  - $\vec{I}$  คือ กระแสไฟฟ้า(A)
  - $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางโซลินอยด์(m)
  - $a$  คือ ระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง(m)



รูปที่ 3.5 พารามิเตอร์ขนาดโซลินอยด์ในสองมิติ

### 3.1.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์

ในรูปที่ 3.6 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างการโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์ โดยเส้นโค้งที่บิคือเส้นข้อมูลจากผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเส้นโค้งประคือเส้นข้อมูลที่ได้จากผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จาก โปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์



จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 เราจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับพบว่าผลที่ได้จากการโปรแกรมคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์หาค่าสนามแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกันมาก ดังที่ได้แสดงผลเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะกล่าวได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมนั้นให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือได้

เพื่อความแน่ชัดต่อไป เราจะนำค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงสุด (ที่ตำแหน่ง  $\alpha = 0$ ) จากทั้งสองวิธีมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการหาผลลัพธ์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กหลักด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าความผิดพลาด} &= \left| \frac{\text{ค่าที่ได้จากการคำนวณ} - \text{ค่าที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์}}{\text{ค่าที่ได้จากการคำนวณ}} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{2425.36 - 2422.10}{2425.36} \right| \times 100\% \\ &= 0.13\% \end{aligned}$$

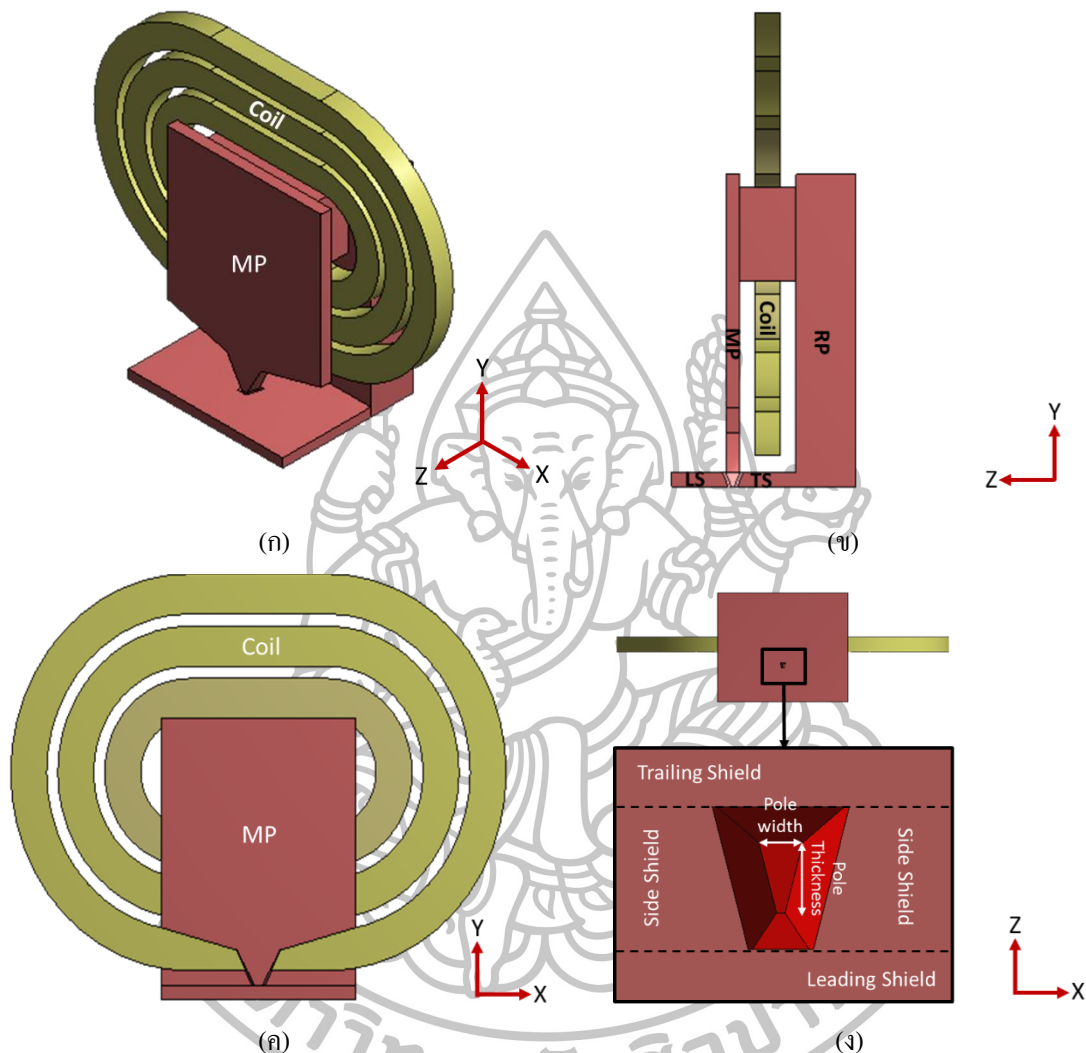
จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่า 0.13% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยมาก ถ้าต้องการให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลง เราสามารถลดขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กลงเพื่อเพิ่มความละเอียดของผลลัพธ์ให้มากขึ้น เมื่อผู้วิจัยได้ทดลองทำการลดขนาดของเอลิเมนต์ให้บริเวณกึ่งกลางภายในขดลวดมีขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ 20 มิลลิเมตร มีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเป็น 772625 เอลิเมนต์ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเท่ากับ 0.048 ถึงแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าน้อยลง แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่มีการแบ่งเอลิเมนต์เป็น 447101 เอลิเมนต์

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าต่างๆ ในแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์

model	Element size (mm)	Element	Time (min)	H(A/m)	Error (%)
Model 1	10	985300	11.23	2424.6	0.031
Model 2	20	772625	09.00	2424.2	0.048
Model 3	30	752405	08.51	2423.7	0.068
Model 4	Default	477101	04.00	2422.1	0.134

ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์ให้ใหญ่ขึ้นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนก็มีค่ามากขึ้น และระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองสั้นลง ดังแสดงในตาราง 3.1 ดังนั้นในการจำลองหัวข้อข้อมูล

แม่เหล็กเราจะเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับข้อจำกัดของเวลาและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์สำหรับการจำลอง

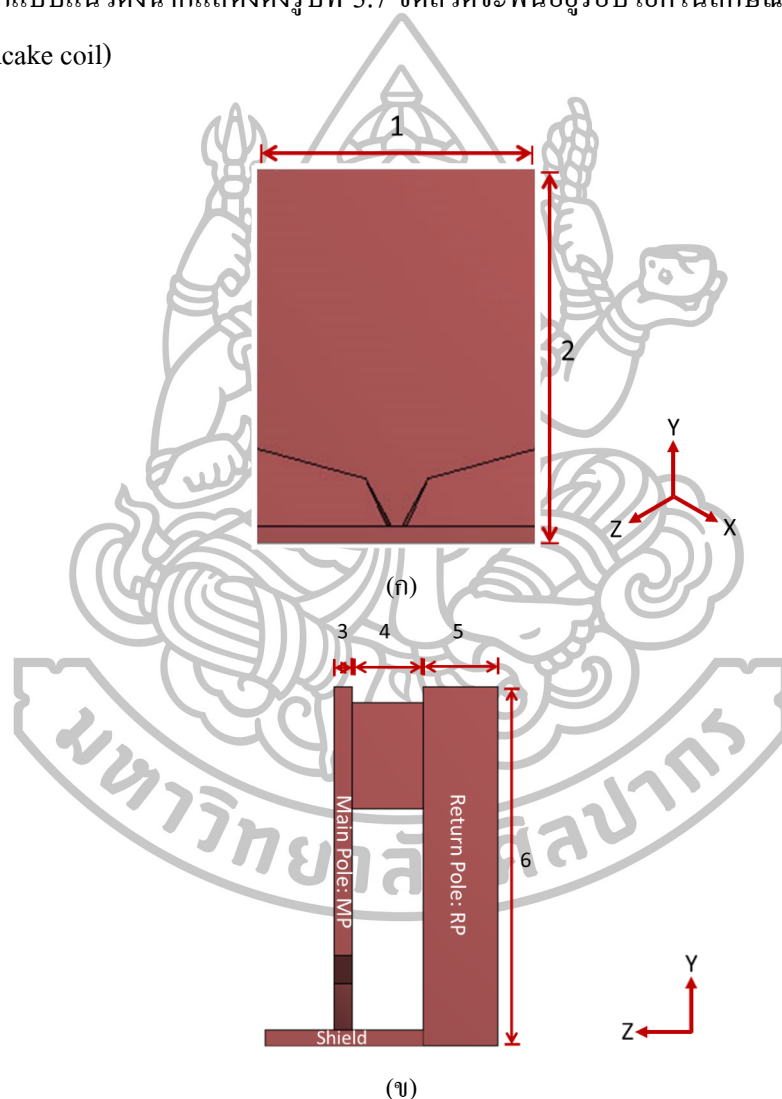


รูปที่ 3.7 โครงสร้างแบบจำลองสามมิติของหัวเขียนในมุมมอง (ก) สามมิติ (isometric:ISO) (ข) ครอสเซกชัน (x-section) หรือมุมมองผ่ากลางหัวเขียนในแนวคว้านแทร์ค (ค) ด้านหน้า (front) และ (ง) ด้านล่าง (bottom) หรือมุมมอง ABS

### 3.2 โครงสร้างของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลอง

โครงสร้างทั่วไปของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีส่วนประกอบพื้นฐาน ได้แก่ โยค (yoke) หรือ โพลเขียน (write pole) และขดลวด (coil) แสดงดังรูปที่ 3.7 โพลเขียนทำมาจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน ที่ปลายด้านหนึ่งของโพลเขียนถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กมากเพื่อเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล

เรียกว่า โพลหลัก (Main Pole: MP) โดยมีความกว้างอยู่ในระดับนาโนเมตร ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเรียกว่า โพลย้อนกลับ (Return Pole: RP) จะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโพลหลักมาก เพื่อลดปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กให้มีขนาดน้อยจนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีโทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ไหลภายในโยคเนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด โครงสร้างแบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจากแสดงดังรูปที่ 3.7 ขดลวดจะพันอยู่รอบโยคในลักษณะที่เรียกว่าแบบแพนเค้ก (pancake coil)



รูปที่ 3.8 แท่งแม่เหล็กของหัวเขียนบันทึกข้อมูลในมุมมอง (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง (side view)

แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดความกว้าง (head width) ความยาว (head length) และความหนา (head thickness) เท่ากับ 7000 นาโนเมตร  $\times$  9120 นาโนเมตร  $\times$  4150 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยให้แกน Z เป็นทิศทางตามแนวดาวน์แทร็ค (down track) แกน X เป็นทิศทางตามแนวครอสแทร็ค (cross track) และแกน Y อยู่ในแนวตั้ง

ซึ่งตั้งฉากกับด้านแอร์เบริงเซอร์เฟส (Air-Bearing Surface: ABS) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 โดยหมายเลข 1 ถึง 6 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

No.	Parameters	size
1	Head width (nm)	7000
2	Head length (nm)	9120
3	Main pole thickness (nm)	450
4	Return pole top thickness (nm)	1800
5	Return pole thickness (nm)	1900
6	Return pole length (nm)	9120
7	Chisel angle (degree)	20
8	First flare angle (degree)	25
9	Second flare angle (degree)	75
10	Pole thickness (nm)	100
11	Pole width (nm)	60
12	Throat height (nm)	400
13	Trapezoid angle (degree)	15
14	LS bevel angle (degree)	55
15	LP bevel angle (degree)	45
16	TP bevel angle (degree)	45
17	TS bevel angle (degree)	55

จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายโพลหลัก ซึ่งขนาดของปลายโพลหลักนั้นส่งผลอย่างมากต่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ดังนั้นเราจึงสนใจการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ บริเวณปลายหัวเขียนเท่านั้น ในรูปที่ 3.9 แสดงหมายเลขแทนพารามิเตอร์ที่บริเวณปลายโพลหลัก และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

และในส่วนต่อไปจะเป็นการสร้างแบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหัวเขียนบันทึกข้อมูลต่อสนามแม่เหล็กที่ผลิตจากโพลหลัก

### 3.3 การสร้างแบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์

#### 3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์

แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งผลิตจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน โดยขดลวดที่พันรอบหัวเขียนมีจำนวนรอบเท่ากับ 3 รอบต่อพื้นที่นำกระแสไฟฟ้า  $7.58 \times 10^{-13}$  ตารางเมตร และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเท่ากับ 30 มิลลิแอมแปร์ ขดลวดจะผลิตจากโลหะผสมทองแดง (copper alloy) มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) เท่ากับ 1 ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยสร้างผิวปิด (enclosure) คลุมแบบจำลองหัวเขียนไว้ มีระยะจากขอบแบบจำลองกับขอบของผิวปิดเป็น 2500 นาโนเมตร ในทุกด้านเท่าๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งภายในผิวปิดจะกำหนดให้เป็นอากาศ การกระจายของสนามแม่เหล็กที่ทำการคำนวณจะมีขอบเขตอยู่ในบริเวณผิวปิดนี้เท่านั้น และภายนอกผิวปิดจะไม่มี การกระจายของสนามแม่เหล็ก

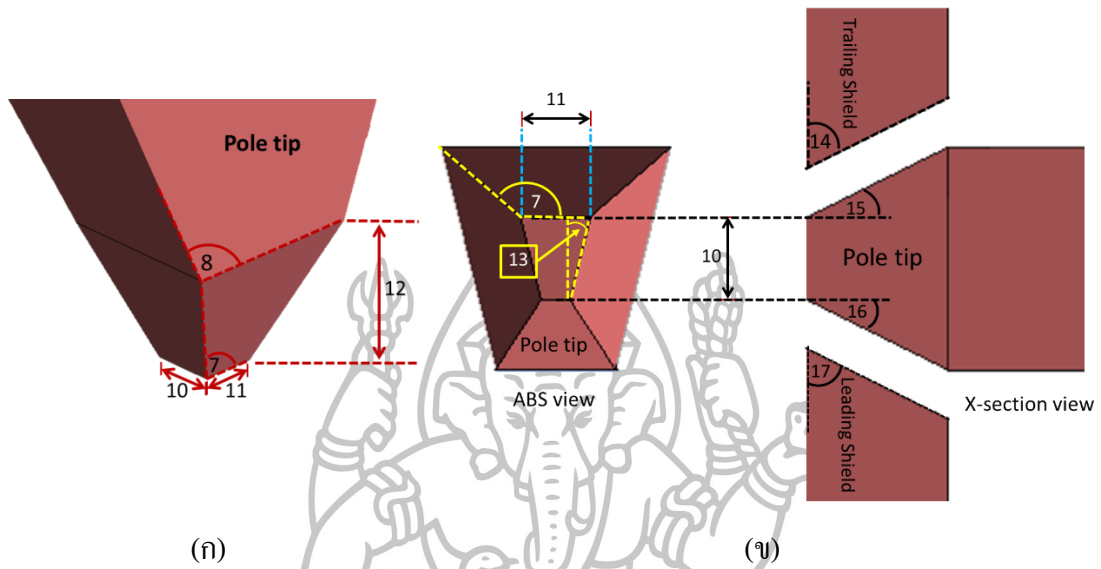
#### 3.3.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า หัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทรปิก (isotropic) และในแต่ละส่วนของหัวเขียนจะผลิตจากสารประกอบแม่เหล็กแบบอ่อนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

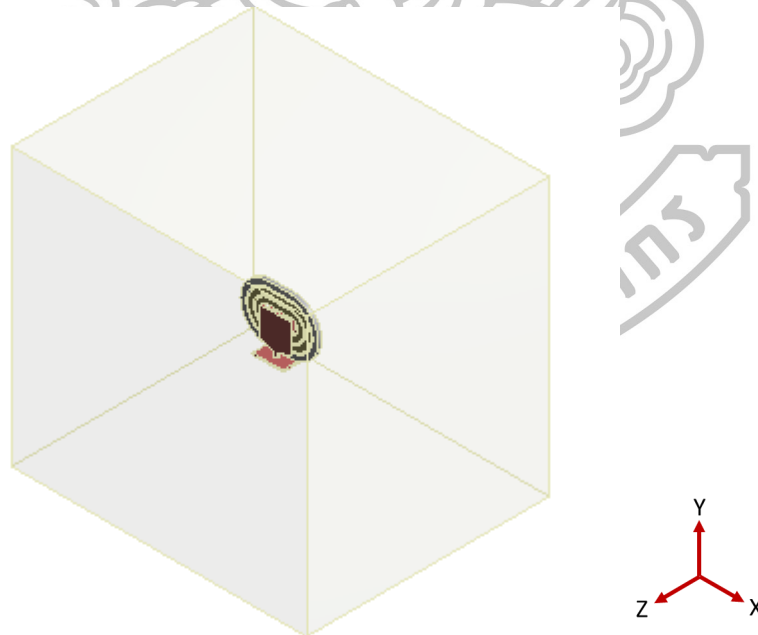
ตารางที่ 3.3 ค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์

Part	Material [48]	Magnetic saturation (T)
Main pole	$\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$	2.4
Return pole	$\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$	1.6
Leading shield	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$	1
Trailing shield	$\text{Ni}_{12}\text{Fe}_{88}$	2
Side shield	$\text{Ni}_{12}\text{Fe}_{88}$	2

หลังจากที่ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับแบบจำลองแล้ว ในขั้นตอนต่อไปก็ต้องทำการแบ่งแบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแต่ละชั้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ หรือที่เรียกว่า เมช



รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ที่บริเวณปลายโพล



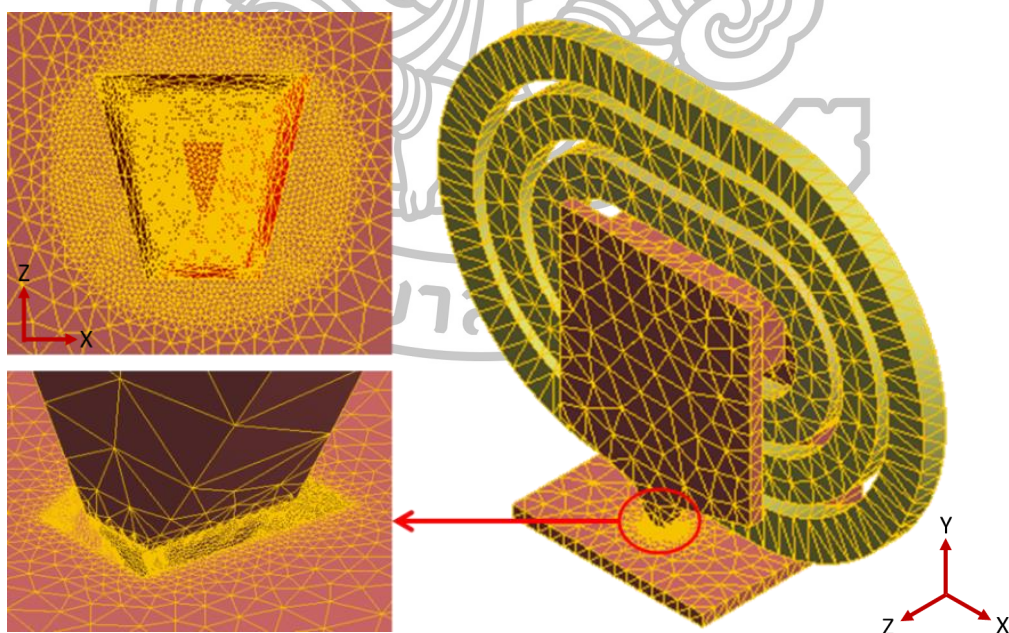
รูปที่ 3.10 แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่อยู่ภายในคิวิปิด

### 3.3.3 การสร้างเอลิเมนต์

ในส่วนของการสร้างเอลิเมนต์นั้น ผู้วิจัยได้สร้างเอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป โดยจะทำการแบ่งแบบจำลองของหัวเขียนแต่ละชั้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ สำหรับงานวิจัยนี้จะ

สนใจศึกษาผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหัวเขียน ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเอลิเมนต์ โดยให้บริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่มีขนาดเล็กที่สุดของแบบจำลอง มีขนาดเอลิเมนต์ที่ความละเอียดเท่ากับ 8 นาโนเมตร ส่วนในบริเวณอื่นๆ ของแบบจำลองเราจะกำหนดให้ขนาดเอลิเมนต์เป็นไปตามค่ามาตรฐานของโปรแกรมเพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูลและได้กำหนดให้รูปทรงของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral element) ดังรูปที่ 3.11 ในทุกๆ ชั้นส่วนของแบบจำลองหัวเขียน รูปที่ 3.12 แสดงการสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองหัวเขียน โดยรูปเล็กซ้ายบนคือรูปของบริเวณปลายโพลหลักในมุมมองด้าน ABS หรือมุมมองในระนาบ ZX

รูปที่ 3.11 รูปทรงของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า



รูปที่ 3.12 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

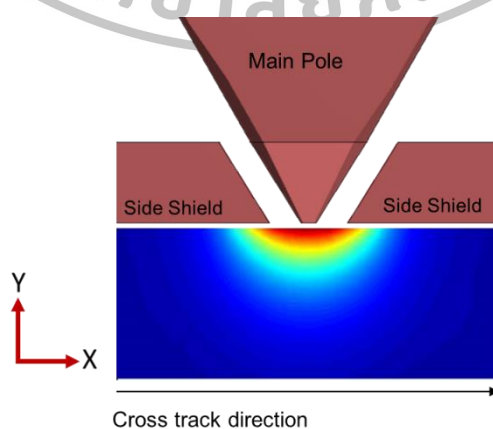
เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองดังกล่าว เข้าทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อวิเคราะห์หาผลเฉลยของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก และนำผลที่ได้มาอภิปรายผลต่อไป

### 3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายโพลหลัก ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลเป็นสนามแม่เหล็กที่อยู่ระหว่าง โพลหลักกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ดังนั้น ข้อมูลที่ผู้วิจัยสนใจและนำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือบริเวณปลายโพลหลักเท่านั้น ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กนั้น เราสามารถกำหนดตำแหน่งที่สนใจได้โดยการดึงข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยรูปแบบข้อมูลที่น่าสนใจมีดังนี้

#### 3.4.1 พิจารณาข้อมูลบนระนาบต่างๆ

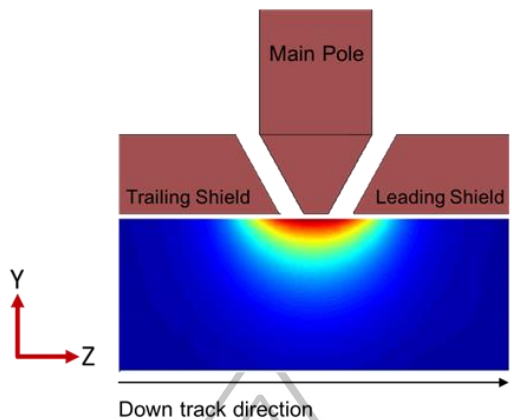
รูปที่ 3.13 แสดงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักในระนาบ XY และ YZ ซึ่งข้อมูลในระนาบดังกล่าวจะใช้ศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนที่ความสูงห่างจากปลายโพลหลักระยะต่างๆ กัน โดยข้อมูลบนระนาบ XY และ YZ เป็นข้อมูลในแนวคอส-แทร์คและควาน์แทร์ค ตามลำดับ และในรูปที่ 3.14 แสดงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักในระนาบ ZX ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่ามาศึกษาและวิเคราะห์ขนาดความกว้างของสนามแม่เหล็กหรือความกว้างของข้อมูลในการบันทึก สีต่างๆที่ปรากฏอยู่บนระนาบแสดงถึงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งบริเวณสีแดงแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงและบริเวณสีน้ำเงินแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำ



(ก)

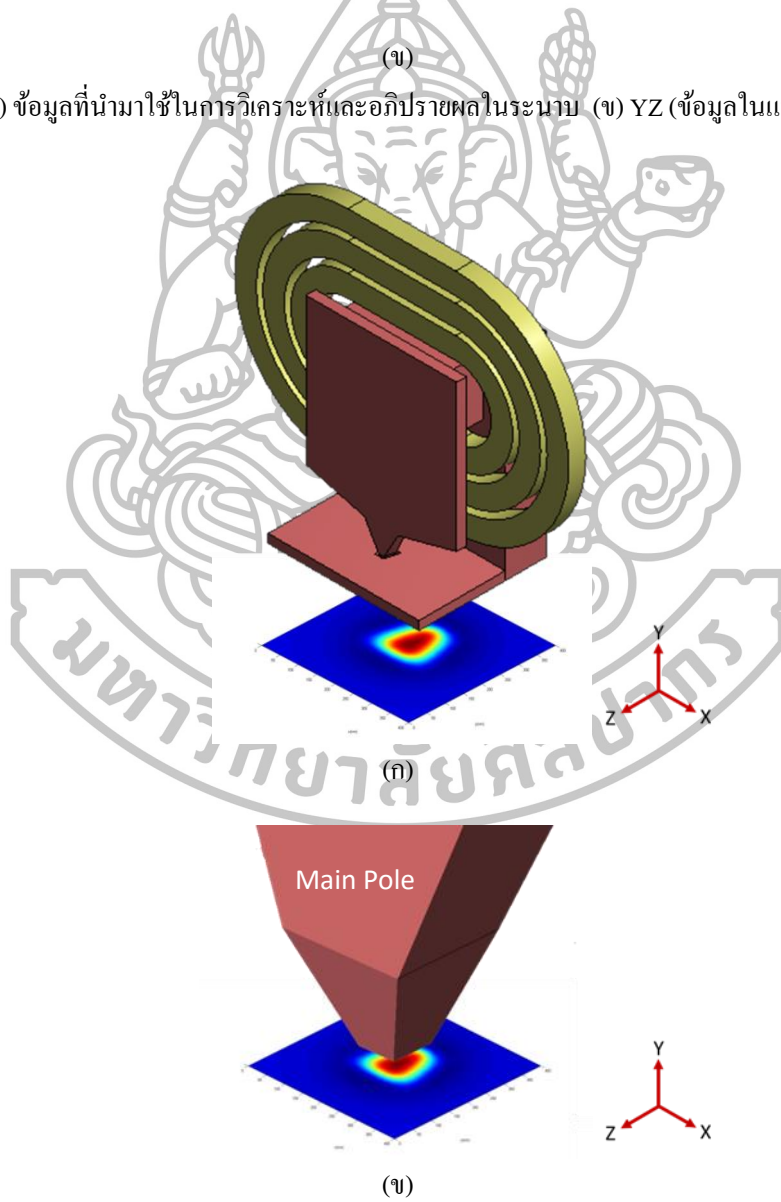
รูปที่ 3.13 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ (ก) XY (ข้อมูลในแนวคอสแทร์ค)





(ก)

รูปที่ 3.13 (ต่อ) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ YZ (ข้อมูลในแนวคาน์แทร์ค)



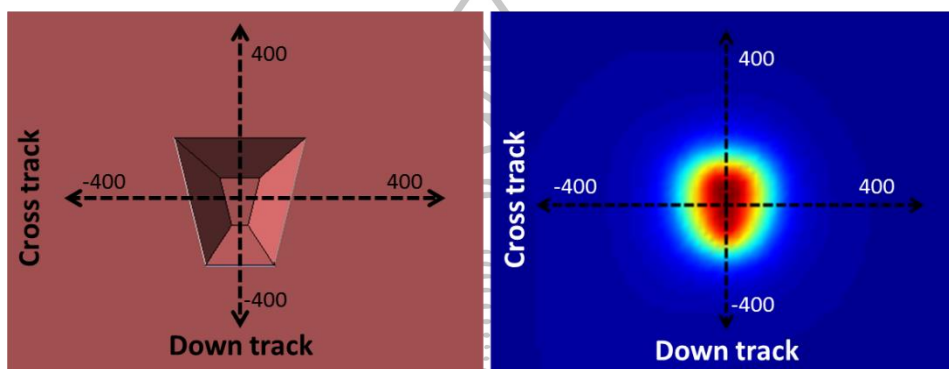
(ก)

(ข)

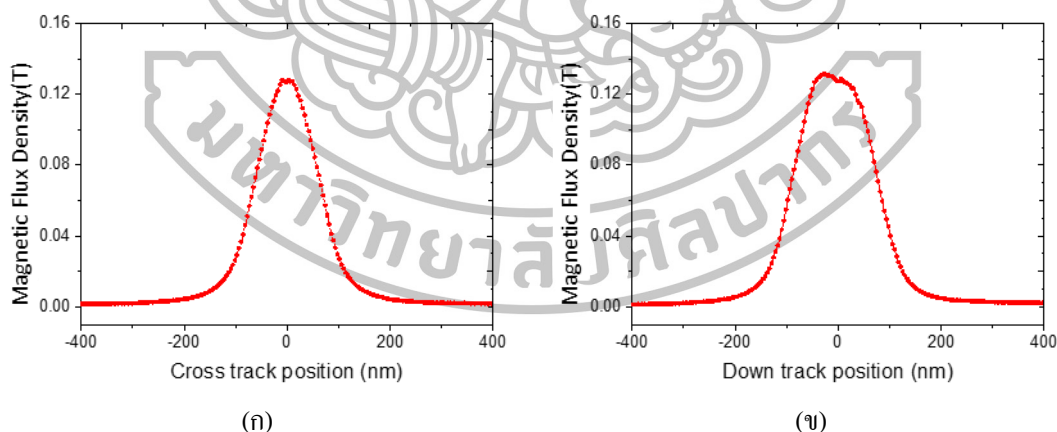
รูปที่ 3.14 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายผลในระนาบ ZX

### 3.4.2 พิจารณาข้อมูลเป็นเส้น

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นเส้นนั้นผู้วิจัยทำการพิจารณาข้อมูลในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค โดยข้อมูลทั้งสองได้มาจากการกำหนดเส้นข้อมูลขึ้นมา ข้อมูลในแนวครอสแทร็คเป็นข้อมูลตั้งแต่ X มีค่าเท่ากับ -400 ถึง 400 นาโนเมตร และในส่วนของข้อมูลในแนวดาวน์แทร็คเป็นข้อมูลที่ได้จากเส้นตรงตั้งแต่ Z เท่ากับ -400 จนถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งตำแหน่งเริ่มต้น (จุด 0,0) อยู่ที่กึ่งกลางของปลายโพลหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนระนาบ ZX ที่ห่างจากโพลหลักเป็นระยะ 5 นาโนเมตร เส้นประแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการดึงข้อมูลตามแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค

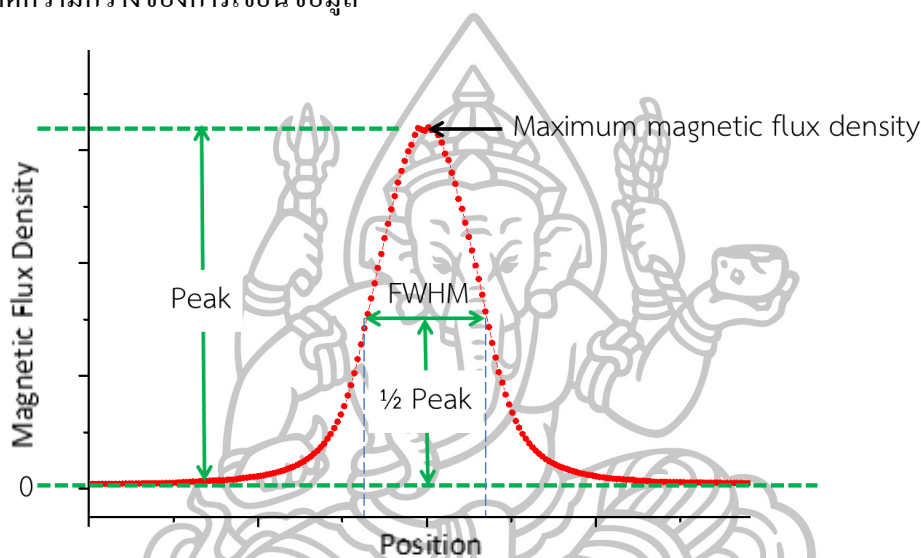


รูปที่ 3.16 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้จากการโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ (ก) แนวครอสแทร็ค และ (ข) แนวดาวน์แทร็ค

ข้อมูลดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่ง (Full Width at Half Maximum: FWHM) ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวครอสแทร็ค

และคาน์แทร็ค การดึงข้อมูลเส้นตรงแนวคอสแทร็คและคาน์แทร็คที่ผ่านบริเวณกึ่งกลางของข้อมูลในระนาบ ZX จะกำหนดให้มีการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็น 202 เอลิเมนต์ หรือ 202 ข้อมูล

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องผลิตสนามแม่เหล็กที่มีเกรเดียนต์สนามแม่เหล็กที่สูงและหัวเขียนจะต้องให้สนามแม่เหล็กสูงสุดที่สูงพอเพื่อเปลี่ยนแปลงเมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยค่าเกรเดียนต์กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดนั้นจะส่งผลกับขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล



รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับตำแหน่งต่างๆ พร้อมแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ความกว้างของการเขียนข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลเราสามารถวิเคราะห์ได้จากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวคอสแทร็คและคาน์แทร็ค ผู้วิจัยทำการคำนวณหาความกว้างของการเขียนข้อมูลแม่เหล็กจากบริเวณช่วงความกว้างของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งจากพีคของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวคอสแทร็คและตามแนวคาน์แทร็ค ค่าที่ได้จากการคำนวณ FWHM จะสัมพันธ์กับความกว้างของการเขียนข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงตำแหน่งของ FWHM และความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด (maximum magnetic flux density:  $B_{max}$ ) พารามิเตอร์ดังกล่าวจะนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

คุณสมบัติที่สำคัญของหัวเขียนที่เหมาะสมได้แก่ มีความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลหลักสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเขียนบันทึก โดยสนามแม่เหล็กที่ออกมาจะต้องมีเกรเดียนต์ตามแนวครอสแตรีกสูงด้วยเพื่อลดขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล ซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดความจุหรือความหนาแน่นข้อมูลต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น [49,50] จากการทบทวนวารสารและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่สามารถควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็กได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด [51-52] ขนาดและจำนวนขดลวดที่ใช้ในหัวเขียน ขนาดของปลายโพลหลัก [53-55] และวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่นำมาใช้ผลิตหัวเขียน [56] เป็นต้น ส่วนปัจจัยในการควบคุมเกรเดียนต์ตามแนวครอสแตรีก ได้แก่ การสร้างซิลด์แม่เหล็กรอบบริเวณปลายโพลเพื่อลดการฟุ้งกระจายของสนามแม่เหล็ก [57-60]

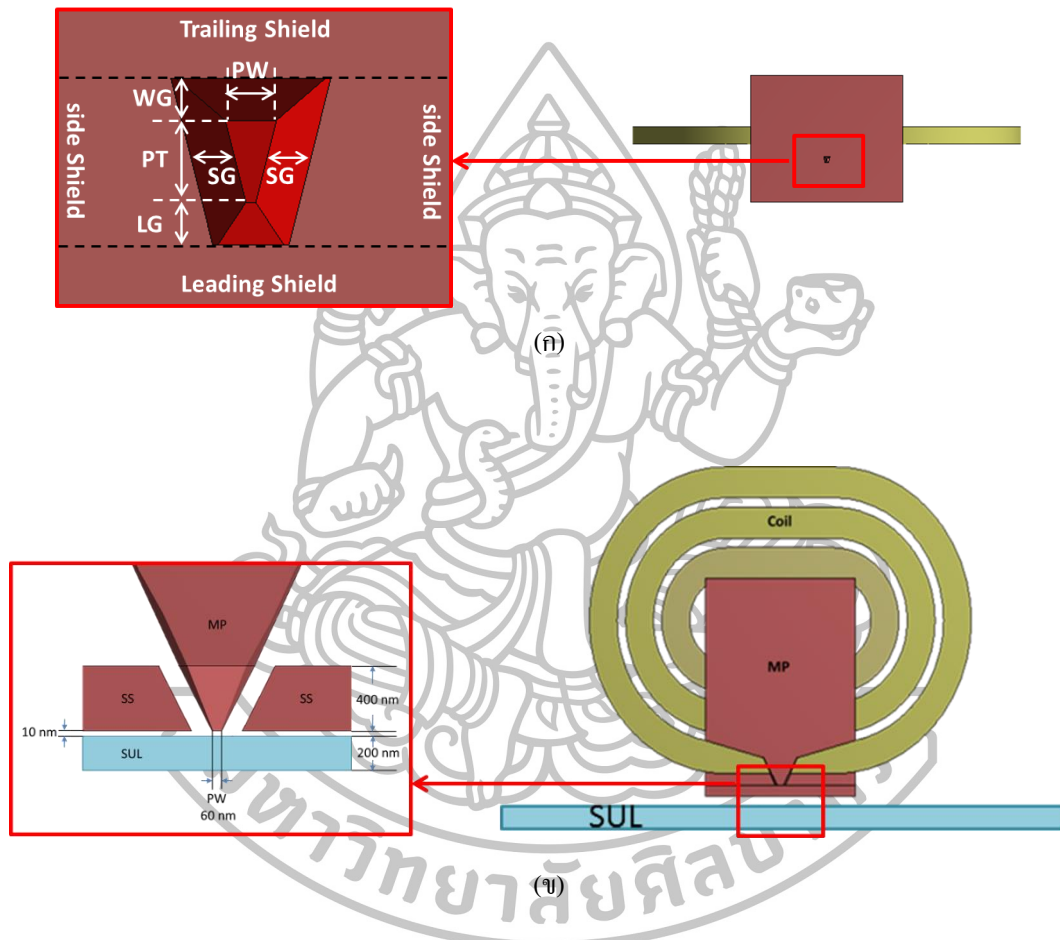
ในงานวิจัยนี้การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กสำหรับใช้บันทึกข้อมูลแม่เหล็กของหัวเขียน โดยอาศัยการพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลัก พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ (1) ลักษณะของขดลวด (2) อิทธิพลจากการมีมุมสี่เหลี่ยมคางหมูของปลายโพลหลัก (trapezoidal angle) และ (3) อิทธิพลของกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าของสไลเดอร์ ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการควบคุมขนาดของปลายโพลของหัวเขียน

#### 4.1 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนที่มีลักษณะขดลวดต่างกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ขดลวดที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำหัวเขียนแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ รูปทรงแบบเกลียว [61-62] และแบบแพนเค้ก [61,63] โดยในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยสนใจผลกระทบของรูปทรงขดลวดแม่เหล็กที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้น

แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้งที่ใช้สำหรับศึกษาสนามแม่เหล็กมีลักษณะโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 4.1(ข) ปลายโพลหลักมีขนาดเท่ากับ  $60 \times 100$

นาโนเมตร มีซิลด์ล้อมรอบหนา 400 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างซิลด์กับปลายโพลหลักด้านหน้า (Leading Gap: LG) ด้านข้าง (Side Gap: SG) และ ด้านหลัง (Trailing Gap: TG) เท่ากับ 10 50 และ 30 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1(ก) โดยผู้วิจัยสร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยชั้นของแม่เหล็กอ่อน (Soft Under Layer: SUL) หนา 200 นาโนเมตร และมีขนาดของสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 2.4 เทสลา ซึ่งมีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับ SUL เท่ากับ 10 นาโนเมตร



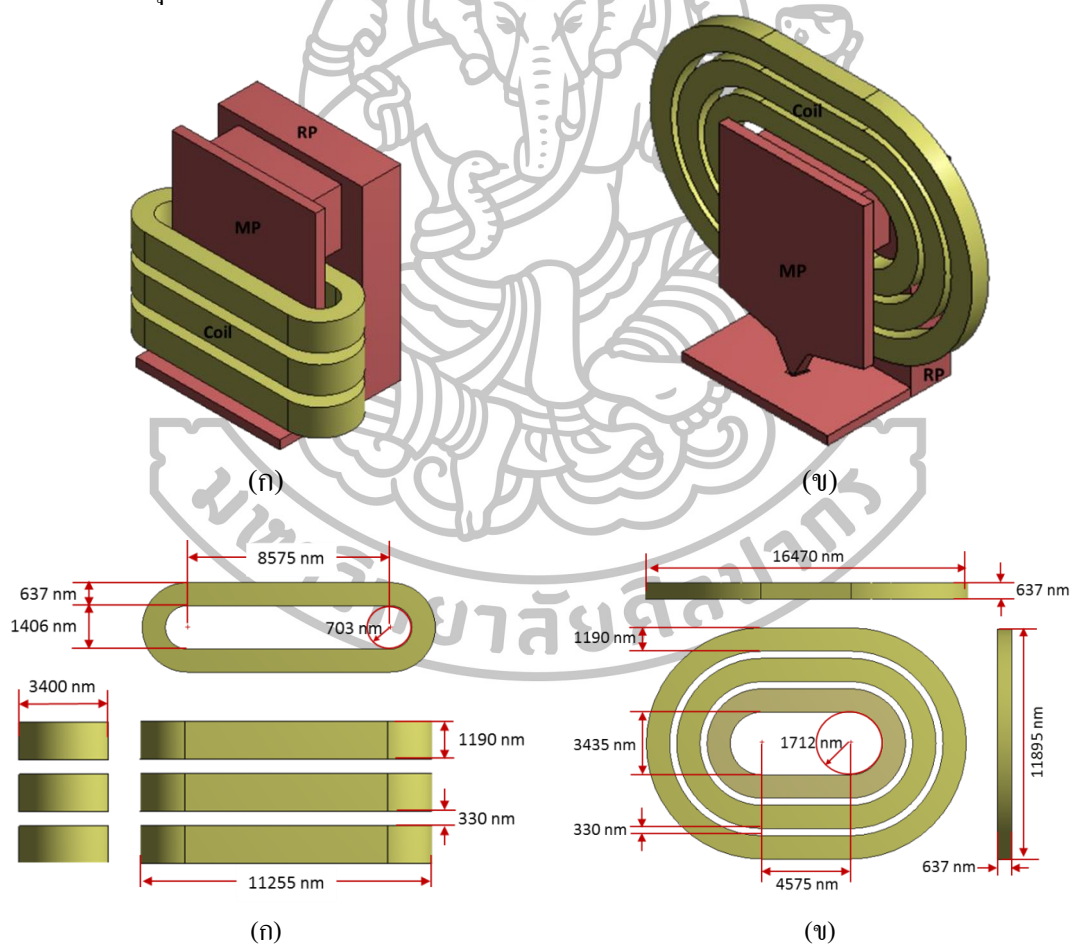
รูปที่ 4.1 ลักษณะ โครงสร้างหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งของขดลวดแบบเพนเค้ก

ตารางที่ 4.1 ค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์

Part	Material [61]	Magnetic saturation (T)
Main pole	$\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$	2.4
Return pole	$\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$	1.6
Leading shield	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$	1
Trailing shield	$\text{Ni}_{12}\text{Fe}_{88}$	2
Side shield	$\text{Ni}_{12}\text{Fe}_{88}$	2

การกำหนดคุณสมบัติของหัวเขียนจะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าหัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทโรปิกและในแต่ละส่วนของหัวเขียนจะผลิตจากสารประกอบแม่เหล็กแบบอ่อนที่แตกต่างกัน (รายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ดูได้จากบทที่ 3) ซึ่งจะมีค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวดังแสดงในตารางที่ 4.1

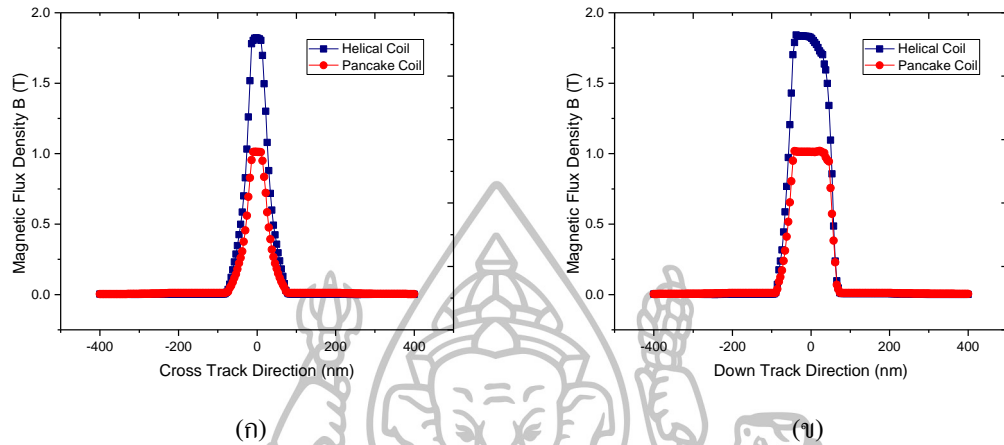
แบบจำลองหัวเขียนที่มีลักษณะขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้กแสดงดังรูปที่ 4.2 คุณสมบัติของขดลวดมีดังนี้ ขดลวดผลิตจากโลหะผสมทองแดง (copper alloy) มีค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) เท่ากับ 1 ขดลวดที่พันรอบหัวเขียนมีจำนวนรอบเท่ากับ 3 รอบต่อพื้นที่นำกระแสไฟฟ้า  $7.58 \times 10^{-13}$  ตารางเมตร กำหนดขอบเขตของการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กให้มีระยะห่างจากขอบแบบจำลองหัวเขียนกับขอบของผิวปิดเป็น 2500 นาโนเมตร ในทุกด้านเท่ากัน



รูปที่ 4.2 ลักษณะหัวเขียน PMR และขนาดของขดลวด (ก) แบบเกลียว (ข) แบบแพนเค้ก

รูปที่ 4.3(ก) และ (ข) แสดงการพลอตข้อมูลในแนวครอสแตร็กและดาวน์แตร็กของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบนระนาบ 5 นาโนเมตร ขนานกับด้าน ABS และได้มีการป้อน

กระแสไฟฟ้าให้กับหัวเขียนที่ 30 มิลลิแอมแปร์ ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนที่มีขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้ก คือ 1.8221 เทสลา และ 1.0135 เทสลา ตามลำดับ



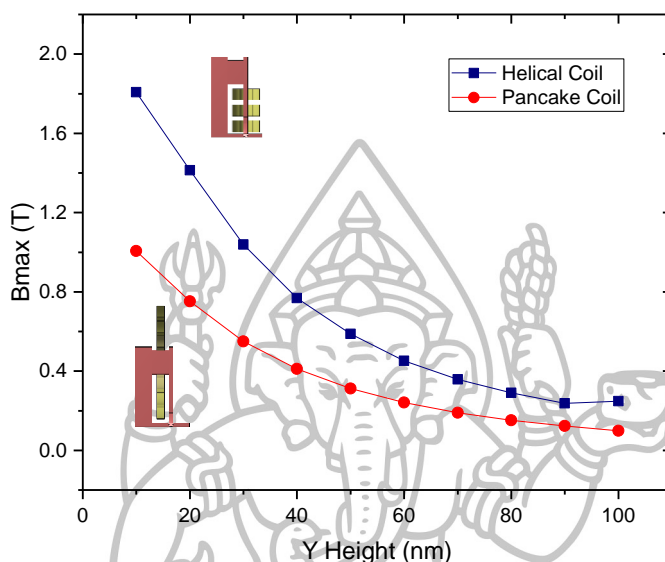
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของแบบจำลองหัวเขียนในแนว (ก) ครอสแทร็ค และ (ข) ดาวน์แทร็ค

ซึ่งจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแบบจำลองหัวเขียนที่มีขดลวดแบบเกลียวให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับขดลวดแบบแพนเค้ก ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดรัศมีเส้นรอบวงของขดลวด ขดลวดแบบเกลียวมีขนาดของรัศมีเส้นรอบวงของขดลวดที่แคบกว่าขดลวดแบบแพนเค้กทำให้ได้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าเป็นไปตามสมการที่ 2.16  $B = \mu_r \mu_0 NI / l$  โดยที่  $l = 2\pi a$  ( $a$  คือรัศมีเส้นรอบวงของขดลวด) จากสมการทางคณิตศาสตร์จะเห็นว่าเมื่อรัศมีของขดลวดมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าน้อยลง

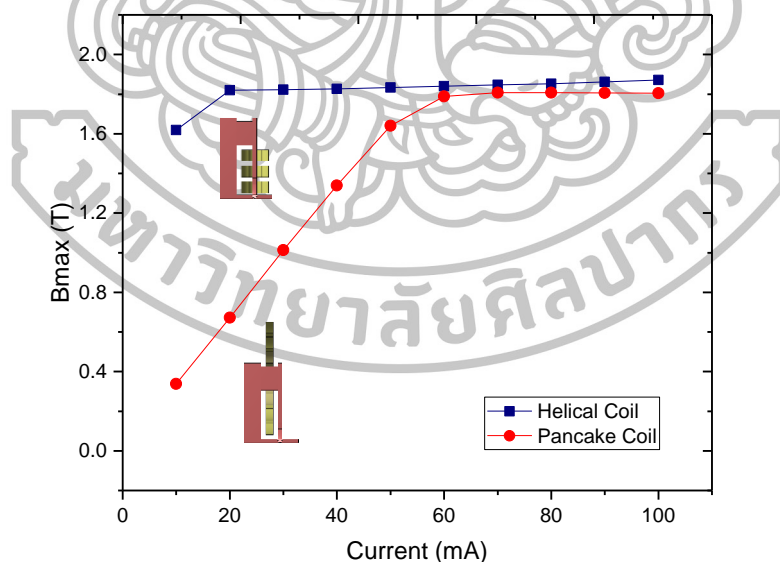
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียน PMR ที่มีขดลวดแบบเกลียวและขดลวดแบบแพนเค้กกับระยะห่างจากปลายโพลด้าน ABS ที่ความสูงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าลดลงแปรผกผันกับกำลังสามของระยะห่างจากโพลด้าน ABS (Y Height: YH) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต ดังสมการที่ 2.1

สำหรับกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดทั้งสองตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์ พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลหลักมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเป็นไปตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) ดังสมการที่ 2.4 และจากกราฟทั้งสองของหัวเขียน PMR จะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้กมีจุดเริ่มอิ่มตัวเมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 และ 60 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำไดโพลโมเมนต์หรือแมกนีไซเซชันในวัสดุของหัวเขียนให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพลของ

หัวเขียน ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแบบเกลียวมีขนาดมากกว่าแบบแพนเค้ก ส่งผลให้การเหนี่ยวนำไดโพล โมเมนต์ให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพล ของหัวเขียนเกิดการอึดตัวที่กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า



รูปที่ 4.4 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Bmax กับระยะห่างจาก ABS ของแบบจำลองหัวเขียน



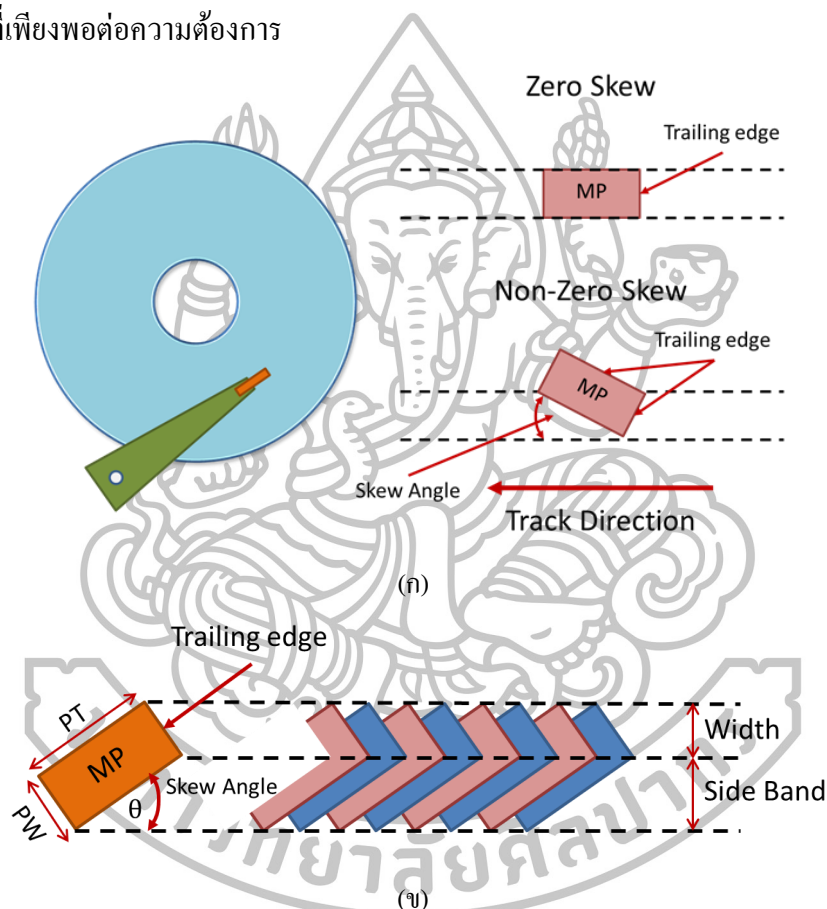
รูปที่ 4.5 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดกับกระแสที่ถูกจ่ายให้กับขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้ก

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงพอจะส่งผลให้การเขียนข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นถ้าเราต้องการความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูง เราจึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมกระแสไฟฟ้าและรัศมีเส้นรอบวงของขดลวด



#### 4.2 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนที่มีปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ลักษณะรูปทรงของปลายโพลหลัก ซึ่งในอดีตหัวเขียนจะมีลักษณะของปลายโพลหลักเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้างของปลายโพลในแนวครอสแตร็คมีขนาดแคบกว่าความกว้างในแนวดาวน์แตร็คประมาณ 2 ถึง 3 เท่า โดยความกว้างของหัวเขียนในแนวดาวน์แตร็คจำเป็นที่จะต้องมีความใหญ่เพื่อที่จะสร้างสนามแม่เหล็กในการเขียนข้อมูลที่เพียงพอต่อความต้องการ

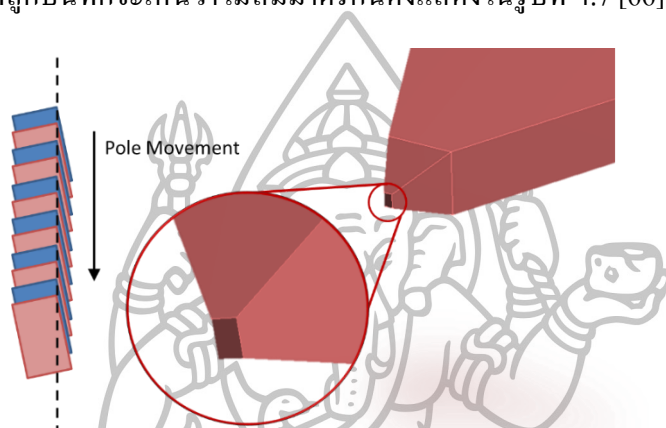


รูปที่ 4.6 โครงสร้างการเขียนข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

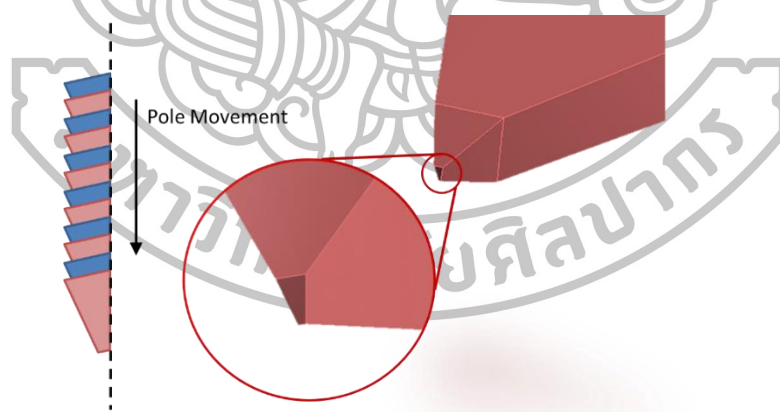
หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะถูกออกแบบมาให้บิดเป็นมุมเอียง (skew angle) กล่าวคือ มุมระหว่างแกนของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กกับเส้นรอบวงของแตร็ค ซึ่งจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 องศา หัวเขียนที่มีปลายโพลหลักรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นเมื่อแตร็คข้อมูลที่ถูกเขียนด้วยหัวเขียนบิดทำมุมเอียงกับเส้นรอบวงของแตร็ค ดังแสดงในรูปที่ 4.6 [65] รูปที่ 4.6(ก) แสดงลักษณะของหัวเขียนที่บิดทำมุมเอียงและไม่ทำมุมเอียง และรูปที่ 4.6(ข) แสดงแตร็ค ข้อมูลของหัวเขียนที่บิดทำมุมเอียงกับเส้นรอบวงของแตร็ค จะเห็นว่าแตร็คข้อมูลจะมีสองส่วน คือ ส่วนของความกว้างของข้อมูล (width) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่น

บันทึกแม่เหล็กและแถบด้านข้าง (side band) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้มีการเขียนลงไปบนแผ่นบันทึก สนามแม่เหล็กที่เกินมาในส่วนนี้จะไปรบกวนข้อมูลในแทร็คข้อมูลข้างเคียงได้

พิจารณาหัวเขียนที่มีปลายโพลหลักรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อแกนของหัวเขียนทำการบันทึกข้อมูล โดยที่ไม่เอียง การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของโพลเท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อโพลหลักทำมุมเอียงสัมพันธ์กับเส้นรอบวงของแทร็ค ขอบทางด้านซ้ายมือและขวามือของแทร็คที่ถูกบันทึกจะเห็นว่าไม่สมมาตรกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 [66]



รูปที่ 4.7 ลักษณะแทร็คข้อมูลของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีลักษณะปลายโพลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยแกนหัวเขียนทำมุมเอียงสัมพันธ์กับเส้นรอบวงของแทร็ค



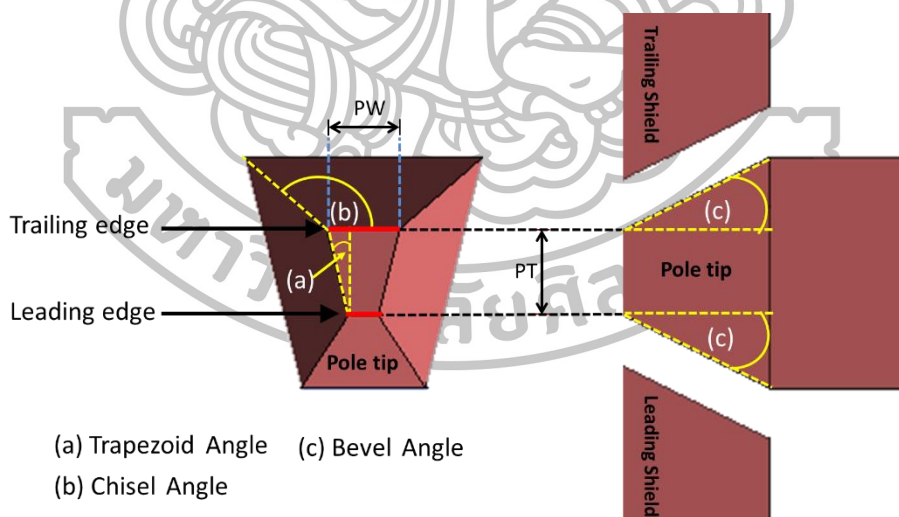
รูปที่ 4.8 ลักษณะแทร็คข้อมูลของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีลักษณะปลายโพลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู โดยแกนหัวเขียนทำมุมเอียงสัมพันธ์กับเส้นรอบวงของแทร็ค

ขอบทางด้านซ้ายมือของแทร็คข้อมูลเมื่อถูกเขียนทับกันต่อไปเรื่อยๆ จะไม่เกิดปัญหา แต่ถ้าพิจารณาขอบด้านขวามือของแทร็คพบว่าบิตจะไม่ถูกเขียนทับ ข้อมูลหรือบิตที่ถูกบันทึกลงแผ่นบันทึกข้อมูลจะมีลักษณะรูปทรงเหมือนกับปลายโพลหลัก การบันทึกข้อมูลที่ได้จากปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะทำให้เกิดความไม่สมมาตรของแทร็คขึ้นส่งผลให้ยากต่อการอ่านข้อมูล

หนึ่งในวิธีของการแก้ปัญหาความไม่สมมาตรของแตรีก คือ ออกแบบปลายโพลหลักให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 4.8 โดยในการออกแบบมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid Angle: TA) ของปลายโพลหลักจะต้องสัมพันธ์กับช่วงของมุมเอียงโดยเฉพาะ

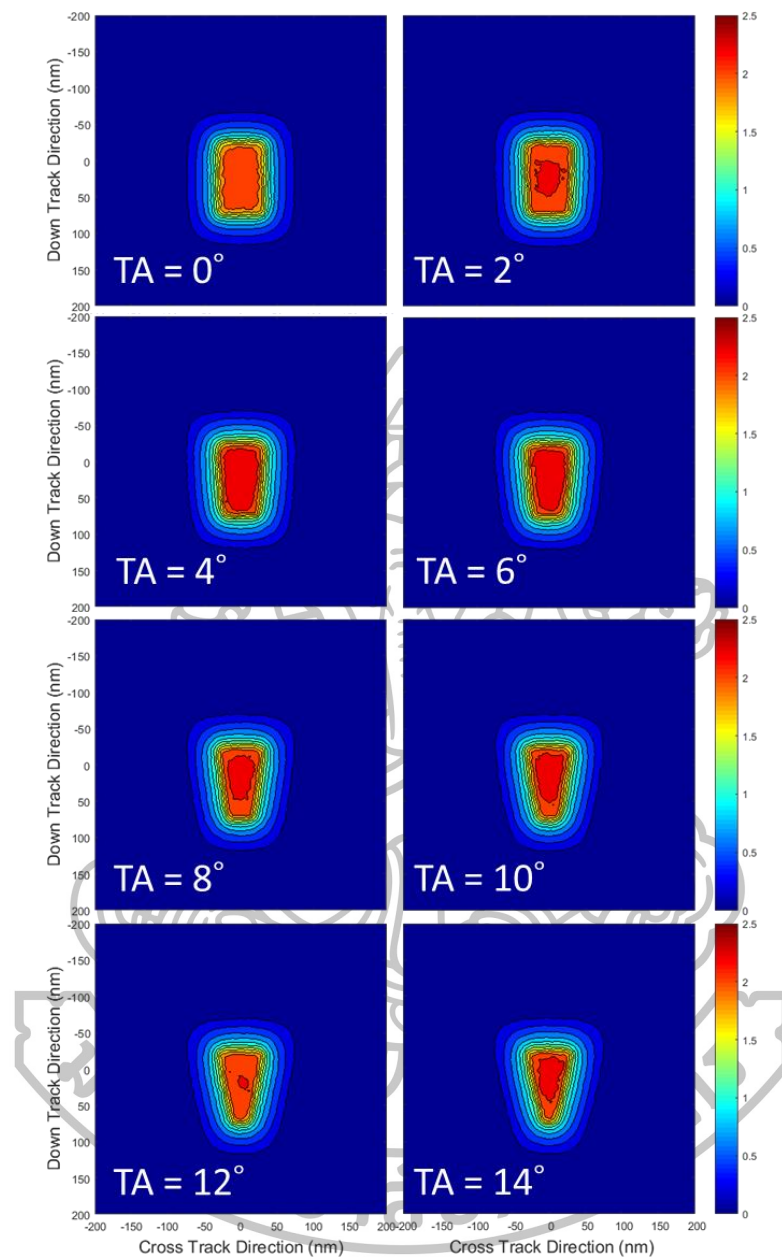
จากการที่ได้กล่าวมาในข้างต้น รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูช่วยลดความไม่สมมาตรที่เกิดจากมุมเอียง เนื่องจากขอบทั้งสองด้านของแตรีกถูกเขียนทับกันพอดีในกระบวนการขับเคลื่อนของหัวเขียนเหนือแผ่นบันทึกแม่เหล็ก จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสนามแม่เหล็กที่ผลิตจากหัวเขียนที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมสี่เหลี่ยมคางหมูโดยสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองดังต่อไปนี้

แบบจำลองหัวเขียน PMR ที่ใช้สำหรับศึกษาสนามแม่เหล็กจากผลกระทบของมุม TA มีลักษณะโครงสร้างของหัวเขียน PMR และที่บริเวณปลายโพลหลักแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.9 ตามลำดับ ปลายโพลหลักมีขนาดเท่ากับ  $60 \times 100$  นาโนเมตร มีซิลด์แม่เหล็กล้อมรอบหนา 400 นาโนเมตร มีระยะห่างจากปลายโพลหลักเท่ากับ 50 นาโนเมตร ขดลวดที่ใช้เป็นแบบแพนเค้ก ซึ่งให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีจุกอิมตัวที่กระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมแปร์ ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยชั้น SUL หนา 200 นาโนเมตร และมีค่าขนาดของสนามแม่เหล็กอิมตัวเท่ากับ 2.4 เทสลา โดยมีช่องว่างโพลหลักกับ SUL เท่ากับ 10 นาโนเมตร



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของมุมสี่เหลี่ยมคางหมู (ในมุมมอง ABS)

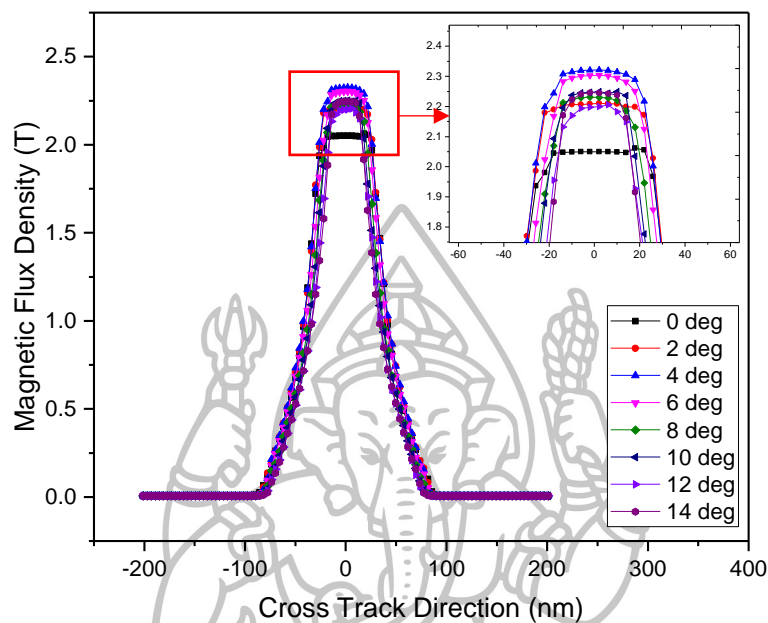
การกำหนดคุณสมบัติของหัวเขียนจะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า หัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทรปิกและในแต่ละส่วนของหัวเขียนใช้สารประกอบแม่เหล็กแบบอ่อนที่แตกต่างกัน (รายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ดูได้จากบทที่ 3) ซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กอิมตัวดังแสดงในตารางที่ 4.1



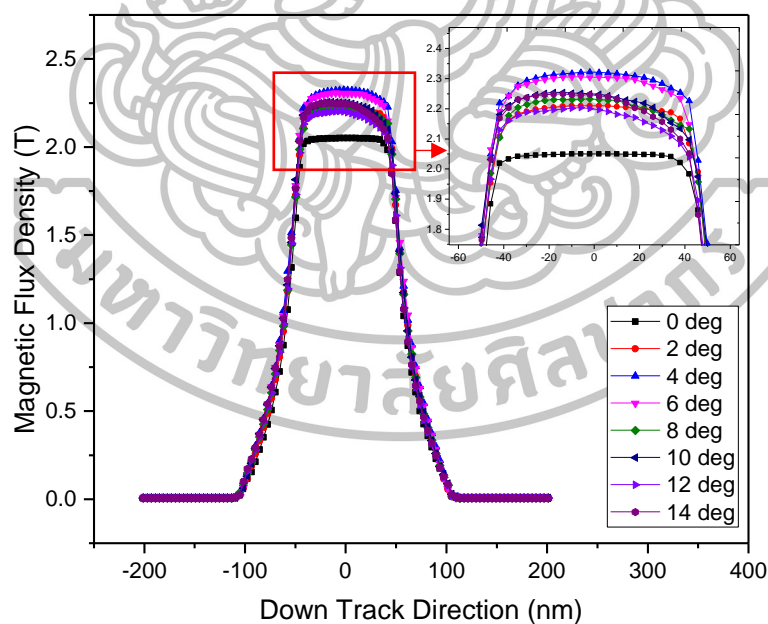
รูปที่ 4.10 สนามแม่เหล็กบนระนาบ ZX ของหัวเขียน PMR ที่ความสูง 5 นาโนเมตร จากระยะห่างของปลายโพลหลักด้าน ABS โดยปลายโพลหลักมีขนาด  $60 \times 100$  นาโนเมตร และมีขนาดของมุม TA แตกต่างกัน

จากผลการทดลองผู้วิจัยนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของแต่ละหัวเขียนที่มีมุม TA ต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 14 องศา (แสดงดังรูปที่ 4.10) พบว่าเมื่อหัวเขียนมีมุม TA มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้นที่บริเวณใกล้ขอบของ TS (จากรูปที่ 4.9 คือขอบด้านบนของปลายโพล หรือ trailing edge) ซึ่งสนามแม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวเป็นสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล สังเกตปลายโพลที่มีมุม TA เท่ากับ 0 องศา จะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะพุ่งกระจายไปทุกๆ ด้านที่เท่ากัน

แต่เมื่อมุม TA มีค่าเท่ากับ 14 องศา จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นใกล้บริเวณขอบของ TS ดังแสดงในรูปที่ 4.10



(ก)

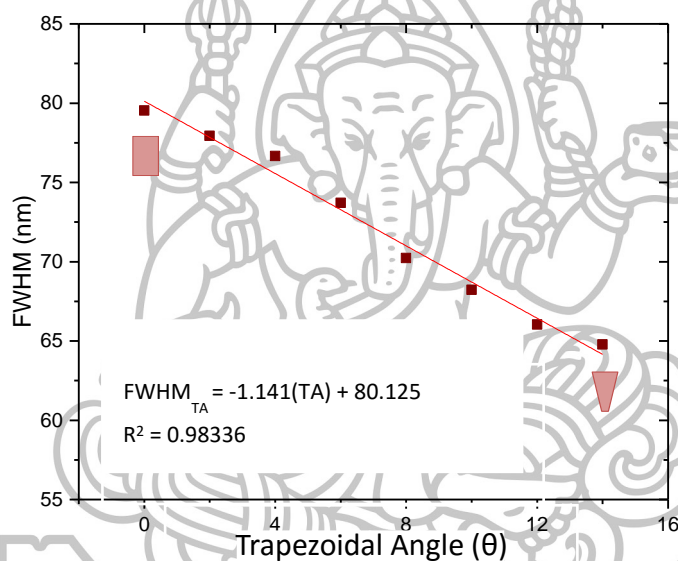


(ข)

รูปที่ 4.11 เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีมุม TA ขนาดต่างๆกัน (ก) ในแนวครอสแทร็ค และ (ข) ในแนวดาวน์แทร็ค

การกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ความสูงจากปลายโพล 5 นาโนเมตรหรือที่กึ่งกลางช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับ SUL แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณา

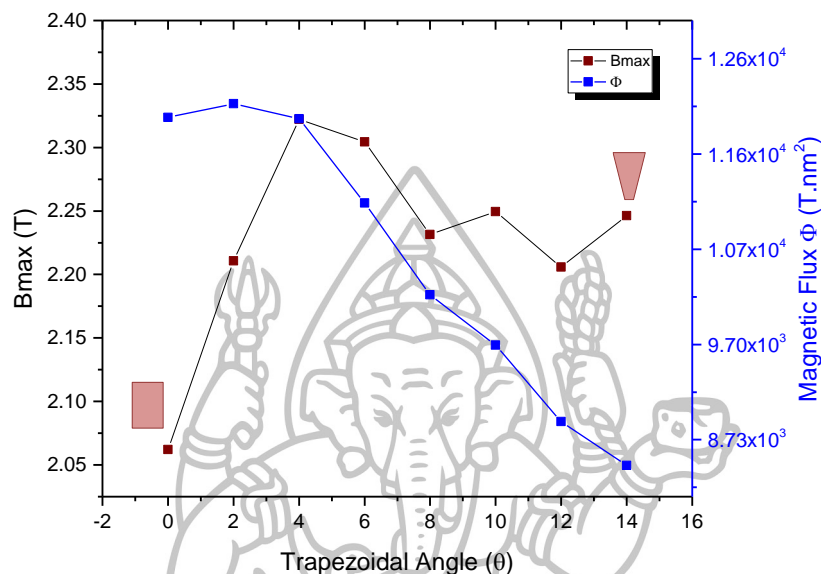
การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวคอรอสแตรีก(รูปที่ 4.11(ก)) พบว่าหัวเขียนที่มีมุม TA เท่ากับ 14 องศา ให้ขนาดความกว้างของสนามแม่เหล็กน้อยสุด และเมื่อพิจารณาปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ขอบของซิลด์ด้านข้างในแนวคอรอสแตรีกจะเห็นว่าค่อนข้างมีความสมมาตรกัน ส่วนปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวคอรอสแตรีกพบว่าที่ขอบของ LS (จากรูปที่ 4.9 คือขอบด้านล่างของปลายโพล หรือ Leading Edge) ลดลงเมื่อหัวเขียนมีมุม TA เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ข) ซึ่งการลดลงของปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวคอรอสแตรีกจะช่วยลดปัญหาการรบกวนหรือการเขียนทับข้อมูลในแตรีกข้อมูลข้างเคียง



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม TA กับความกว้างของข้อมูล FWHM

เมื่อนำผลการจำลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างมุม TA กับ FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งค่า FWHM จะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุม TA มากขึ้นขนาดของ FWHM จะมีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และเมื่อนำข้อมูลจากการจำลองมาหาสมการความสัมพันธ์พบว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น  $FWHM_{TA} = -1.141(TA) + 80.125$  ที่เชื่อถือได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (R-square) เท่ากับ 0.98336 ทำให้สามารถสร้างสมการทำนายความกว้างของการเขียนข้อมูลที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งสามารถทำนายความกว้างของการเขียนข้อมูลได้จากการกำหนดมุม TA ในขณะที่จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Bmax) ที่มุม TA ต่างๆ กัน ตั้งแต่ 2 ถึง 14 องศา พบว่ามุม TA ของโพลหัวเขียนจะส่งผลถึงปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยเช่นกัน โพลหัวเขียนที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีปริมาณความ

หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าโพลหัวเขียนรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยโพลหัวเขียนจะมีปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากที่สุดเมื่อมุม TA มีค่าเท่ากับ 4 องศา แต่เมื่อมุม TA เพิ่มมากขึ้น ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม TA กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดและเส้นสีน้ำเงินแทนปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของปลายโพลหลัก

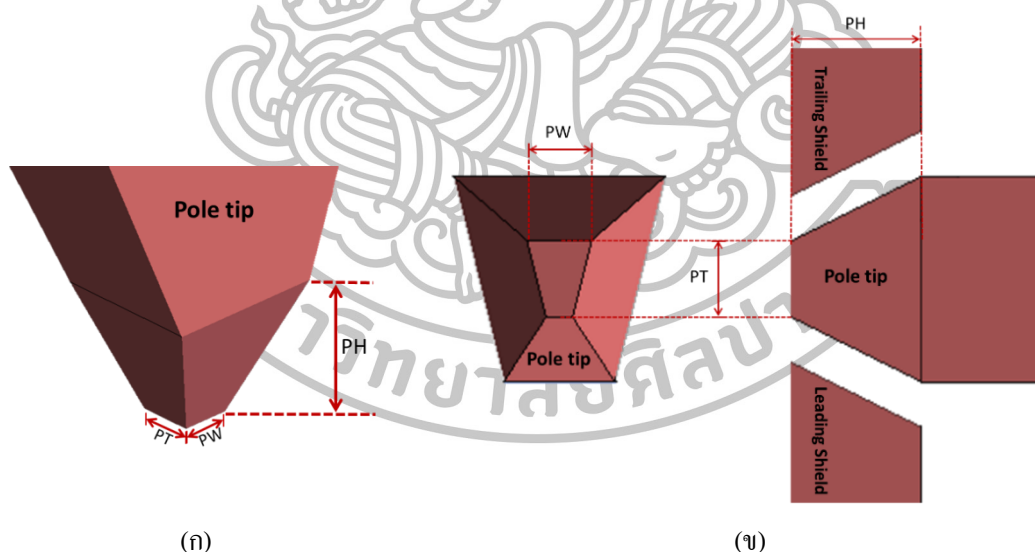
เส้นสีน้ำเงินในรูปที่ 4.13 แสดงปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของปลายโพลหลัก ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคือสัดส่วนของจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของปลายโพล ในช่วงแรกที่มุม TA เท่ากับ 0 ถึง 4 องศา เราจะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุม TA เพิ่มขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าเมื่อมุม TA เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดบริเวณปลายโพลหลักลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดพบว่ามีความหนาแน่นที่ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรก (มุม TA = 0-4 องศา) ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักเพิ่มขึ้นเมื่อมุม TA เพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อเพิ่มมุม TA ตั้งแต่ 6 ถึง 14 องศา เราพบว่าปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดบริเวณปลายโพลเกิดลดปริมาณลงด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลทำให้ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้ลดลงเล็กน้อย

ดังนั้นสรุปได้ว่า การออกแบบหัวเขียนให้มีลักษณะปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู นอกจากจะช่วยลดความไม่สมมาตรของข้อมูลที่เกิดจากมุมเอียงแล้ว ยังจะช่วยเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าเมื่อเทียบกับปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยม และยังช่วยลดขนาดของข้อมูลให้มีความกว้างแคบลงด้วย

#### 4.3 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าสไลเดอร์

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองของหัวเขียน PMR โดยผู้วิจัยจะกล่าวถึงผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดปลายหัวเขียนที่เกิดจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าของสไลเดอร์ (lapping process) ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการควบคุมขนาดของปลายโพลหลักของหัวเขียนพาราเมเตอร์ต่างๆ ที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนสำหรับแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.14

เนื่องจากหัวเขียนจะถูกออกแบบมาให้บินเป็นมุมเอียง ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนของหัวเขียนกับทิศทางข้อมูลแม่เหล็กกับเส้นรอบวงของเทร็ค โดยจะบินอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 องศา และจากผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา หัวเขียนที่ให้สนามแม่เหล็กสูงสุดที่อยู่ระหว่างช่วงดังกล่าว คือหัวเขียนที่มีมุม TA เท่ากับ 10 และ 14 องศา แต่เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก พบว่าที่มุม TA เท่ากับ 14 องศา ให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ขอบของ TS สูงและสนามแม่เหล็กที่ LS ต่ำ (สนามแม่เหล็กที่ขอบของ LS ถ้ามีค่ามากจะส่งผลทำให้ไปรบกวนหรือเขียนทับข้อมูลในเทร็คข้างเคียงที่ถูกเขียนไว้บนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก) เมื่อเทียบกับมุม TA เท่ากับ 10 ดังนั้นในการทดลองนี้เราจึงเลือกใช้หัวเขียนทำมุม TA ที่ 14 องศา



รูปที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่บริเวณปลายโพล

แบบจำลองสามมิติของหัวเขียน PMR ที่ใช้สำหรับศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าของสไลเดอร์ โดยแบบจำลองหัวเขียนด้าน ABS มีขนาดปลายโพลหลักเท่ากับ  $40 \times 80$  นาโนเมตร มีมุมสี่เหลี่ยมคางหมูเท่ากับ 14 องศา มีซิลด์แม่เหล็กล้อมรอบหนา 400 นาโนเมตร มีช่องว่างระหว่างซิลด์กับปลายโพลหลัก LG SG และ TG



(ดังแสดงรูปที่ 4.1(ข)) เท่ากับ 10 50 30 นาโนเมตร ตามลำดับ ขดลวดที่ใช้เป็นแบบแพนเค้ก โดยผู้วิจัยสร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยชั้น SUL หนา 200 นาโนเมตร และมีค่าขนาดของสนามแม่เหล็กอิมิต์เท่ากับ 2.4 เทสลา โดยมีช่องว่างโพลหลักกับ SUL เท่ากับ 10 นาโนเมตร (โครงสร้างแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1(ก))

การกำหนดคุณสมบัติของหัวเขียนจะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า หัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทรปิกและในแต่ละส่วนของหัวเขียนจะผลิตจากสารประกอบแม่เหล็กแบบอ่อนที่แตกต่างกัน (รายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ดูได้จากบทที่ 3) ซึ่งจะมีค่าสนามแม่เหล็กอิมิต์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขนาดของปลายโพลที่มีการขีดเปิดผิวหน้าแล้วได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองหัวเขียนบันทึกแม่เหล็กเนื่องจากผลของการขีดเปิดผิวหน้า

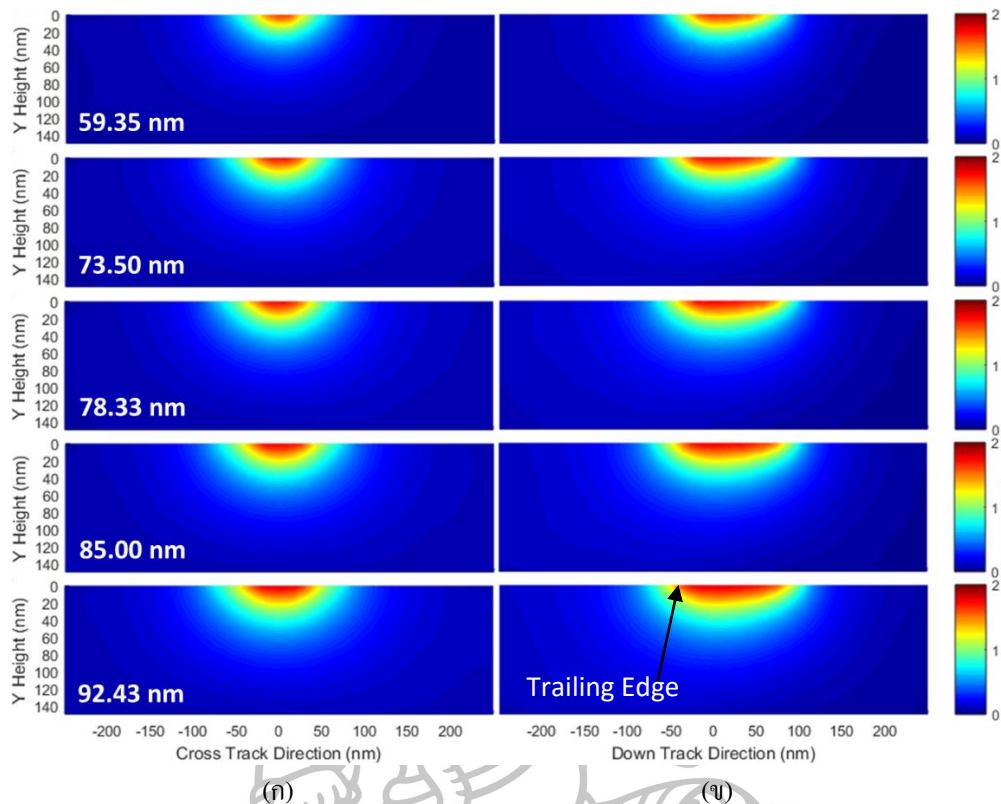
Pole width: PW (nm)	Pole thickness: PT (nm)	Pole Height: PH (nm)
59.35	92.65	401.35
73.50	108.84	387.40
78.33	112.94	382.75
85.00	118.76	376.14
92.43	125.21	368.83

พิจารณาสไลเดอร์ที่มีการขีดเปิดผิวหน้า เมื่อทำการขีดด้วยความลึกที่มากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความสูง PH หรือความสูงทรอท (Throat Height: TH) ของปลายโพลจะค่อยๆ สั้นลง ขนาดของหัวเขียนมีค่าความกว้าง PW และความหนา PT มากขึ้น เนื่องจากผลของมุมชีเซล (Chisel Angle: CA) และมุมเบเวล (Bevel Angle: BA) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ค่าของมุมต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 3.1)

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียน PMR บนระนาบต่างๆ เนื่องจากการขีดเปิดผิวหน้าแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 สีที่ปรากฏอยู่บนระนาบแสดงถึงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณสีแดงแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงและบริเวณสีน้ำเงินแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำ

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระนาบ ZX ที่ระยะกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างปลายโพลกับ SUL หรือที่ระยะห่างจากปลายโพลด้าน ABS 5 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่



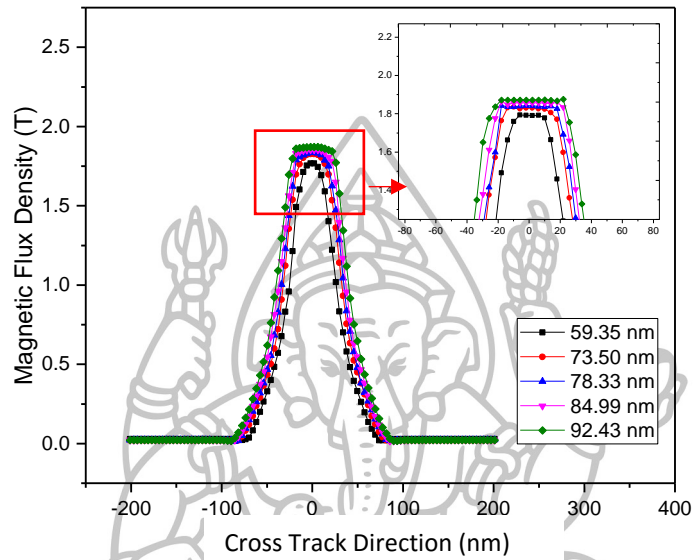


รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า โดยที่ (ก) ระนาบ XY (สนามแม่เหล็กด้านครอสแทร็ค) และ (ข) ระนาบ YZ (สนามแม่เหล็กด้านครอสแทร็ค)

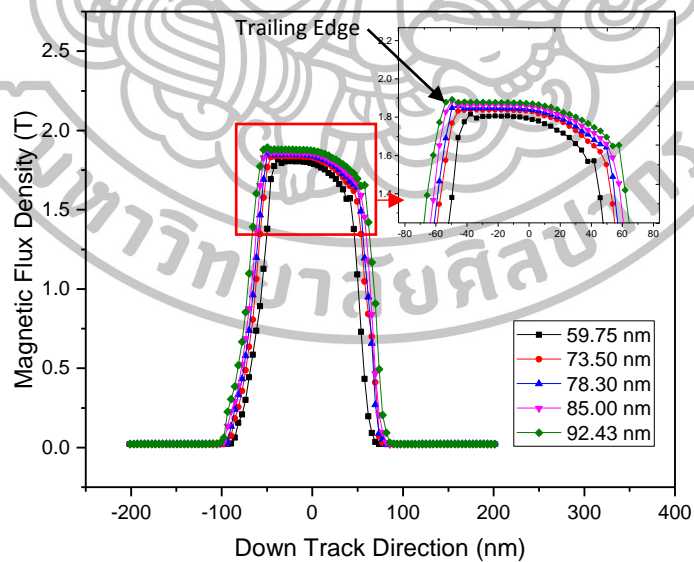
เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลในระนาบ XY และ YZ ซึ่งข้อมูลในระนาบดังกล่าวจะนำมาวิเคราะห์สนามแม่เหล็กด้านครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค ตามลำดับ พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ในระนาบ XY (ในรูปที่ 4.16(ก)) หัวเขียนที่มีขนาดใหญ่ให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูง แต่ก็ให้ความกว้างในการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กมากเช่นกัน และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ในระนาบ YZ สังเกตที่บริเวณขอบของ TS (ขอบด้านซ้ายมือ ในรูปที่ 4.16(ข)) หัวเขียนจะให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูง โดยสนามแม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวจำเป็นต่อการบันทึกข้อมูลลงแผ่นบันทึกแม่เหล็กเป็นอย่างมาก ซึ่งพบว่าหัวเขียนที่มีขนาดใหญ่จะให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าหัวเขียนที่มีขนาดเล็ก

ในรูปที่ 4.17 แสดงเส้นข้อมูลของการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีขนาดปลายโพลแตกต่างกัน โดยพิจารณาที่ความสูงจากปลายโพล 5 นาโนเมตรหรือที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับชั้น SUL จากกราฟในรูปที่ 4.17(ก) และ

รูปที่ 4.17(ข) เราจะเห็นว่าหัวเขียนที่มีปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด คือ หัวเขียนขนาด 92.43 นาโนเมตร



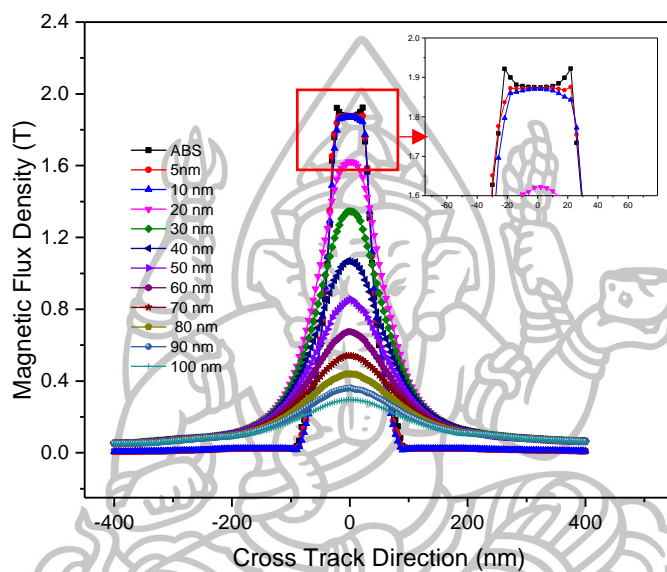
(ก)



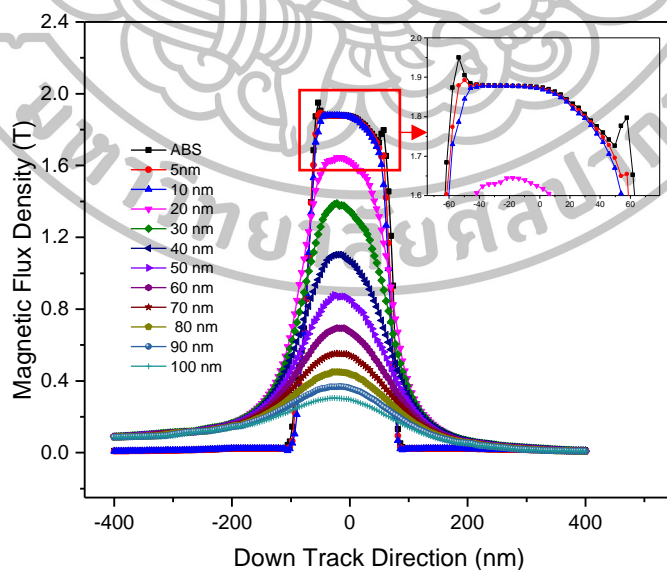
(ข)

รูปที่ 4.17 เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ขนาดปลายโพลหลักต่างกัน (ก) ในแนวครอสแทร็ค และ (ข) ในแนวดาวน์แทร็ค

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ระยะความสูงจากปลายโพลด้าน ABS หรือระยะความสูง Y (Y Height: YH) ตั้งแต่ 0 หรือที่ตำแหน่ง ABS จนถึง 100 นาโนเมตร พบว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะ YH ห่างออกจากปลายโพลมากขึ้น ดังรูปที่ 4.18 แสดงเส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะ YH ต่างๆ ของหัวเขียนขนาด 92.43 นาโนเมตร



(ก)

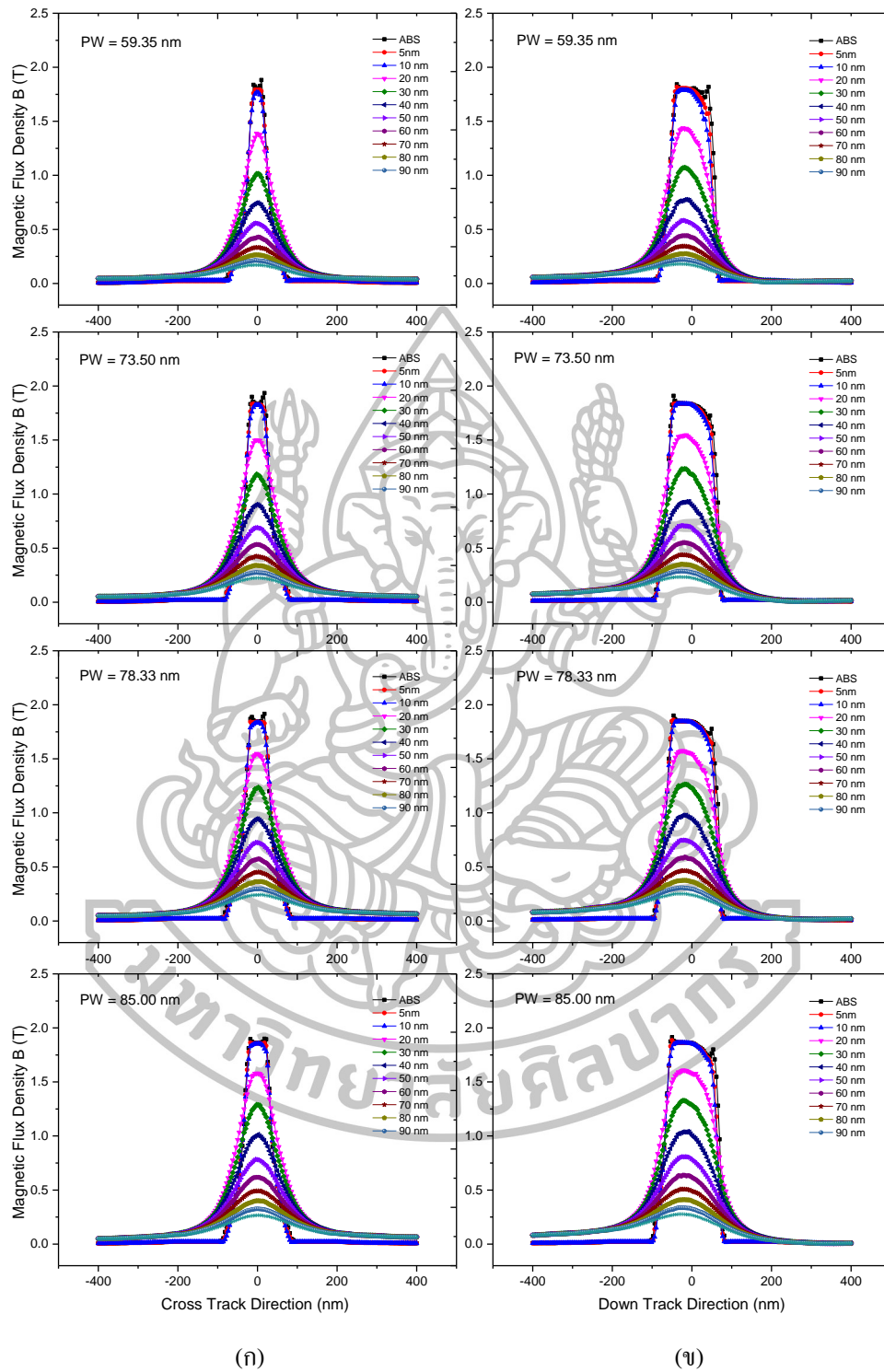


(ข)

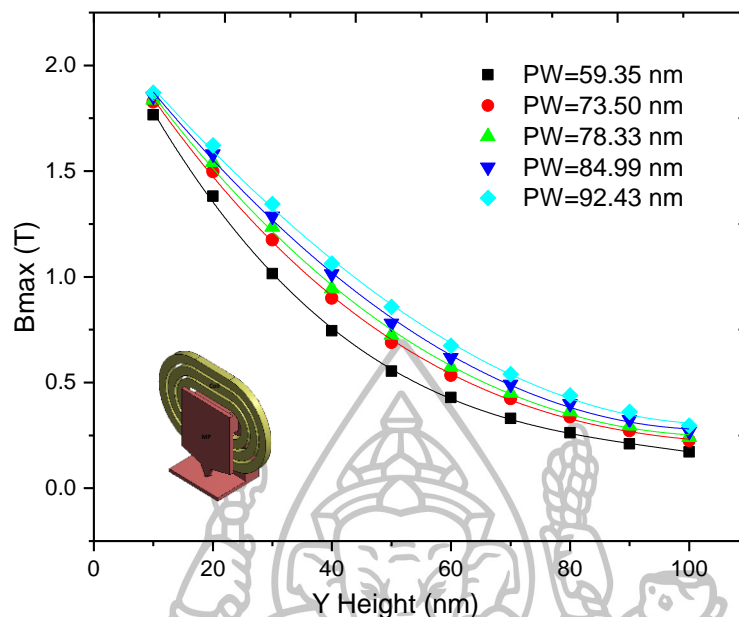
รูปที่ 4.18 เส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะห่างจากปลายโพล (YH) ต่างๆ ของหัวเขียนขนาด 92.43 นาโนเมตร โดยที่ (ก) แนว Crosstrack (ข) แนว Downtrack

การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่มีความกว้าง PW เท่ากับ 92.43 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.18 การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวครอสแตร็คดังรูปที่ 4.18(ก) พบว่ามีการกระจายตัวสมมาตรกันทั้งสองข้าง เส้นสีดำแสดงการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่ง ABS (YH=0) จะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามากกว่าปกติที่บริเวณขอบของปลายโพล (ขอบด้าน SS) มีขนาดความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีคเท่ากับ ~80 นาโนเมตร ต่อมาเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากปลายโพล 5 นาโนเมตร หรือที่ระยะกึ่งกลางระหว่างปลายโพลกับ SUL (ในอากาศ) แสดงดังเส้นสีแดง พบว่าปริมาณสนามแม่เหล็กจะคงที่สม่ำเสมอตามแนวพื้นผิวของปลายโพลและมีลักษณะการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กใกล้เคียงกันกับที่ตำแหน่ง ABS แต่เมื่อพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เข้าไปอยู่ในเนื้อสารของชั้น SUL ที่ระยะ YH ตั้งแต่ 20 ถึง 100 นาโนเมตร พบว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าลดลงตามระยะ YH ที่ห่างจากปลายโพลมากขึ้นและมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นภายในเนื้อสารซึ่งเป็นผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลแล้วย้อนกลับไปยังซิลด์ด้านข้าง

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวควาน์แตร็ค ดังแสดงในรูปที่ 4.18(ข) จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองข้างจะไม่สมมาตรกัน โดยที่บริเวณขอบของ TS มีค่าสูงกว่าขอบของ LS เนื่องจากผลของรูปทรงหัวเขียนที่ทำมุม TA เท่ากับ 14 องศา เส้นสีดำ (เส้นการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่ง ABS) จะเห็นว่าที่ขอบของปลายโพลจะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าปกติเช่นเดียวกันกับแนวครอสแตร็ค โดยขนาดความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีคมีขนาดเท่ากับ ~140 นาโนเมตร ซึ่งมีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะห่างจากปลายโพล 5 นาโนเมตร (ในอากาศ) และเมื่อพิจารณาที่ระยะ YH ตั้งแต่ 20 ถึง 100 นาโนเมตรภายในเนื้อสารของ SUL พบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงตามระยะ YH ที่ห่างจากปลายโพลเพิ่มมากขึ้นและมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นภายในเนื้อสารเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่ง ABS และในอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลแล้วย้อนกลับไปยังซิลด์ด้านหลัง TS และด้านหน้า LS การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสำหรับหัวเขียนขนาดอื่นๆ ที่ระยะ YH ตั้งแต่ 0 ถึง 100 นาโนเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับตำแหน่งในแนว (ก) ครอสแทร็ค (ข) ดาวน์แทร็ค ที่ระยะห่างจากปลายโพลต์่างตั้งแต่ 0 (ABS) ถึง 100 นาโนเมตร



รูปที่ 4.20 ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{max}$  กับระยะห่างจาก ABS (Y height) ของหัวเขียนที่มีขนาดต่างกัน

ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดหรือ  $B_{max}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งพิจารณาภายในเนื้อสารของชั้น SUL ที่ระยะ YH ตั้งแต่ 10 ถึง 100 นาโนเมตร พบว่ามีปริมาณ  $B_{max}$  ลดลงตามระยะ YH ที่เพิ่มมากขึ้น โดยหัวเขียนที่มีปลายโพลขนาด 59.35 นาโนเมตรจะมีปริมาณ  $B_{max}$  น้อยสุดแล้วจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อหัวเขียนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น (เมื่อพิจารณาที่ระยะ YH เดียวกัน) จากข้อมูลดังกล่าวเรานำไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{max}$  กับระยะ YH ของหัวเขียนขนาดต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

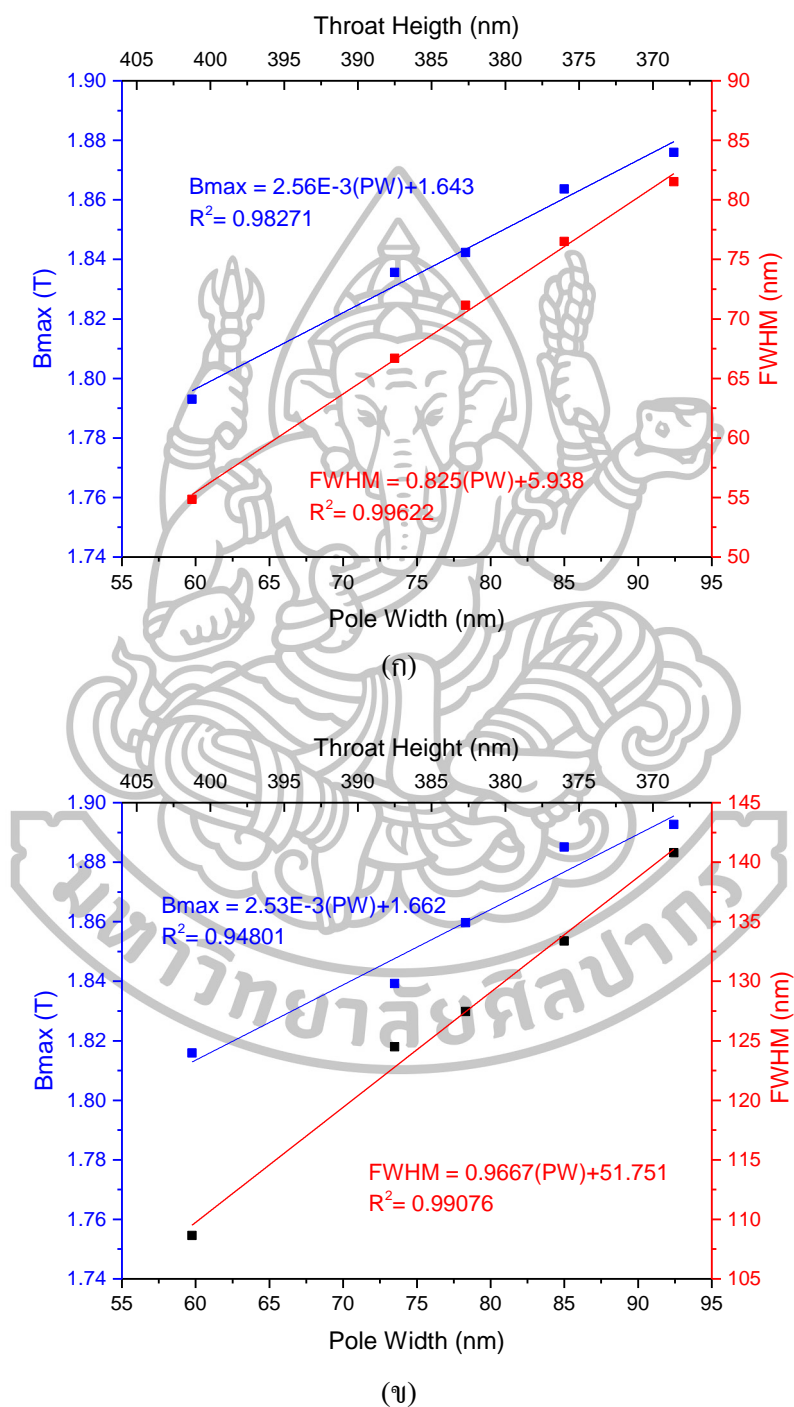
ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{max}$  กับระยะ YH

Pole Width (nm)	Functions
59.35	$B_{max} = 2.30582 - 0.05802(YH) + 5.59986E-4(YH)^2 - 1.93092E-6(YH)^3$
73.50	$B_{max} = 2.2728 - 0.04645(YH) + 3.42088E-4(YH)^2 - 8.16278E-7(YH)^3$
78.33	$B_{max} = 2.2523 - 0.04198(YH) + 2.57244E-4(YH)^2 - 3.73778E-7(YH)^3$
85.00	$B_{max} = 2.22979 - 0.03735(YH) + 1.76577E-4(YH)^2 + 1.99747E-8(YH)^3$
92.43	$B_{max} = 2.21072 - 0.0331(YH) + 1.09994E-4(YH)^2 + 3.08825E-7(YH)^3$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{max}$  กับระยะ YH ที่พิจารณาภายในเนื้อสารของ SUL ในตารางที่ 4.3 เราจะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่หัวเขียนสามารถ



ผลิตได้ของหัวเขียนขนาดต่างๆ จะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.3 เทสลา (เมื่อแทนค่า YH = 0 ในสมการหรือที่ตำแหน่ง ABS ของปลายโพล) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติของสารที่เราได้กำหนด คือ มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิมพัลส์ที่ 2.4 เทสลา



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง PW (หรือความสูง TH) ของปลายโพลกับค่า Bmax และ FWHM โดยที่ (ก) ความสัมพันธ์ในแนวคอสแซร์ค และ (ข) ความสัมพันธ์ในแนวคาน์แทร์ค

ต่อไปเราจะนำเสนอเส้นการกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR ที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มาคำนวณหาค่าความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่ง (Full Width at Half Maximum: FWHM) ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็ค ดังแสดงในรูปที่ 4.21(ก) และ 4.21(ข) ตามลำดับ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง PW (แปรผกผันกับค่าความสูง PH) กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Bmax) และ FWHM

จากรูปที่ 4.21 เราจะพิจารณาข้อมูลของเส้นการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะห่างจากปลายโพล 5 นาโนเมตร หรือที่ระยะกึ่งกลางระหว่างปลายโพลกับชั้น SUL จากการคำนวณพบว่าเมื่อหัวเขียนถูกขจัดให้มีขนาดความกว้าง PW ปลายโพลใหญ่ขึ้น ในขณะที่ความสูง PH ของปลายโพลจะมีขนาดสั้นลงนั้นส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่า FWHM เพิ่มขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดปลายโพลใหญ่ขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง PW กับ Bmax และ FWHM มีความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงสมการดังตารางที่ 4.4 โดยมีค่าความน่าเชื่อถือด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (R-square) มีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้สามารถสร้างสมการทำนายของความกว้างการเขียนข้อมูลในการบันทึกและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจากขนาดความกว้าง PW

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดหรือ Bmax ในรูปที่ 4.21 สังเกตว่าค่า Bmax ของข้อมูลในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็คมีค่าไม่เท่ากันนั้น เนื่องจากที่ได้อธิบายถึงตำแหน่งของการดึงข้อมูลไว้ในก่อนหน้า (หัวข้อ 3.4.2) กล่าวคือ ข้อมูลในแนวครอสแทร็คเป็นข้อมูลตั้งแต่ X มีค่าเท่ากับ -400 ถึง 400 นาโนเมตร และในส่วนของข้อมูลในแนวดาวน์แทร็คเป็นข้อมูลที่ได้จากเส้นตรงตั้งแต่ Z เท่ากับ -400 จนถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งตำแหน่งเริ่มต้น (จุด 0,0) อยู่ที่กึ่งกลางของปลายโพลหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทำให้ค่า Bmax ที่ได้คือค่าที่สูงที่สุดของเส้นข้อมูลตามตำแหน่งที่เลือกแต่ไม่ใช่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่พิจารณาบนระนาบที่ครอบคลุมบริเวณปลายโพลหลัก

ตารางที่ 4.4 สมการแทนผลลัพธ์จากไฟไนท์เอลิเมนต์

Direction	Linear functions	R-square
Cross Track	$B_{max} = 2.56E-3(PW)+1.643$	$R^2 = 0.98271$
	$FWHM = 0.825(PW)+5.938$	$R^2 = 0.99622$
Down Tack	$B_{max} = 2.53E-3(PW)+1.662$	$R^2 = 0.94801$
	$FWHM = 0.967(PW)+51.751$	$R^2 = 0.99076$

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับชั้น SUL จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของหัวเขียน วัสดุแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายผ่านขดลวดของหัวเขียน ซึ่งจากผลการจำลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปลายโพลหลัก ด้วยกระบวนการกัดเปิดผิวหน้า เนื่องจากผลของมุม CA และ BA เราพบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความกว้าง PW เพิ่มขึ้นและความสูง PH ลดลง

การลดลงของความสูง PH ทำให้ความต้านทานสุทธิของระบบลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบหัวเขียนเพิ่มขึ้น (ประสิทธิภาพของหัวเขียนมีค่าเท่ากับความต้านทานแม่เหล็กที่บริเวณช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับชั้น SUL หากด้วยความต้านทานแม่เหล็กทั้งหมด ดังสมการที่ (2.38) หัวข้อที่ 2.6) อธิบายได้ดังนี้ การลดลงของความสูง PH ทำให้จำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด ไดรฟ์พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดด้าน ABS เพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานสุทธิของระบบที่ลดลง ในขณะที่ความต้านทานพื้นที่หน้าตัดของปลายโพลที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านตั้งฉากพื้นที่หน้าตัดได้มากขึ้น ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองจะส่งเสริมกัน ส่งผลทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีค่ามาก ขนาดของปลายโพลด้าน ABS เป็นตัวกำหนดขนาดของบิตข้อมูล โดยบิตข้อมูลจะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ในการออกแบบหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หัวเขียนที่ดีจะต้องมีปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงซึ่งการเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดปลายโพลเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ แต่หัวเขียนจะต้องให้ขนาดความกว้างข้อมูลบิต (ขนาดความกว้างข้อมูลบิตจะสัมพันธ์กับความกว้างของการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวครอสแทร็ค) ที่แคบลงด้วยเนื่องจากต้องการลดความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ในแผ่นบันทึก ดังนั้นการเพิ่มขนาดความกว้าง PW (แนวครอสแทร็ค) ของหัวเขียนจึงไม่เป็นผลที่ดีนักถึงแม้ว่าจะให้ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นก็ตาม หัวเขียนจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในการบันทึกข้อมูล

หัวข้อต่อไปเราจะนำผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มาศึกษาและเปรียบเทียบกับข้อมูลสนามแม่เหล็กที่ได้จากผลวัดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

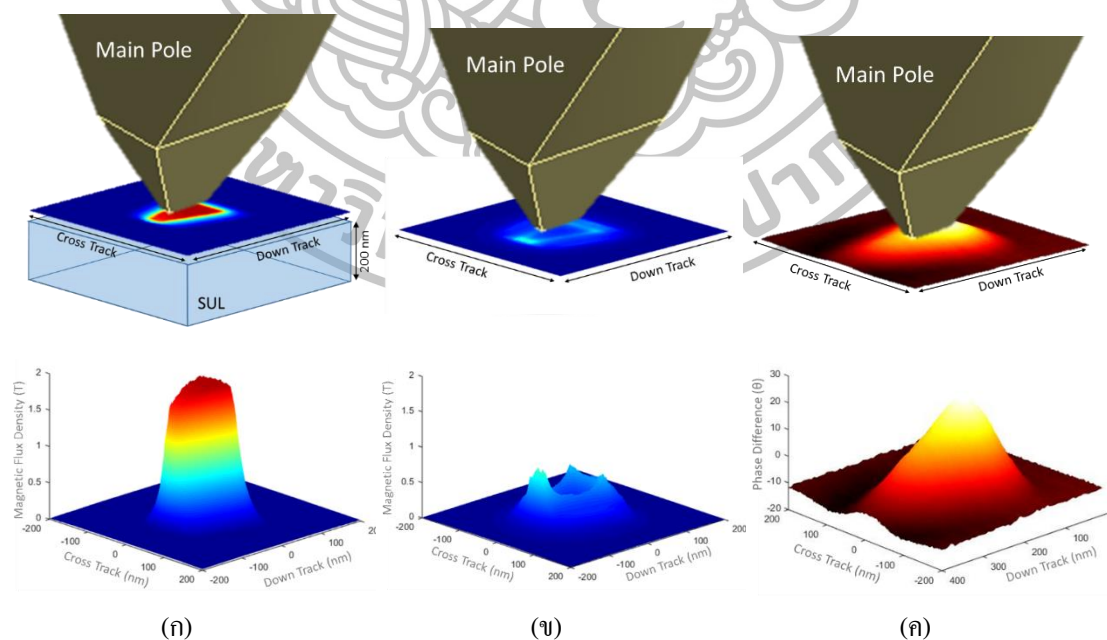
#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force Microscope: MFM) ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของหัวเขียน โดยอาศัยหลักการของการโค้งงอของคานาที่ตอบสนองต่อแรงแม่เหล็กของหัวเขียน กล่าวคือ เมื่อทิป MFM (MFM tip) สแกนอยู่เหนือบริเวณของปลายโพลหลัก

ทำให้คานเกิดการสั่นเนื่องจากถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน เครื่อง MFM จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งวัดความแตกต่างเฟสระหว่างการสั่นของคานที่ถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนกับสัญญาณที่ใช้กระตุ้นให้คานสั่น จากผลการวัดดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กในรูปของแรงเกรเดียนท์แม่เหล็ก (gradient force) ซึ่งสามารถนำมาประมาณขนาดและความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนได้

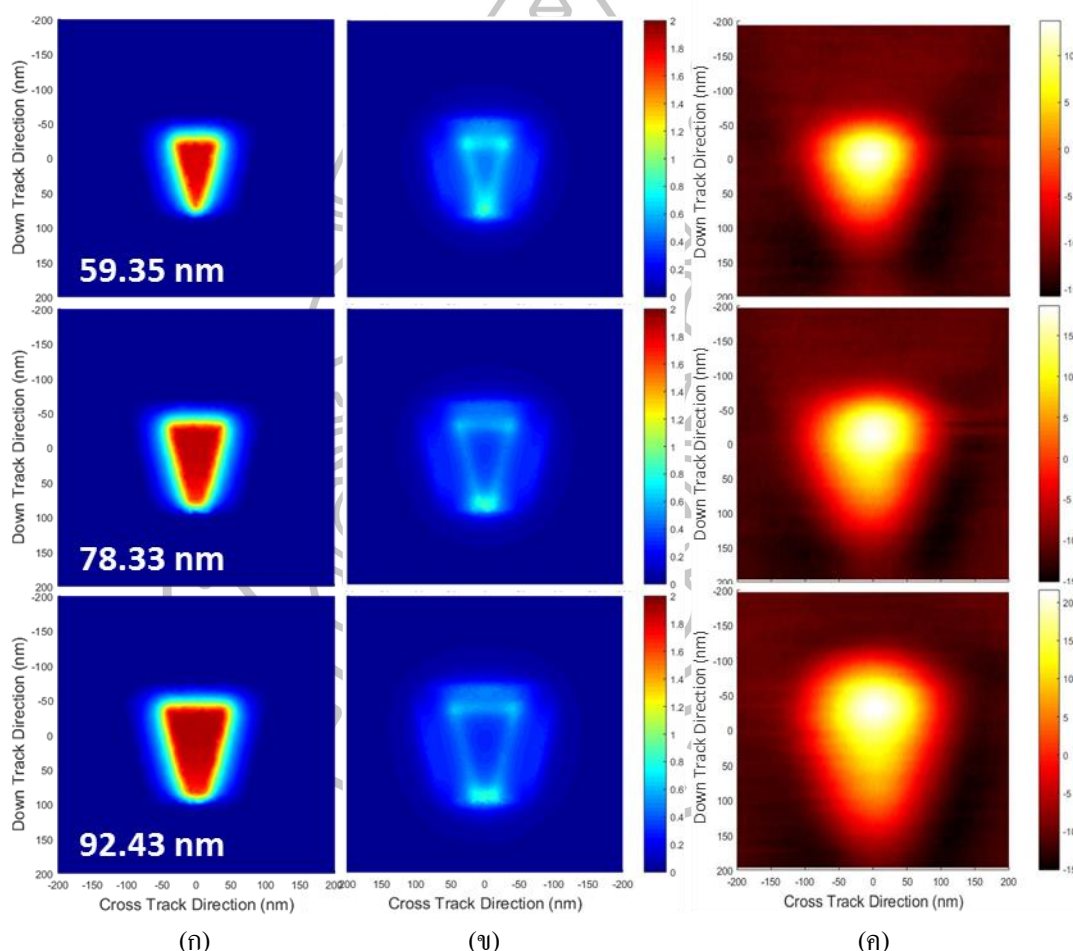
ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนของกระบวนการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง MFM โดยนำข้อมูลของหัวเขียนขนาด 59.35 78.33 และ 92.43 นาโนเมตรตามลำดับ จากเอกสารอ้างอิงที่ [67] มาเปรียบเทียบกับผลของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กที่ได้จากเครื่อง MFM มีความสอดคล้องกับทฤษฎีอย่างไร โดยอาศัยการพิจารณาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กสูงสุดและความกว้างของสนามแม่เหล็กซึ่งจะสัมพันธ์กับขนาดข้อมูลเมื่อทำการบันทึกลงแผ่นบันทึกแม่เหล็ก

สำหรับแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานั้น เราได้ใช้แบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการกัด ซึ่งเป็นแบบจำลองเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.3 (ขนาดต่างๆ ที่บริเวณปลายโพลหลักแสดงดังตารางที่ 4.2) โดยเราได้พิจารณาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนที่ไม่มีชั้น SUL และมีชั้น SUL เป็นส่วนประกอบ โครงสร้างของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1(ก)



รูปที่ 4.22 สนามแม่เหล็กในมุมมองสามมิติของหัวเขียน PMR ที่ระยะความสูง 10 นาโนเมตร เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมแปร์ (ก) แบบจำลองที่มีชั้น SUL (ข) แบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL และ (ค) ความแตกต่างเฟสที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลของหัวเขียนด้วยเครื่อง MFM

สนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักของหัวเขียน PMR ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยรูปที่ 4.22(ก) และ 4.22(ข) แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองของหัวเขียนที่มีชั้น SUL และไม่มีชั้น SUL ตามลำดับ แถบสีที่ปรากฏแสดงปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งสีแดงแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงและสีน้ำเงินแทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำ ส่วนสนามแม่เหล็กที่วัดด้วยเครื่อง MFM ซึ่งจะแสดงผลการวัดในรูปแบบของความแตกต่างของเฟสดังรูปที่ 4.22(ค) โดยแถบสีที่ปรากฏแสดงความแตกต่างของเฟสซึ่งแถบสีสว่างแทนค่าความแตกต่างเฟสมากส่วนแถบสีมืดแทนค่าความแตกต่างเฟสน้อย



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลหลักด้าน ABS ในระนาบ ZX ที่ระยะห่างจากปลายโพล 10 นาโนเมตร โดยที่ (ก) ผลการจำลองของหัวเขียนที่มีชั้น SUL (ข) ไม่มีชั้น SUL และ (ค) ผลที่วัดได้จากเครื่อง MFM ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของความแตกต่างเฟส

ผลการจำลองของหัวเขียนที่มีชั้น SUL และไม่มีชั้น SUL เมื่อพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระนาบ ZX ที่ระยะห่างจากปลายโพลหลักด้าน ABS 10 นาโนเมตร แสดงไว้ในรูปที่ 4.23(ก) และ 4.23(ข) ตามลำดับ พบว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กมากขึ้น เมื่อหัวเขียนมี

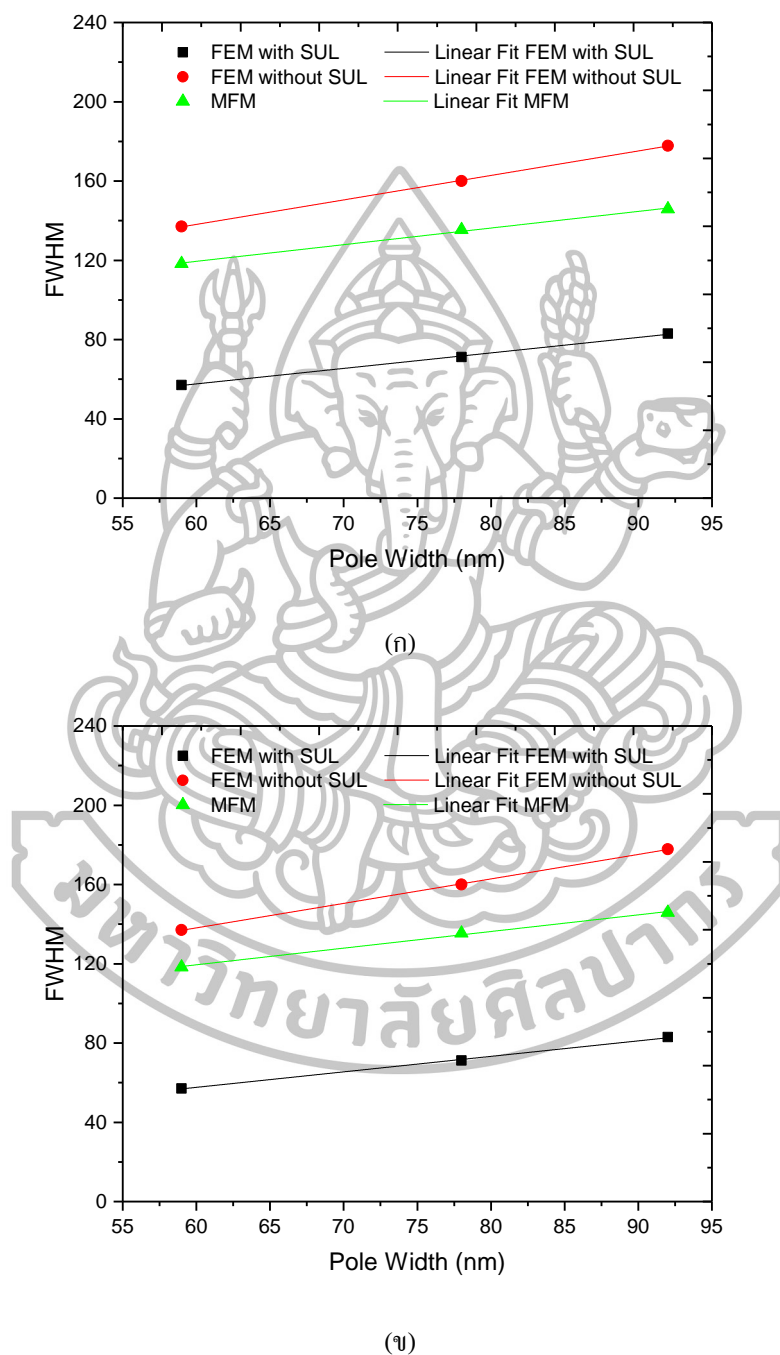
ขนาดปลายโพลกว้างขึ้น และเมื่อพิจารณาผลจากแบบจำลองหัวเขียนที่มีชั้น SUL จะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองหัวเขียนที่ไม่มีชั้น SUL เนื่องจากการปรากฏขึ้นของชั้น SUL จะช่วยบังคับให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลหลักมีทิศตั้งฉากกับชั้น SUL ส่งผลให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูง และจากโครงสร้างของแบบจำลองที่ได้ออกแบบให้มีขนาดของช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับขั้วลัดล้อมรอบ โดยที่  $LG = 10$  นาโนเมตร  $WG = 30$  นาโนเมตร และ  $SG = 50$  นาโนเมตร (ช่องว่างระหว่างขั้วลัดกับปลายโพลด้านต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1) และออกแบบให้มีช่องว่างของปลายโพลระหว่างชั้น  $SUL = 10$  นาโนเมตร (หรือช่องว่าง ABS-SUL) สังเกตว่า  $LG$  กับ ABS-SUL มีระยะห่างจากปลายโพลเท่ากัน แต่เนื่องจากว่า  $SUL$  เราได้กำหนดให้มีค่าซึมซับแม่เหล็กที่สูงกว่า  $LS$  จึงทำให้สนามแม่เหล็กวิ่งผ่านชั้น  $SUL$  มากกว่าจะวิ่งไปยัง  $LS$

ในทางกลับกันเมื่อนำชั้น  $SUL$  ออก พบว่าปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าน้อยลง เนื่องจากการที่ไม่มีชั้น  $SUL$  ทำให้สนามแม่เหล็กแทนที่จะวิ่งพุ่งตั้งฉากออกจากปลายโพลหลัก แต่สนามแม่เหล็กกลับย้อนกลับไปยังขั้วลัดที่อยู่ล้อมรอบ ซึ่งจากผลการจำลองในรูปที่ 4.23(ข) เราจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะสูงกว่าปกติที่บริเวณขอบของปลายโพล แต่จะมีค่ามากที่สุดที่ขอบของ  $LS$  เนื่องจากว่าความกว้างของ  $LG$  หรือช่องว่างระหว่างปลายโพลหลักกับ  $LS$  มีขนาดแคบที่สุด ( $LG = 10$  นาโนเมตร) เมื่อเทียบกับช่องว่างของขั้วลัดกับปลายโพลในด้านอื่นๆ ( $WG = 30$  นาโนเมตร และ  $SG = 50$  นาโนเมตร) ส่งผลให้สนามแม่เหล็กย้อนกลับไปยัง  $LS$  สูง ช่องว่างระหว่างขั้วลัดกับปลายโพลด้านต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

สำหรับผลของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MFM ซึ่งแสดงในรูปของความแตกต่างเฟสดังรูปที่ 4.23(ค) พบว่าการกระจายของความแตกต่างเฟสกระจายตัวมากขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดปลายโพลกว้างขึ้นเช่นเดียวกับผลของการกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

ต่อไปเราจะนำผลที่ได้จากแบบจำลอง FEM และจากการวัดด้วยเครื่อง MFM มาคำนวณหาค่าความกว้างของพิกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่ง หรือ FWHM ของสนามแม่เหล็ก ตามแนวครอสแตรีกและดาวนั้แตรีกของหัวเขียนขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 59.35 78.33 และ 92.43 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของปลายโพล (PW) กับความกว้างของพิกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่ง โดยที่ 4.24(ก) และ 4.24(ข) คือข้อมูลในแนวครอสแตรีกและข้อมูลในแนวดาวนั้แตรีกตามลำดับ ซึ่งพบว่าข้อมูลจากทั้งสามกรณีมีแนวโน้มและสอดคล้องไปในทางเดียวกันเมื่อพิจารณา FWHM กล่าวคือ เมื่อปลายโพลหลักมีขนาดใหญ่มากขึ้นส่งผลให้ FWHM มีค่ามากขึ้นแปรผันตรงกับขนาดของปลายโพล โดยมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้น ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่าง

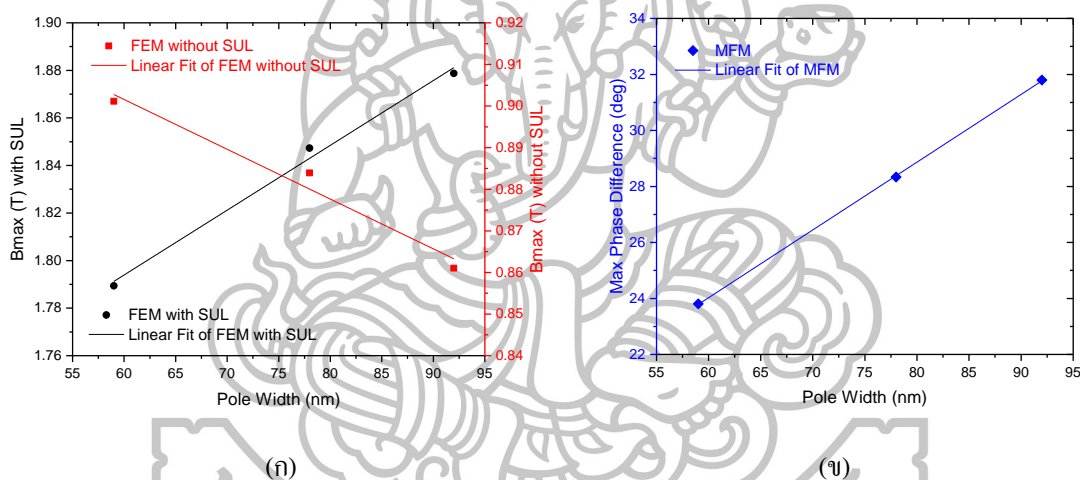
ความกว้าง (PW) และความหนา (PT) ของปลายโพลกับความกว้างของพิกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลแสดงไว้ในตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของพิกสนามแม่เหล็ก โดยที่ (ก) ในแนวครอสแทร์ค และ (ข) ในแนวดาวน์แทร์ค

ตารางที่ 4.5 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความกว้าง (PW) และความหนา (PT) กับความกว้างของพิกที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของสนามแม่เหล็กที่ออกจากปลายโพล

Direction	Linear functions	R-square
Cross Track	$FWHM_{FEM \text{ with SUL}} = 0.78(PW)+10.75$	0.9970
	$FWHM_{FEM \text{ without SUL}} = 1.24(PW)+63.99$	0.9996
	$FWHM_{MFM} = 0.84(PW)+69.11$	0.9942
Down Tack	$FWHM_{FEM \text{ with SUL}} = 1.15(PT)-5.08$	0.9979
	$FWHM_{FEM \text{ without SUL}} = 1.19(PT)+37.35$	0.9730
	$FWHM_{MFM} = 2.33(PT)-109.49$	0.9315



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดกับขนาดความกว้างของปลายโพลหลัก โดยที่ (ก) ผลจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (ข) ผลจากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง MFM ซึ่งแสดงในรูปของค่าความแตกต่างเฟส

เมื่อพิจารณาปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดของหัวเขียนพบว่าแบบจำลองของหัวเขียนที่มีชั้น SUL จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อปลายโพลมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่สำหรับแบบจำลองของหัวเขียนที่ไม่มีชั้น SUL ปริมาณสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยลงเมื่อขนาดปลายโพลกว้างขึ้น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.25(ก) และเมื่อเราได้นำข้อมูลสนามแม่เหล็กจากการวัดด้วยเครื่อง MFM ในรูปที่ 4.23(ค) มาพิจารณาหาปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดซึ่งแสดงในรูปของความแตกต่างเฟสสูงสุด (Max Phase Difference: PDmax) จากนั้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของปลายโพลหลักพบว่ามี ความสัมพันธ์เชิงเส้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ข)) และแนวโน้มของปริมาณสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดปลายโพลใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับผลของแบบจำลองหัวเขียนมีชั้น SUL

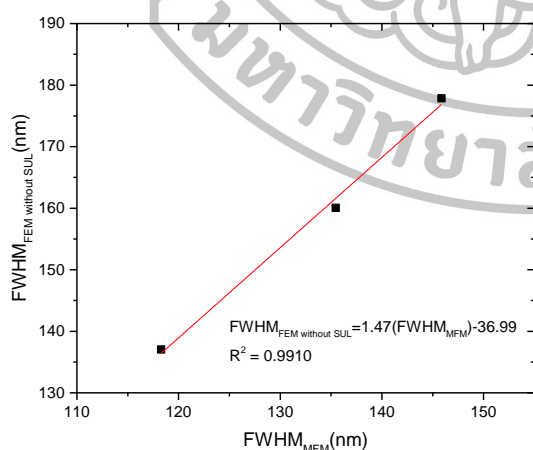


จากข้อมูลในรูปที่ 4.25 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดกับขนาดความกว้างของปลายโพลหลักสำหรับผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการวัดสนามแม่เหล็กซึ่งแสดงในรูปของค่าความแตกต่างเฟสมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน โดยสมการความสัมพันธ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

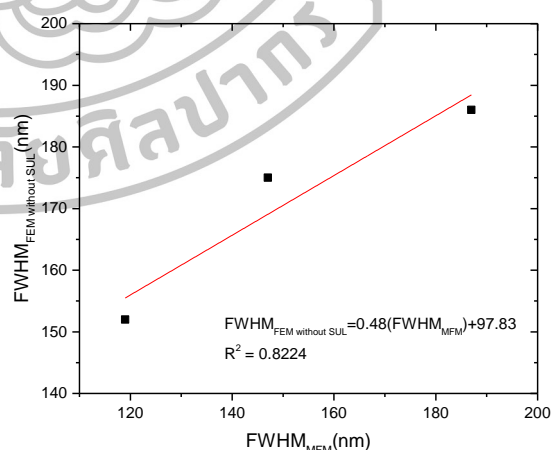
ค่าความแตกต่างของเฟสที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MFM จะเห็นว่ามิมีขนาดของการกระจายตัวสนามแม่เหล็กสอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL เนื่องจากว่าในการวัดสนามแม่เหล็กจะทำการวัดโดยการใช้ทิป MFM สแกนอยู่นอกระยะปลายโพลหลักโดยตรงซึ่งไม่มีส่วนของชั้น SUL ส่งผลให้ค่าการกระจายตัวสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL ในทางกลับกันพบว่าปริมาณสนามแม่เหล็กกลับมีแนวโน้มและสอดคล้องกับแบบจำลองที่มีชั้น SUL เนื่องจากว่าทิปของ MFM ถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กอ่อน ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับวัสดุที่นำมาใช้ผลิตชั้น SUL ส่งผลให้ปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับแบบจำลองที่มีชั้น SUL

ตารางที่ 4.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดกับขนาดความกว้าง (PW)

Linear functions	R-square
$B_{\max_{\text{FEM with SUL}}} = -0.0012(\text{PW}) + 0.9734$	0.9433
$B_{\max_{\text{FEM without SUL}}} = 0.0027(\text{PW}) + 1.6304$	0.9864
$PD_{\max_{\text{MFM}}} = 0.2420(\text{PW}) + 9.5054$	0.9998



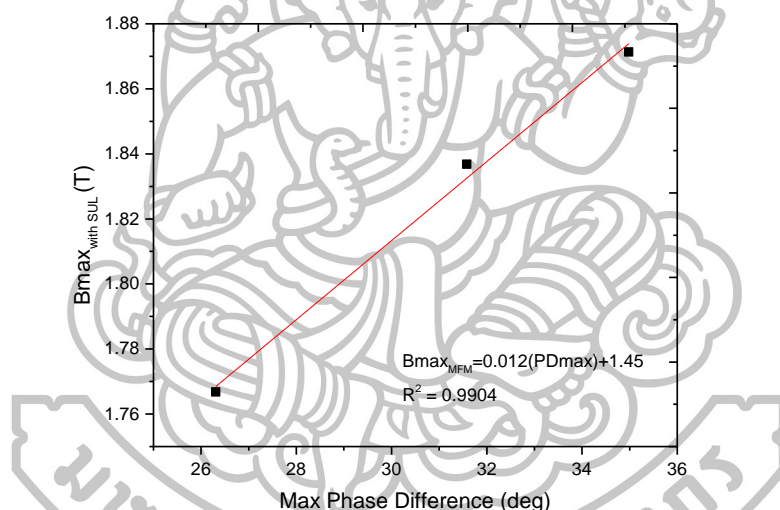
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของปลายโพลหลักของข้อมูลที่ได้จากเครื่อง MFM กับข้อมูลจาก FEM (แบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL) โดยที่ (ก) เป็นข้อมูลในแนวคอสแทร์ค และ (ข) ในแนวคาน์แทร์ค

ความสัมพันธ์ของ FWHM ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ FEM ของหัวเขี้ยวที่ไม่มีชั้น SUL กับการวัดด้วยเครื่อง MFM พบว่ามีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันซึ่งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.26 จากกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนายสมการสนามแม่เหล็กที่ได้จาก  $FWHM_{FEM \text{ without SUL}}$  ในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็คหรือ  $FWHM_{FEM \text{ without SUL}} = 1.47(FWHM_{MFM}) - 36.99$  และ  $FWHM_{FEM \text{ without SUL}} = 0.48(FWHM_{MFM}) + 97.83$  ตามลำดับ คือ 0.9910 และ 0.8224 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงระดับความน่าเชื่อถือของสมการนั้นเชื่อถือได้ ซึ่งสามารถทำนายความกว้างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขี้ยวขนาดต่างๆ ทั้งในแนวครอสแทร็คและดาวน์แทร็คได้ ดังสมการที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 (หมายเลข (2) และ (3) ตามลำดับ)



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดของปลายโพลหลักของข้อมูลที่ได้จากเครื่อง MFM (ซึ่งแสดงผลในรูปของความแตกต่างเฟส) กับข้อมูลจาก FEM (แบบจำลองที่มีชั้น SUL)

ตารางที่ 4.7 สมการทำนายและสมการสัมพันธ์

No.	สมการจาก MFM	สมการสัมพันธ์	สมการทำนาย
(1)	$FWHM_{MFM} = 0.84(PW) + 69.11$	$FWHM_{FEM} = 1.47(FWHM_{MFM}) - 36.99$	$FWHM_{Predict} = 1.23(PW) + 64.60$
(2)	$FWHM_{MFM} = 2.33(PT) - 109.49$	$FWHM_{FEM} = 0.48(FWHM_{MFM}) + 97.83$	$FWHM_{Predict} = 1.12(PT) + 45.27$
(3)	$PDmax_{MFM} = 0.2420(PW) + 9.5054$	$Bmax_{FEM} = 0.012(PDmax_{MFM}) + 1.45$	$Bmax_{Predict} = 0.003(PW) + 1.56$

ความสัมพันธ์ของปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ FEM ของหัวเขี้ยวที่มีชั้น SUL และจากการวัดด้วยเครื่อง MFM พบว่ามีค่าใกล้เคียง

และสอดคล้องกัน โดยมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.27 จากกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนายของสมการสนามแม่เหล็ก  $B_{\max_{\text{FEM with SUL}}} = 0.012(\text{PD}_{\max_{\text{MFM}}}) + 1.45$  คือ 0.9904 มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงระดับความน่าเชื่อถือของสมการนั้นเชื่อถือได้ ซึ่งสามารถทำนายปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนขนาดต่างๆ ดังสมการในตารางที่ 4.7 (หมายเลข 3)

ตารางที่ 4.7 แสดงสมการทำนายที่ได้จากการแทนค่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดด้วย MFM ลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง MFM กับ FEM จากความสัมพันธ์เชิงข้อมูลของ FWHM และ  $B_{\max}$  ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดย MFM สามารถนำมาสร้างสมการทำนายได้ โดยสมการทำนายคือการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดด้วย MFM แทนค่าในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง MFM กับ FEM ซึ่งสามารถใช้สมการทำนายในการคาดการณ์ขนาดความกว้างของข้อมูลหรือ FWHM ที่มีหัวเขียนขนาดต่างๆ และปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดที่นอกเหนือจากการทดสอบได้และสามารถเชื่อถือได้



## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR) โดยนำเอาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองจะอาศัยสมการพื้นฐานของแมกเวลล์ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของหัวเขียน PMR ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของหัวเขียน โดยอาศัยการพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือปริมาณสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักและการกระจายตัวสนามแม่เหล็ก พารามิเตอร์ที่สนใจ ได้แก่ ลักษณะของขดลวดม้วนสี่เหลี่ยมคางหมูที่บริเวณปลายโพลหลัก (TA) และหัวเขียนที่มีขนาดต่างกันเนื่องจากกระบวนการกัดเปิดผิวหน้าของสไลเดอร์ ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการควบคุมขนาดปลายโพลของหัวเขียน

แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีขนาดความกว้าง (head width) ความยาว (head length) และความหนา (head thickness) เท่ากับ  $7000 \times 9120 \times 4150$  นาโนเมตร ตามลำดับ ปลายโพลหลักมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีซิลด์ล้อมรอบ หนา 400 นาโนเมตร และผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กด้วยชั้นของแม่เหล็กอ่อน หนา 200 นาโนเมตร และมีขนาดของสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 2.4 เทสลา ซึ่งมีช่องว่างระหว่างโพลหลักกับ SUL เท่ากับ 10 นาโนเมตร คุณสมบัติของหัวเขียนจะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าหัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทรปิก

การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงขดลวด เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้กในปริมาณที่เท่ากัน 30 มิลลิแอมแปร์ พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีขดลวดแบบเกลียวให้ปริมาณความหนาแน่นแม่เหล็กสูงกว่าเมื่อเทียบกับขดลวดแบบแพนเค้ก ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดรัศมีเส้นรอบวงของขดลวด ขดลวดแบบเกลียวมีขนาดของรัศมีเส้นรอบวงของขดลวดที่แคบกว่าขดลวดแบบแพนเค้กทำให้สร้างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่า และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ความสูงต่างๆ ห่างออกจาก

ปลายโพลดำน ABS พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าลดลงแปรผกผันกับกำลังสามของระยะห่างจากโพลดำน ABS (Y Height: YH) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวเขียนยังส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงขึ้นเช่นกัน ผู้วิจัยได้ทำการจำลองโดยป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดทั้งสองตั้งแต่ 10 ถึง 100 มิลลิแอมแปร์ พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกจากปลายโพลหลักจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น โดยเป็นไปตามกฎของแอมแปร์ ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของขดลวดแบบเกลียวและแบบแพนเค้กมีจุดเริ่มอิมตัวเมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 และ 60 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ การป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำโคโพลโมเมนต์หรือแมกนีไซเซชันในวัสดุของหัวเขียนให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพลของหัวเขียน ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแบบเกลียวมีขนาดมากกว่าแบบแพนเค้ก ส่งผลให้การเหนี่ยวนำโคโพลโมเมนต์ให้มีทิศทางพุ่งเข้าหรือพุ่งออกจากปลายโพลของหัวเขียนเกิดการอิมตัวที่กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า

อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าสนใจในการควบคุมปริมาณสนามแม่เหล็กและการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในหัวเขียน PMR คือ รูปทรงของปลายโพล โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของหัวเขียนที่มีปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู รูปทรงดังกล่าวช่วยลดความไม่สมมาตรที่เกิดจากมุมเอียง เนื่องจากแทร็คข้อมูลถูกเขียนทับพอดีในกระบวนการขับเคลื่อนของหัวเขียนเหนือแผ่นบันทึกแม่เหล็ก เมื่อปลายโพลหลักมีขนาดของมุม TA ต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึง 14 องศา พบว่าหัวเขียนที่มีมุม TA มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้นที่บริเวณใกล้ขอบของ TS ซึ่งสนามแม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวเป็นสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล ปลายโพลหลักที่มีมุม TA เท่ากับ 0 องศา ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะพุ่งกระจายไปทุกๆ ด้านที่เท่ากัน แต่เมื่อมุม TA มีค่าเท่ากับ 14 องศา จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นใกล้บริเวณขอบของ TS การเปลี่ยนแปลงของมุม TA ยังพบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ขอบของ LS ลดลงเมื่อหัวเขียนมีมุม TA เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณดังกล่าวจะช่วยลดปัญหาการรบกวนหรือการเขียนทับข้อมูลในแทร็คข้อมูลข้างเคียง

เมื่อมุม TA มีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของพีการกระจายตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือ FWHM มีค่าน้อยลง ซึ่งค่า FWHM จะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของการเขียนข้อมูล ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (Bmax) ที่มุม TA แตกต่างกัน ตั้งแต่ 2 ถึง 14 องศา พบว่ามุม TA ของโพลหัวเขียนจะส่งผลถึงปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กด้วยเช่นกัน โพลหัวเขียนที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าโพลหัวเขียนรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยโพลหัวเขียนจะมี

ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากที่สุดเมื่อมุม TA มีค่าเท่ากับ 4 องศา แต่เมื่อมุม TA เพิ่มขึ้น ปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะลดลงเล็กน้อย การออกแบบหัวเขียนให้มีลักษณะปลายโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู นอกจากช่วยลดความไม่สมมาตรของข้อมูลที่เกิดจากมุมเอียงแล้ว ยังจะช่วยเพิ่มปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและลดขนาดของข้อมูลให้เล็กลงด้วย

เนื่องจากหัวเขียนจะถูกออกแบบมาให้บินเป็นมุมเอียง ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กกับเส้นรอบวงของเทร็ค โดยจะบินอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 องศา และจากผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา หัวเขียนที่ให้สนามแม่เหล็กสูงสุดที่อยู่ระหว่างช่วงดังกล่าว คือหัวเขียนที่มีมุม TA เท่ากับ 10 และ 14 องศา แต่เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก พบว่าที่มุม TA เท่ากับ 14 องศา ให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ขอบของ TS สูงและสนามแม่เหล็กที่ LS ต่ำ (สนามแม่เหล็กที่ขอบของ LS ถ้ามีค่ามากจะส่งผลทำให้ไปรบกวนหรือเขียนทับข้อมูลในเทร็คข้างเคียงที่ถูกเขียนไว้บนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก) เมื่อเทียบกับมุม TA เท่ากับ 10 ดังนั้นในการทดลองสำหรับการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดปลายหัวเขียนที่เกิดจากกระบวนการกัดเปิดผิวหน้าของสไลด์เจอร์จึงเลือกใช้หัวเขียนทำมุม TA ที่ 14 องศา

เมื่อทำการกัดสไลด์เจอร์ด้วยความลึกที่มากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดความสูง PH หรือความสูงทรอท (TH) ของปลายโพลจะค่อยๆ ลดลง ขนาดของหัวเขียนมีค่าความกว้าง PW และความหนา PT เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของมุมซีเซล (CA) และมุมเบเวล (BA) จากการจำลองพบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีความสูง PH ลดลงและความกว้าง PW เพิ่มขึ้น การลดลงของความสูง PH ทำให้จำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโคโรฟพุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดด้าน ABS เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบหัวเขียนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานสุทธิต่อระบบลดลง ในขณะที่เดียวกันพื้นที่หน้าตัดของปลายโพลที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านตั้งจากพื้นที่หน้าตัดได้มากขึ้น ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กทั้งสองจะส่งเสริมกันส่งผลทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรวมมีค่ามาก ขนาดของปลายโพลด้าน ABS เป็นตัวกำหนดขนาดของบิตข้อมูล โดยบิตข้อมูลจะสัมพันธ์กับขนาดความกว้างของการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ในการออกแบบหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หัวเขียนที่ดีจะต้องมีปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงซึ่งการเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดปลายโพลเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ แต่หัวเขียนจะต้องให้ขนาดความกว้างข้อมูลบิต (ขนาดความกว้างข้อมูลบิตจะสัมพันธ์กับความกว้างของการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวครอสเทร็ค) ที่แคบลงด้วยเนื่องจากต้องการลดความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ในแผ่นบันทึก ดังนั้นการเพิ่มขนาดความกว้าง PW (แนวครอสเทร็ค) ของหัวเขียนจึงไม่เป็นผลที่ดีนักถึงแม้ว่าจะให้ความหนา

แน่นพลาซมาแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นก็ตาม หัวเขียนจึงจำเป็นจะต้องออกแบบให้มีความหนาของปลายโพล (PT) ที่หนาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลาซมาแม่เหล็กในการบันทึกข้อมูล

การศึกษานามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนของกระบวนการวัดสนามแม่เหล็กด้วย เครื่อง MFM ซึ่งจะแสดงผลการวัดในรูปแบบของความแตกต่างของเฟส พบว่าการกระจายตัวของ ความแตกต่างเฟสเพิ่มขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดปลายโพลกว้างขึ้นเช่นเดียวกันกับผลของการกระจาย ตัวความหนาแน่นพลาซมาแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อหัว เขียนมีขนาดปลายโพลกว้างขึ้น ค่าความแตกต่างของเฟสที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MFM จะเห็นว่า มีขนาดของการกระจายตัวสนามแม่เหล็กสอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL เนื่องจากว่าในการวัดสนามแม่เหล็กจะทำการวัดโดยใช้ทาบ MFM สแกนอยู่เหนือบริเวณปลาย โพลหลักโดยตรงซึ่งไม่มีส่วนของชั้น SUL ส่งผลให้ค่าการกระจายตัวสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับ แบบจำลองที่ไม่มีชั้น SUL ในทางกลับกันพบว่าปริมาณสนามแม่เหล็กกลับมีแนวโน้มและ สอดคล้องกับแบบจำลองที่มีชั้น SUL เนื่องจากว่าทาบ MFM ถูกเคลือบด้วยสารแม่เหล็กอ่อน ซึ่งมี คุณสมบัติเช่นเดียวกันกับวัสดุที่นำมาใช้ผลิตชั้น SUL ส่งผลให้ปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่มีชั้น SUL

ความสัมพันธ์เชิงข้อมูลของ FWHM และ  $B_{max}$  ที่ได้จากแบบจำลอง FEM และที่ได้ จากการวัดค่าจริง โดย MFM สามารถนำมาสร้างสมการทำนายได้ โดยสมการทำนาย คือ การนำเอา ผลลัพธ์ที่ได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดด้วย MFM แทนค่าในสมการความสัมพันธ์ระหว่าง MFM กับ FEM ซึ่งสามารถใช้สมการทำนายในการคาดการณ์ขนาดความกว้างของข้อมูลหรือ FWHM ที่มีหัวเขียนขนาดต่างๆ และปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุดที่นอกเหนือจากการทดสอบได้และ สามารถเชื่อถือได้

การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในหัวเขียน PMR โดยแบบจำลอง ทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับผล การทดลอง รวมถึงใช้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ ในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงแบบจำลองในอุดมคติเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่มีขนาดปลาย โพลหลักต่างกันด้วยกระบวนการขจัดเปิดผิวหน้าที่มีความเรียบเท่ากันตลอดพื้นผิวของหัวเขียน พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการวัดด้วยเครื่อง MFM ในอนาคตเราสามารถที่จะพัฒนาแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาทดลองและศึกษาถึงผลของปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตอื่นๆ เช่น การขจัดเปิดผิวหน้าสไลเดอร์ที่ทำให้หัวเขียนมีความเรียบไม่สม่ำเสมอ กระบวนการการกัดที่ทำให้ ปลายโพลหลักมีความลึกของปลายโพลมากกว่าซิลด์ล้อมรอบ เป็นต้น

นอกจากนี้แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้ทำนายสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียน PMR ที่ออกแบบขึ้นก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์นั้นจริง ดังนั้นแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์จึงเป็นเครื่องมือสำคัญชิ้นหนึ่งที่นอกจากช่วยสร้างความเข้าใจพฤติกรรมทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นแล้วยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง





### รายการอ้างอิง

- [1] H. J. Richter. (2009). "Density limit imposed by the microstructure of magnetic recording media." **J. Magn. Magn.** 321: 467–476.
- [2] S. H. Charap, P.-L. Lu and Y. He. (1997). "Thermal Stability of Recorded Information at High Densities." **IEEE Trans. Magn.** 33, 1: 978-983.
- [3] M. H. Kryder, W. Messner and L. R. Carley. (1996). "Approaches to 10 Gbit/in<sup>2</sup> recording." **J. Appl. Phys.** 79, 8: 4485.
- [4] S. N. Piramanayagama. (2007). "Perpendicular recording media for hard disk drives." **J. Appl. Phys.** 102: 011301.
- [5] J. George and Y. Fan. (1960). "Analysis of a Practical Perpendicular Head for Digital Purposes." **J. Appl. Phys.** 31: S402.
- [6] H. N. Bertram and M. Williams. (2000). "SNR and density limit estimates: a comparison of longitudinal and perpendicular recording." **IEEE Trans. Magn.** 36, 1(January): 4-9.
- [7] R. Wood. (2000). "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch." **IEEE Trans. Magn.** 36, 1(January): 36–42.
- [9] K. Yamakawa and others. (2010). "High field-gradient design of Single-Pole Write-Head with planar pole structure." **IEEE Trans. Magn.** 46, 3(March): 730-737.
- [9] M. Mochizuki and others. (2001). "Study on the write-field profile and intensity of narrow-track-width SPT head." **J. Magn. Magn.** 235: 191–195.
- [10] A. Morinaga and others. (2008). "Adjacent track interference analysis of shielded perpendicular writers." **J. Magn. Magn.** 320: 2955–2958.
- [11] S. J. Greaves, Y. Kanai and H. Muraoka. (2005). "Simulations of Perpendicular Media for 400 Gb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 41, 2 (February): 713-718.

- [12] 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.
- [13] D. Z. Bai and others. (2010). "High Density Perpendicular Recording With Wrap-Around Shielded Writer." **IEEE Trans. Magn.** 46, 3 (March): 722-729.
- [14] Y. Kanai and others. (2003). "Recording Field Analysis of Narrow-Track SPT Head With Side Shields, Tapered Main Pole and Tapered Return Path for 1 Tb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 39, 4 (July): 1955-1960.
- [15] D. Z. Bai and J.-G. Zhu. (2003). "Stitched pole-tip design with enhanced head field for perpendicular recording." **J. Appl. Phys.** 93, 10 (May): 6540– 6542.
- [16] M. Oshiki. (2012). "Review of perpendicular magnetic recording research at Fujitsu." **J. Magn. Magn.** 324: 351–354.
- [17] M. Mallary, A. Torabi and M. Benakli. (2002). "One Terabit per Square Inch Perpendicular Recording Conceptual Design." **IEEE Trans. Magn.** 38, 4 (July): 1719-1724.
- [18] D. Z. Bai and J.-G. Zhu. (2002). "Micromagnetics of perpendicular write heads with extremely small pole tip dimensions." **J. Appl. Phys.** 91, 10 (May): 6833– 6835.
- [19] J. Heidmann and A.M. Taratorin. (2011). "Magnetic Recording Heads." **Handbook of Magnetic Materials** 19.
- [20] K. Bartusek and others. (2011). "Magnetic Susceptibility Modelling Using ANSYS." **PIERS Proceedings**, (March): 20-23.
- [21] Y. Kanai and K. Yamakawa. (2009). "Narrow-track perpendicular write heads." **J. Magn. Magn.** 321: 518–525.

- [22] S. N. Piramanayagama. (2007). "Perpendicular recording media for hard disk drives." **J. Appl. Phys.** 102: 011301-3.
- [23] D. Weller and A. Moser. (1999). "Thermal Effect Limits in Ultrahigh-Density Magnetic Recording." **IEEE Trans. Magn.** 35, 6 (November): 4423-4439.
- [24] S. Batra and others. (2004). "Investigations of Perpendicular Write Head Design for 1 Tb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 40, 1 (January): 319-325.
- [25] A. Moser and D. Weller. (2001). "Thermal effects in high-density recording media." in **The physics of ultra-high density magnetic recording**, 144-174. New York: Springer.
- [26] J. Heidmann and A.M. Taratorin. (2011). "Magnetic Recording Heads." **Handbook of Magnetic Materials** 19.
- [27] K. Z. Gao, O. Heinonen and Y. Chen. (2009). "Read and write processes, and head technology for perpendicular recording." **J. Magn. Magn.** 321: 495–507.
- [28] R. Wood. (2000). "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch." **IEEE Trans. Magn.** 36, 1 (January): 36–42.
- [29] S. Khizroev and D. Litvinov. (2004). **Perpendicular Magnetic Recording**, 5-15. New York: Kluwer Academic Publishers.
- [30] สิทธิพร กฤษะสาร. (2011) **หนังสือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สำหรับการผลิต**. การศึกษาอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [31] Artem Rubtsov. **HDD from inside: Tracks and Zones. How hard it can be**. Accessed August 6, 2016. Available from [http://hddscan.com/doc/HDD\\_Tracks\\_and\\_Zones.html](http://hddscan.com/doc/HDD_Tracks_and_Zones.html)

- [32] K. Miura, E. Yamamoto, H. Aoi, and H. Muraoka. (2011). "Skew angle effect in shingled writing magnetic recording." **Physics Procedia** 16: 2–7.
- [33] Kanu G. Ashar. "Magnetic Disk Drive Technology." **IEEE Press** (1997): 46-51.
- [34] S. Khizroev and D. Litvinov. (2004). "Perpendicular magnetic recording: Writing process." **J. App. Phy.** 95, 9 (May): 4521-4537.
- [35] R. Wood. (2000). "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch." **IEEE Trans. Magn.** 36 (January): 36–42.
- [36] Victora and others. (2002). "Micromagnetic model of perpendicular head and double-layer media for 100 Gb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 38, 1 (January): 181-185.
- [37] Yamakawa and others. (2001). "Single-pole Recording Design for 100 Gbps Perpendicular Magnetic Recording." **J.M.M.M.** 235: 354-361.
- [38] M. S. Patwari and Randall H. (2004). "Unshielded Perpendicular Recording Head for 1 Tb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 40, 1 (January): 247-252.
- [39] Victora and others. (2002). "Micromagnetic model of perpendicular head and double-layer media for 100 Gb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 38, 1 (January): 181-185.
- [40] K.Tanaka and K. Wa. (2009). **Method of manufacturing magnetic head slider.** U.S Patent no.7,634,850 B2, 22 Dec. 2009.
- [41] ปภากร พิทยชวาล และวิวัฒน์ ยิ่งสุทธิพันธุ์. (2557). "การวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความผันแปรของความต้านทานในกระบวนการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์." **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี** 16, 2: 38-46.
- [42] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber. (1986). "Atomic Force Microscope." **Phys. Rev. Lett.** 56.

- [43] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe. (1987). "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution." **Appl. Phys. Lett.** 50: 1455-1457.
- [44] M. Mochizuki and others. (2001). "Study on the write-field profile and intensity of narrow-track-width SPT head." **J. Magn. Magn.** 235: 191-195.
- [45] Y. Kanai and others. (2005). "Single-Pole-Type head showing a large recording field suitable for 1 Tbps with discrete track media." **J. Magn. Magn.** 287: 367-366.
- [46] L. Wang, D.Z. Bai and J. Wang. (2012). "Finite Element Modeling of Head design for Shingled Recording." **IEEE Trans. Magn.** 48, 11(November): 3551-3554.
- [47] B. D. Collity and C. D. Graham. (2009). **Introduction to magnetic materials.** IEEE Press.
- [48] J. Heidmann and A.M. Taratorin. (2011). "Magnetic Recording Heads." **Handbook of Magnetic Materials** 19.
- [49] S. J. Greaves and others. (2008). "Magnetic Recording in Patterned Media at 5-10 Tb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 44, 11 (November): 3430-3433.
- [50] K. Yamakawa and others. (2010). "High Field-Gradient Design of Single-Pole Write-Head With Planar Pole Structure." **IEEE Trans. Magn.** 46, 3 (March): 730-737.
- [51] Y. Kanai and others. (2003). "Recording Field Analysis of Narrow-Track SPT Head With Side Shields, Tapered Main Pole, and Tapered Return Path for 1 Tb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 39, 4 (July): 1955-1960.
- [52] D. Z. Bai and J.-G. Zhu. (2003). "Stitched pole-tip design with enhanced head field for perpendicular recording." **J. Appl. Phys.** 93, 10 (May): 6540- 6542.
- [53] M. Oshiki. (2012). "Review of perpendicular magnetic recording research at Fujitsu." **J. Magn. Magn.** 324: 351-354.

- [54] M. Mallary, A. Torabi and M. Benakli. (2002). "One Terabit per Square Inch Perpendicular Recording Conceptual Design." **IEEE Trans. Magn.** 38, 4 (July): 1719-1724.
- [55] D. Z. Bai and J.-G. Zhu. (2002). "Micromagnetics of perpendicular write heads with extremely small pole tip dimensions." **J. Appl. Phys.** 91, 10 (May): 6833– 6835.
- [56] J. Heidmann and A.M. Taratorin. (2011). "Magnetic Recording Heads." **Handbook of Magnetic Materials** 19.
- [57] A. Morinaga and others. (2008). "Adjacent track interference analysis of shielded perpendicular writers." **J. Magn. Magn.** 320 : 2955–2958.
- [58] S. J. Greaves, Y. Kanai and H. Muraoka. (2005). "Simulations of Perpendicular Media for 400 Gb/in<sup>2</sup>." **IEEE Trans. Magn.** 41, 2 (February): 713-718.
- [59] 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.
- [60] D. Z. Bai and others. (2010). "High Density Perpendicular Recording With Wrap-Around Shielded Writer." **IEEE Trans. Magn.** 46, 3 (March): 722-729.
- [61] Y. Kanai and K. Yamakawa. (2009). "Narrow-track perpendicular write heads." **J. Magn. Magn.** 321,: 518–525.
- [62] M.A. Bashir and others. (2012). "Head and bit patterned media optimization at areal densities of 2.5 Tbit/in<sup>2</sup>." **J. Magn. Magn.** 324: 269-275.
- [63] T. Schrefl and others. (2005). "Partitioning of the Perpendicular Write Field Into Head and SUL Contributions." **IEEE Trans. Magn.** 41, 10: 3064-3066.
- [64] J. Heidmann and A.M. Taratorin. (2011). "Magnetic Recording Heads" **Handbook of Magnetic Materials** 19.

- [65] S. Khizroev and D. Litvinov. (2004). **Perpendicular Magnetic Recording**. New York: Kluwer Academic Publishers.
- [66] A. Taratorin. (2004). **Magnetic Recording Systems and Measurement**. Guzik Technical Enterprises.
- [67] อัจฉรา โฉมหน้า. (2558). “กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงปริมาณสำหรับหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร





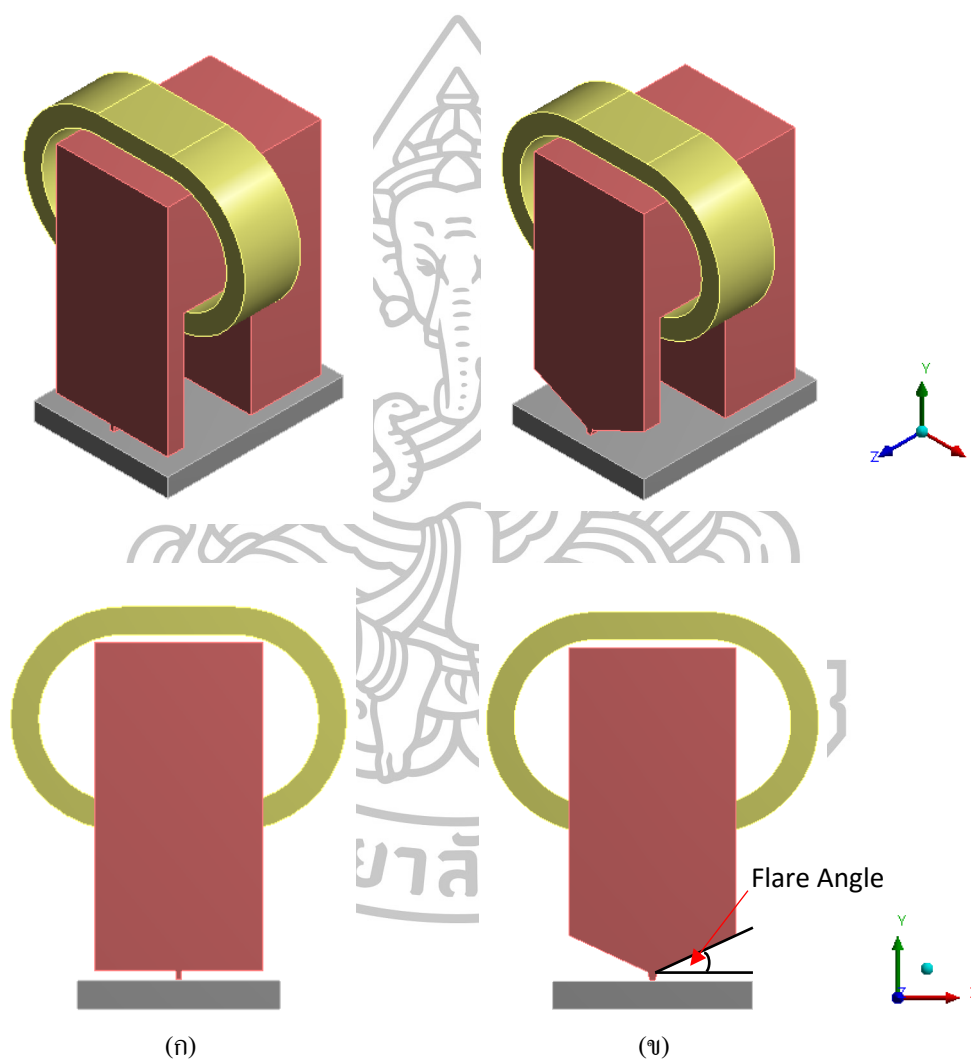
ภาคผนวก

แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่าย



## การสร้างแบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่ายด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับปัญหาที่จะนำมาจำลองนั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กจากแบบจำลองสามมิติของหัวเขียน PMR อย่างง่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมแฟลร์ (flare angle) ลักษณะของแบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ ก.1

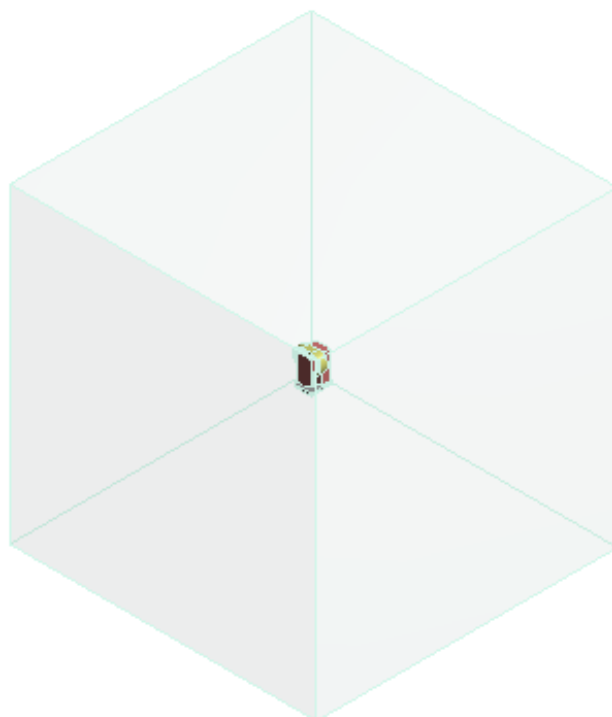


รูปที่ ก.1 แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่าย (ก) ไม่มีมุมแฟลร์ และ (ข) มีมุมแฟลร์

### 1. การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์

แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งผลิตจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน โดยขดลวดที่พันรอบหัวเขียนมีจำนวนรอบเท่ากับ 1 รอบต่อพื้นที่นำกระแสไฟฟ้า  $7.58 \times 10^{-12}$  ตารางเมตร และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเท่ากับ 1 แอมแปร์ ขดลวดจะผลิตจากโลหะผสมทองแดง

มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 1 ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยสร้างผิวปิดคลุมแบบจำลองหัวเขียนไว้ มีระยะจากขอบแบบจำลองกับขอบของผิวปิดเป็น 30 ไมโครเมตร ในทุกด้านเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ ก.2 ซึ่งภายในผิวปิดจะกำหนดให้เป็นอากาศ การกระจายของสนามแม่เหล็กที่ทำการคำนวณจะมีขอบเขตอยู่ในบริเวณผิวปิดนี้เท่านั้น และภายนอกผิวปิดจะไม่มีกระจายของสนามแม่เหล็ก

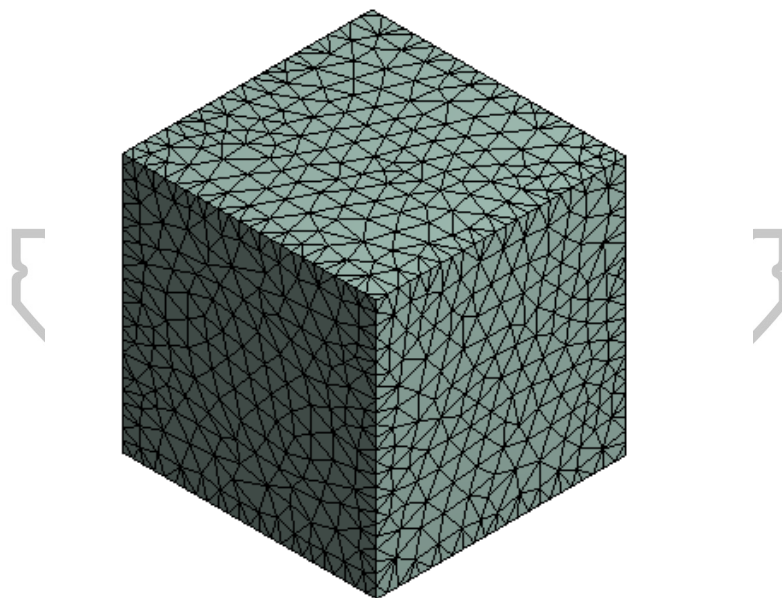
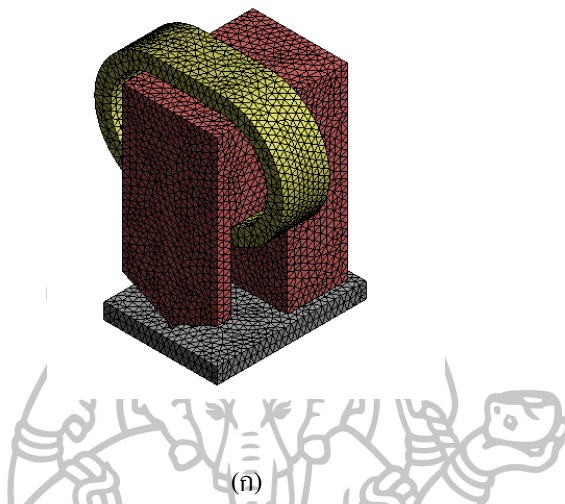


รูปที่ ก.2 แบบจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่ายที่อยู่ภายในผิวปิด

สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง จะอยู่ภายใต้สมมติฐานว่า หัวเขียนมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียวแบบไอโซโทโรปิก (isotropic) และมีค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 2.4 เทสลา และผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลด้วยชั้น SUL ที่มีสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเท่ากับ 2.4 เทสลา

จากนั้นทำการสร้างเมช (mesh) โดยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์สำเร็จรูปจะทำการสร้างและกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานของโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมได้สร้างเอลิเมนต์บนหัวเขียนและผิวปิดที่คลุมหัวเขียนเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า แสดงดังรูปที่ ก.3

เมื่อทำการกำหนดค่าต่าง ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อวิเคราะห์หาผลเฉลยของความหนาแน่นพลาซมาแม่เหล็ก

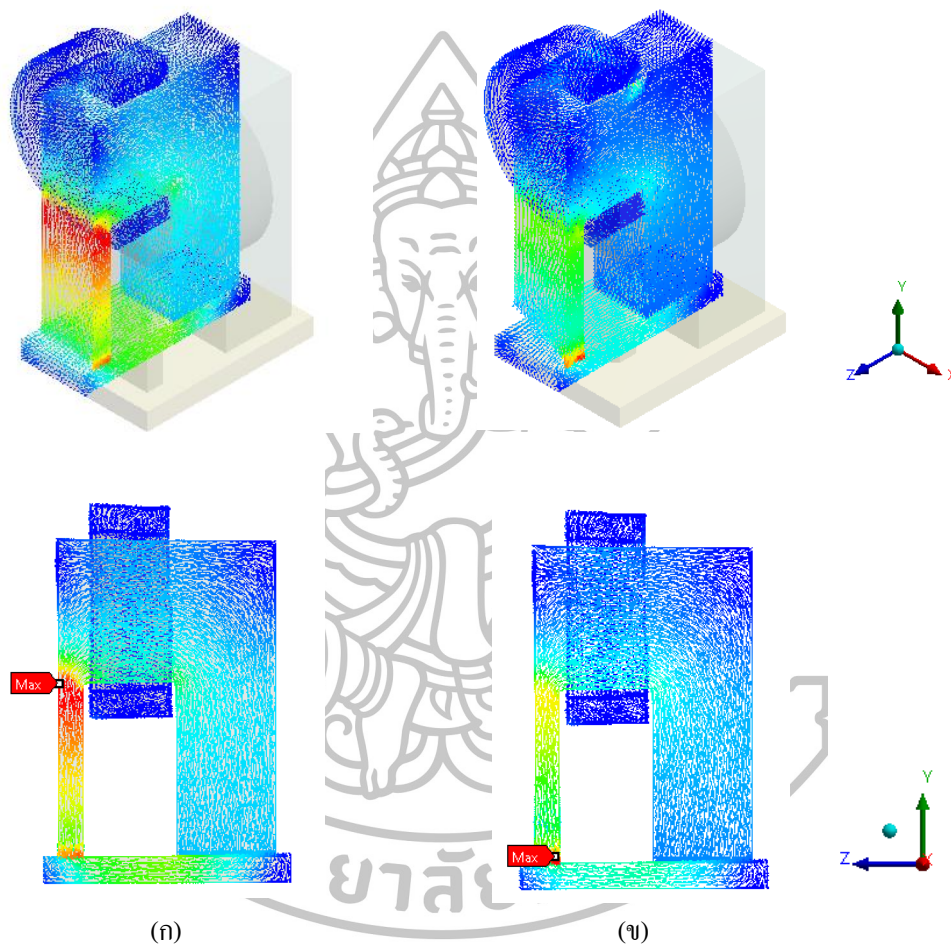


(ข)

รูปที่ ก.3 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองหัวเข็มนาฬิกา PMR อย่างง่าย

ผลการจำลองความหนาแน่นพลาซมาแม่เหล็กของหัวเข็มนาฬิกา PMR อย่างง่ายแสดงดังรูปที่ ก.4 โดยรูปที่ ก.4(ก) แสดงผลการจำลองของแบบจำลองหัวเข็มนาฬิกา PMR อย่างง่ายที่ไม่มีมุมแฟลร์

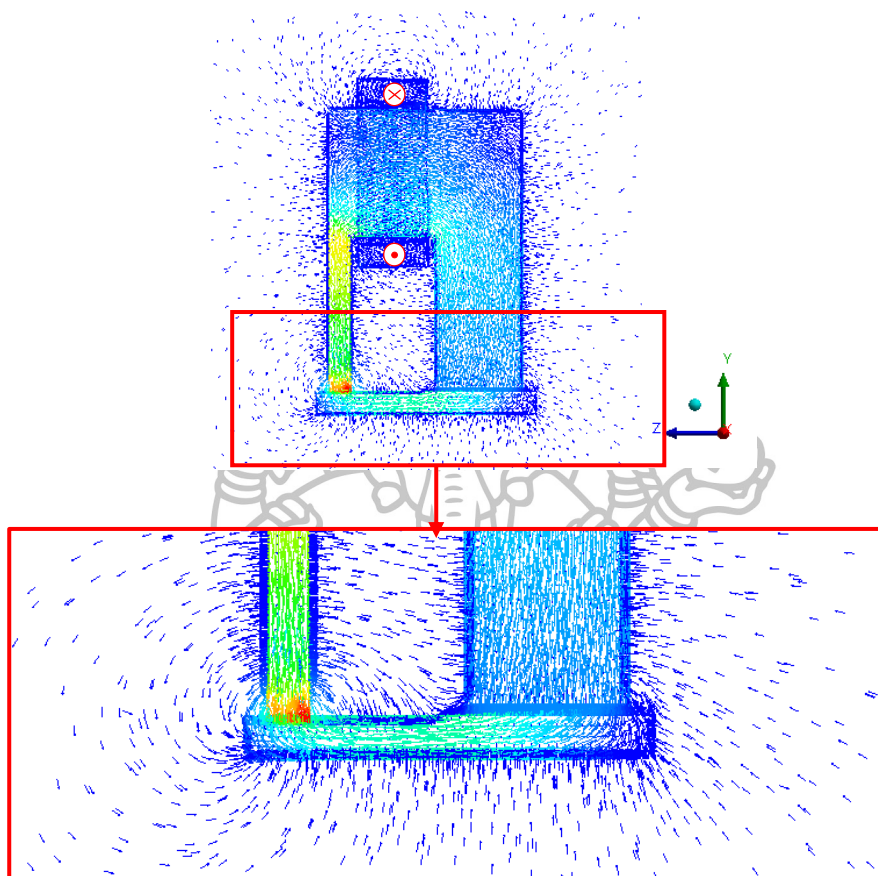
จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะอยู่บริเวณเหนือปลายโพลหลัก แต่เมื่อหัวเขียน PMR อย่างง่ายได้มีการจำลองให้มีมุมแฟลร์ พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะอยู่ที่ปลายโพลหลัก ดังแสดงในรูปที่ ก.4(ข) จากรูปลูกศรสีแดงแทนปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงและสีน้ำเงินแสดงปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำ



รูปที่ ก.4 ผลการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR อย่างง่าย โดยที่ (ก) ไม่มีมุมแฟลร์ และ (ข) มีมุมแฟลร์

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดในทิศทางพุ่งเข้าหน้ากระดาษ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายในโพลเขียน โดยเส้นทางฟลักซ์แม่เหล็กแสดงดังรูปที่ ก.5 พบว่าเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งตั้งฉากออกจากปลายโพลหลักวิ่งเข้าชั้น SUL แล้วพบว่าฟลักซ์แม่เหล็กจะย้อนกลับไปยังโพลย้อนกลับ จากรูปจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลหลักจะมีค่าสูงกว่าที่ปลายโพลย้อนกลับมาก เนื่องจากปลายโพลย้อนกลับมีขนาดใหญ่กว่าปลายโพลหลัก

หลายเท่า ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่ย้อนกลับไปยังโพลย้อนกลับมีปริมาณน้อยไม่เกิดการรบกวนข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้แล้วในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก



รูปที่ ก.5 เส้นทางฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียน PMR อย่างง่ายที่มีมุมแฟลร์

จากผลการจำลองหัวเขียน PMR อย่างง่าย ที่ใช้ศึกษาผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากการมีมุมแฟลร์ เราสามารถสรุปได้ว่าการมีมุมแฟลร์นั้นจะช่วยส่งเสริมให้หัวเขียน PMR มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่บริเวณปลายโพลหลัก ซึ่งมีความจำเป็นมากสำหรับหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

### ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล : นางสาวอิสรา คอเกาะ

วัน/เดือน/ปีเกิด : 2 ธันวาคม 2532

ที่อยู่ : 197 ถนน วิษุรุทิส 1 ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

ประวัติการศึกษา :

พ.ศ. 2551 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2555 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยศิลปากร

