



การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีรูปแบบซิดด์แม่เหล็กต่างกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาตรีมหาบัณฑิต

ภาควิชาภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเจียนแม่เหล็กที่มีรูปแบบซิลด์แม่เหล็กต่างกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

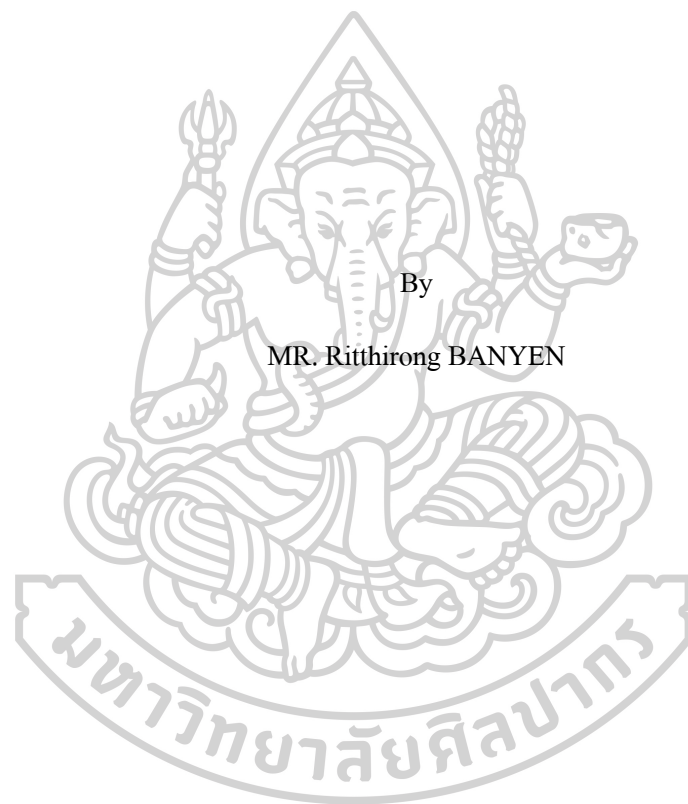
ภาควิชาภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF A MAGNETIC WRITE HEAD WITH
DIFFERENT MAGNETIC SHIELD DESIGNS



By
MR. Ritthirong BANYEN

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements

for Master of Science (PHYSICS)

Department of PHYSICS

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

55306205 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : หัวเขียนบันทึกข้อมูลแนวตั้ง หัวเขียนแบบมีซิลด์ล้อมรอบ การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

นาย ฤทธิรงค์ บานเย็น: การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเขียนแม่เหล็กที่มีรูปแบบซิลด์แม่เหล็กต่างกัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งที่ใช้ในงานด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทั่วไป โพลหลักจะถูกล้อมรอบด้วยซิลด์แม่เหล็กเพื่อที่จะลดการขยายตัวของสนามแม่เหล็กรั่วไหลและเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในวิทยานิพนธ์นี้การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ถูกใช้ในการศึกษาผลของซิลด์แม่เหล็กและช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักที่มีต่อประสิทธิภาพของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก แบบจำลองสามมิติของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กที่มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใกล้เคียงกับหัวเขียนที่ใช้อยู่ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษานี้ โดยส่วนแรกทำการศึกษาหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีรูปแบบของซิลด์แม่เหล็กต่างกัน ได้แก่ ซิลด์ด้านหลัง ซิลด์ด้านข้าง ซิลด์ล้อมรอบ และซิลด์ล้อมรอบแบบเต็มเปรียบเทียบกับหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ไม่มีซิลด์ ผลการสร้างแบบจำลองแสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับการขยายตัวของสนามแม่เหล็กรั่วไหล แม้ว่าซิลด์แม่เหล็กจะช่วยลดการขยายตัวของสนามแม่เหล็กรั่วไหล แต่ในขณะเดียวกันก็ลดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างออกมาจากโพลหลัก และได้ทำการศึกษาผลกระทบจากขนาดของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลัก โดยใช้หัวเขียนแบบมีซิลด์ล้อมรอบ พบว่า เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงด้วย และสุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองกับผลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็มที่มีขนาดของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักต่างกันทั้ง 3 ช่อง ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความกว้างของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการสร้างแบบจำลองแบบมีชั้นของสารแม่เหล็กอ่อนสอดคล้องกับผลการวัดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นอย่างดี

55306205 : Major (PHYSICS)

Keyword : perpendicular magnetic recording wrap around shield finite element simulation

MR. Ritthirong BANYEN: Finite element simulations of a magnetic write head with different magnetic shield designs Thesis advisor : Badin Damrongsak, Ph.D.

Perpendicular magnetic write heads used in hard disk drive applications was generally composed of a main write pole surrounded by magnetic shields in order to reduce the fringing field expansion and thus improve area storage density of a hard disk drive. In this thesis, finite element simulations based on Maxwell's equations was employed to investigate the effects of magnetic shields and spacing gaps on the performance of the magnetic write heads. A three dimensional magnetic write head, having almost all parameters close to the actual device, was constructed in this study. In the first study, the different types of magnetic shields, including trailing shield (TS), side shield (SS), wrapped around shield (WAS) and fully wrapped around shield (FWAS) designs, were investigated and compared with the write head without any magnetic shield, called single pole (SP) design. Simulation results revealed the trade-off between magnetic flux density and the fringing field expansion. Although the magnetic shields offered a reduction of the fringing field expansion, they decreased the intensity of the magnetic field generated from the main write pole. The effect of the spacing gaps between the main pole and the magnetic shields was also investigated, only for the magnetic write head with a FWAS design. Results showed that when the spacing gap between the main pole and magnetic shields was reduced, the magnetic field gradient increased, but, on the other hand, the intensity of magnetic field decreased. In the last section, we compared simulation results with experimental results obtained from magnetic force microscopy (MFM). The FWAS magnetic write heads with three different spacing gaps were evaluated. A comparison showed that the magnetic field intensity and the field width obtained from the simulations with a soft under layer had a similar trend to results from MFM measurements.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของ อาจารย์ จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภทริยา คำรงค์ดี ประธานกรรมการตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มยุรี หาญสุภานุสรณ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สมบูรณ์ถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนวัสดุและ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตลอดการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณอิทธิพล เชาว์ว่าณิชย์ ผู้จัดการอาวุโส แผนก ปฏิบัติการหัวอ่าน/เขียน คุณกานต์ แสงแก้ว ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมทดสอบผลิตภัณฑ์ และคุณ จักรกฤษณ์ สุภาวสุทธิ์ ผู้อำนวยการระดับสูง ตลอดจนพนักงานทุกท่านที่คอยให้ความร่วมมือและ ความเป็นมิตรในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนในการวิจัยให้ลุล่วงไปเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเพื่อนและน้อง ๆ ร่วมหลักสูตรทุกคนที่คอย แลกเปลี่ยนความรู้ ตลอดจนให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกื้อกูลด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่มอบโอกาสทางการศึกษาตลอดจนคอย ช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณที่มาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้กับ บิดา มารดา คณาจารย์ และบุคคลที่มีความเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ทุกท่าน เพื่อทดแทนพระคุณที่ให้ความช่วยเหลือให้ ผู้วิจัยสำเร็จการศึกษานี้

ฤทธิรงค์ บานเย็น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	8
2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	9
2.1.2 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	13
2.2 ทฤษฎีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	14
2.2.1 วัสดุแม่เหล็ก.....	15
2.2.1.1 พื้นฐานแม่เหล็ก.....	15
2.2.1.1.1 ไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipole)	15

2.2.1.1.2	เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (magnetic field vector).....	16
2.2.1.1.3	จุดกำเนิดของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment)	18
2.2.1.2	สถานะแม่เหล็ก (magnetism).....	19
2.2.1.2.1	ไดอะแมกเนติกิซึม (diamagnetism).....	19
2.2.1.2.2	พาราแมกเนติกิซึม (paramagnetism).....	20
2.2.1.2.3	แอนติเฟอร์โรแมกเนติกิซึม (antiferromagnetism).....	20
2.2.1.2.4	เฟอร์โรแมกเนติกิซึม (ferromagnetism).....	22
2.2.1.2.5	เฟอร์ริแมกเนติกิซึม (ferrimagnetism).....	22
2.2.2	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	23
2.2.3	กระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก.....	25
2.2.4	คุณสมบัติของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งที่ดี.....	26
2.2.4.1	ความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูง (high peak field).....	26
2.2.4.2	เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กที่สูง (high field gradient).....	27
2.2.4.3	การลบแทร็คด้านข้าง (side track erasure : STE) หรือสนามแม่เหล็กบริเวณ โพลย้อนกลับ (return pole field) ที่ต่ำ.....	27
2.2.4.4	การลบแทร็คที่อยู่ติดกัน (adjacent track erasure : ATE) หรือสนามแม่เหล็ก ออกนอกแทร็ค (off-track field) ที่ต่ำ.....	27
2.2.4.5	ความเข้มสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์ (robustness to stray fields)	28
2.2.4.6	ตอบสนองกับความถี่ที่ดี.....	28
2.2.4.7	การลบข้อมูลหลังการเขียน (erase after write : EAW) หรือสนามแม่เหล็กคง ค้างในหัวเขียน (remnant head field) ที่ต่ำ.....	29
2.3	สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)	30
2.4	วงจรแม่เหล็กสมมูลของหัวเขียน (equivalent magnetic circuit for write head)	30
2.5	การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	32

2.5.1 ทฤษฎี	32
2.5.2 การแก้ปัญหาการนำกระแสไฟฟ้า.....	32
2.5.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	33
2.5.4 การแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับเวลา	33
2.5.5 กระบวนการแก้ปัญหา	34
2.6 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy : MFM).....	35
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 การทดสอบโปรแกรมสำเร็จรูปด้วยแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์.....	39
3.1.1 แบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์	39
3.1.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม.....	41
3.1.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมและจากการคำนวณ	43
3.2 การจำลองหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	45
3.2.1 แบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก.....	46
3.2.2 คุณสมบัติของสาร	46
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไข.....	47
3.2.4 การสร้างเอลิเมนต์.....	48
3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	50
3.2.5.1 การพิจารณาข้อมูลบนระนาบ.....	50
3.2.5.2 ข้อมูลในรูปแบบของเส้น	51
บทที่ 4 การวิเคราะห์สนามความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง.....	52
4.1 ผลของรูปแบบซิลด์ที่แตกต่างกันต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน.....	52
4.2 ศึกษาผลของขนาดช่องว่างต่อหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม	57

4.2.1 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านหน้า.....	57
4.2.2 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านข้าง.....	61
4.2.3 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านหลัง.....	64
4.3 การเปรียบเทียบผลระหว่างไฟไนต์เอลิเมนต์กับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	66
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล.....	73
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก	77
ประวัติผู้เขียน	83



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สภาวะแม่เหล็ก	21
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลอง	48
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของหัวเขียนแต่ละชนิด	53
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์	56
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง	68
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ..	71
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบไม่มีชั้น ของ SUL	71
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบมีชั้น ของ SUL	71



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบเนวอนและการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง.....	2
รูปที่ 1.2 ภาพสามมิติแสดงส่วนประกอบของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง	4
รูปที่ 1.3 ไอโคแกรมแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง	4
รูปที่ 2.1 การบันทึกสัญญาณแม่เหล็กลงบนเส้นลวดเหล็ก.....	8
รูปที่ 2.2 เทเลกราฟโฟน	9
รูปที่ 2.3 แผนภาพหน่วยความจำแบบขอบเว้า (notched – disk memory).....	10
รูปที่ 2.4 Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC)	11
รูปที่ 2.5 IBM 33340.....	12
รูปที่ 2.6 แผ่นบันทึกข้อมูลแบบ anti-ferromagnetic coupling enhanced magnetic media	12
รูปที่ 2.7 การพัฒนาของความหนาแน่นเชิงพื้นที่.....	13
รูปที่ 2.8 เส้นแรงแสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก.....	16
รูปที่ 2.9 โมเมนต์แม่เหล็กแสดง โดยลูกศร	17
รูปที่ 2.10 จุดกำเนิดของโมเมนต์แม่เหล็ก.....	19
รูปที่ 2.11 เอ็กซ์เชนจ์คัปปลิง (exchange coupling) ในโลหะแทรนซิชัน	22
รูปที่ 2.12 ฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	23
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	25
รูปที่ 2.14 กระบวนการเขียนในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง	26
รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการลบข้อมูลชนิดต่าง ๆ.....	29
รูปที่ 2.16 แกนแม่เหล็กที่มีช่องว่าง.....	31
รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของแกนแม่เหล็กที่มีช่องว่าง	32

รูปที่ 2.18	ผังงานลำดับในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไป	35
รูปที่ 2.19	ผังแสดงการทำงานเบื้องต้นของ MFM	36
รูปที่ 3.1	ขดลวดโซลินอยด์ที่สร้างจากโปรแกรมสำเร็จรูป	40
รูปที่ 3.2	ผิวปิดที่ล้อมรอบแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์	40
รูปที่ 3.3	รูปทรงของเอลิเมนต์แบบหกหน้า 20 โหนด	41
รูปที่ 3.4	ลักษณะเมชของแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์	41
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งที่ใช้ในการดึงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ	42
รูปที่ 3.6	ผลการคำนวณที่แสดงในโปรแกรม	42
รูปที่ 3.7	กราฟของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ	43
รูปที่ 3.8	ขดลวดโซลินอยด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เมตร ความยาว L เมตร	44
รูปที่ 3.9	ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและคำนวณแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	44
รูปที่ 3.10	หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลอง	47
รูปที่ 3.11	แบบจำลองของหัวเขียนที่ถูกล้อมรอบด้วยผิวปิด	49
รูปที่ 3.12	แบบจำลองของหัวเขียนหลังขั้นตอนการสร้างเอลิเมนต์และแบ่งเมช	49
รูปที่ 3.13	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะ 5 นาโนเมตรจากด้าน ABS	50
รูปที่ 3.14	ตำแหน่งที่ทำการดึงข้อมูลในแนวครอสแทร็คและคาน์แทร็ค	51
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบซิลด์และช่องว่างระหว่างโพลหลักกับซิลด์ของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบมีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม	52
รูปที่ 4.2	คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีรูปแบบซิลด์ต่างกัน	54
รูปที่ 4.3	กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีรูปแบบซิลด์ต่างกัน	55
รูปที่ 4.4	คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็มโดยมีการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านหน้า	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

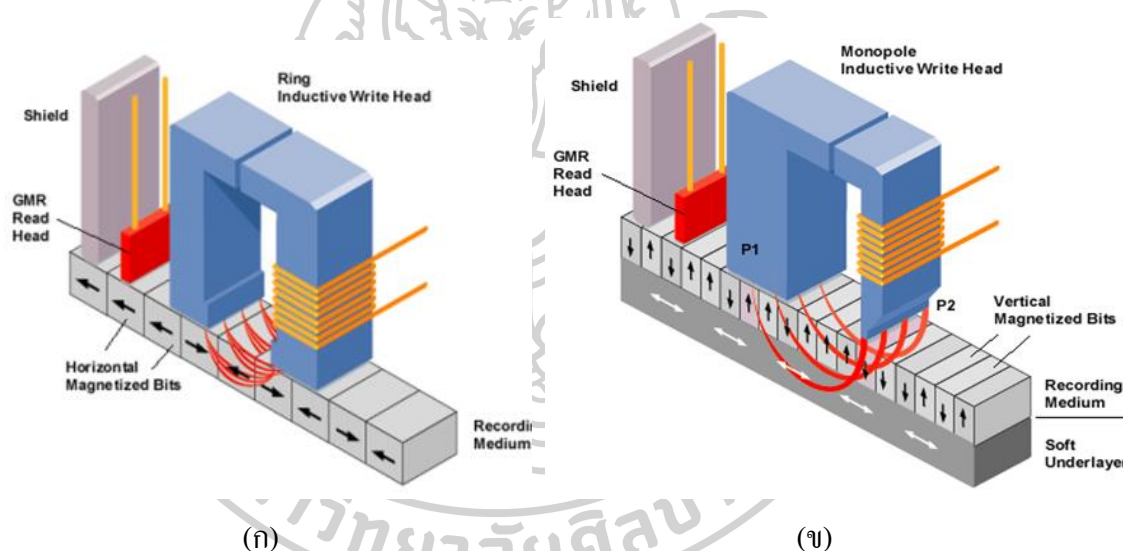
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลด้วยการเขียนสนามแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล (media) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ หัวเขียน (write head) หัวอ่าน (read head) และแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording media) โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic write head)

หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญสองส่วน ได้แก่ โพล (pole) และขดลวด (coil) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ขึ้นในหัวเขียน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะใช้ในการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล จากลักษณะของข้อมูลลงในแผ่นบันทึกข้อมูลสามารถแบ่งหัวเขียนเป็น 2 ประเภท คือ การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวนอน (longitudinal magnetic recording : LMR) และการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording : PMR)

การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวนอนเป็นการเขียนข้อมูลที่แต่ละบิต (bit) ของข้อมูลมีทิศทางของแมกนีไทเซชัน (magnetization) เรียงตัวตามแนวของแทร็ค (track) [1] ซึ่งเขียนโดยสนามแม่เหล็กที่ผิวหน้าของหัวเขียนบริเวณช่องว่างดังรูปที่ 1.1 (ก) โดยสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนแบบแนวนอนนี้มีความเข้มข้น ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุสูงสุดได้ประมาณ 40 Gbps เนื่องจากปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (super-paramagnetic) ทำให้ไม่สามารถลดขนาดของเกรน (grain) ลงได้อีก ซึ่งพบว่าในหนึ่งบิตจะมีจำนวนเกรนได้ประมาณ 100 เกรน ซึ่งให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio : SNR) ประมาณ 20 dB แต่ในทางอุตสาหกรรมจะใช้เทคนิคการปรับปรุงสัญญาณที่อ่านได้ทำให้สามารถใช้งานได้ แม้จะมี SNR น้อย ซึ่งทำให้ความจุของฮาร์ดดิสก์เพิ่มเป็น 125 Gbps

การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งเป็นการเขียนข้อมูลที่แต่ละบิตของข้อมูลมีทิศทางของแมกนีไทเซชันขึ้นหรือลง โดยอาศัยโครงสร้างพิเศษของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ทำให้แมกนีไทเซชันมีทิศทางขึ้นหรือลงได้ สามารถทำได้โดยสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีแอนไอโซโทรปี (anisotropy) ในทิศทางตามแนวตั้งด้วยค่าโคเออร์ซิวิตี (coercivity) ที่เหมาะสมและองค์ประกอบที่สำคัญของการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่แตกต่างจากการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน คือ มีชั้นของสารแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic layer, soft underlayer : SUL) อยู่ใต้ชั้นของการบันทึกข้อมูล

(recording layer) โดยการเขียนข้อมูลจะใช้สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายของหัวเขียนตรงช่องว่างระหว่าง SUL กับปลายของหัวเขียนดังรูปที่ 1.1 (ข) ซึ่ง SUL ทำหน้าที่เสมือนเป็นภาพสะท้อนของแมกนีไทเซชันตรงส่วนปลายของหัวเขียนและทำให้ความแรงของสนามแม่เหล็กในชั้นบันทึกข้อมูลเพิ่มขึ้น โดยสนามแม่เหล็กที่แรงขึ้นจะทำให้สามารถเพิ่มค่าโคเออร์ซิวิตีของชั้นบันทึกข้อมูลให้สูงขึ้นและลดขนาดของเกรนให้มีขนาดเล็กลงได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น (areal density) โดยสนามแม่เหล็กที่แรงจะทำให้แต่ละแมกนีไทเซชันในชั้นบันทึกข้อมูลมีความเสถียร เนื่องจากสามารถสร้างให้ชั้นบันทึกข้อมูลมีแอนไอโซโทรปีที่สูงขึ้นได้ ซึ่งช่วยรักษาข้อมูลและเพิ่มความเสถียรทางอุณหภูมิของชั้นบันทึกข้อมูลอีกด้วย ในส่วนของรีเทิร์น โพล (return pole) จะมีพื้นที่ที่ใหญ่กว่าเพื่อให้ฟลักซ์ (flux) ที่ไหลเข้าสู่รีเทิร์น โพลมีค่าน้อย ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กที่ไหลย้อนกลับเข้าสู่รีเทิร์น โพลไม่ลบหรือเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่ได้บันทึกไว้แล้ว [2]



รูปที่ 1.1 (ก) การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวอน (ข) การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ที่มา : perpendicular recording. May 2017. Available from

http://lookup.computerlanguage.com/host_app/search?cid=C999999&def=70657270656e646963756c6172207265636172264696e67.htm

การบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะมีความจุข้อมูลมากกว่าการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวอน ซึ่งความจุข้อมูลหรือที่เรียกว่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่คำนวณได้จากผลคูณระหว่างจำนวนบิตต่อหนึ่งหน่วยความยาวกับจำนวนแทร็คต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้โดยลดขนาดของหัวเขียนและชั้นบันทึกข้อมูลรวมทั้งระยะห่าง เพื่อทำให้ความกว้างของข้อมูล (magnetic write width : MWW) ลดลง โดยคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนและ

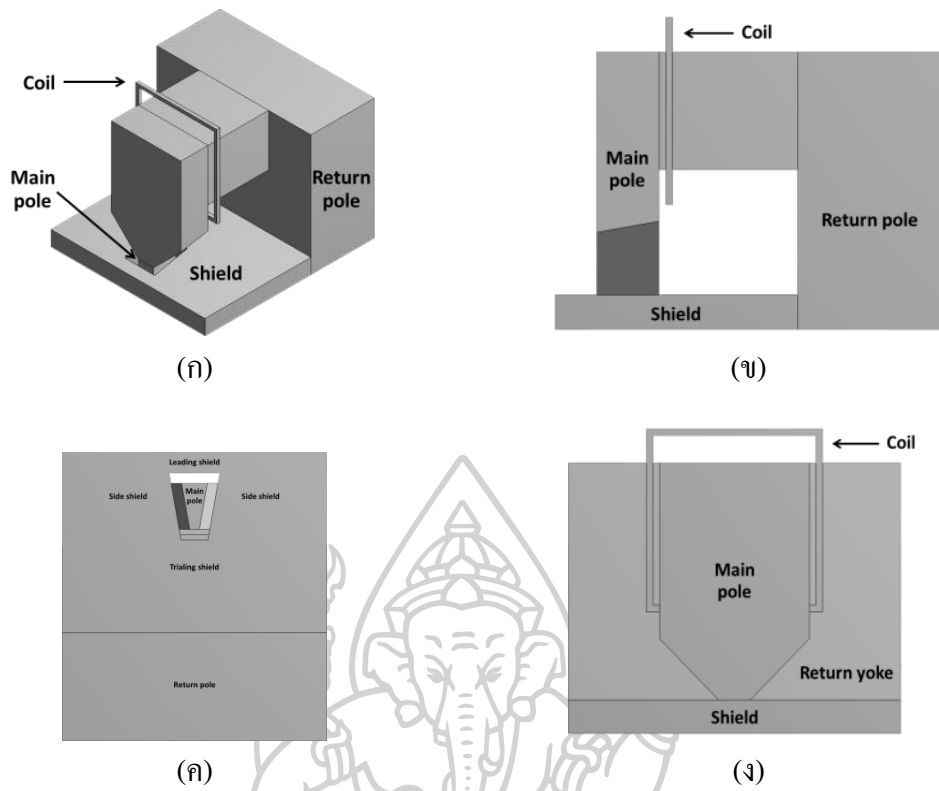
ชั้นบันทึกข้อมูลต้องไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ซ้ำลง เนื่องจากข้อจำกัดพื้นฐานสองข้อคือปรากฏการณ์ฮูเปอร์พาราแมกเนติกและสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียน [3]

การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ดังนั้นหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลในแนวตั้งจะต้องมีเกรเดียนท์ (gradient) ของสนามแม่เหล็กที่สูง [4] เพื่อลดความกว้างของแถบบันทึกข้อมูล (magnetic track width) ซึ่งส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีความจุข้อมูลที่สูงขึ้น

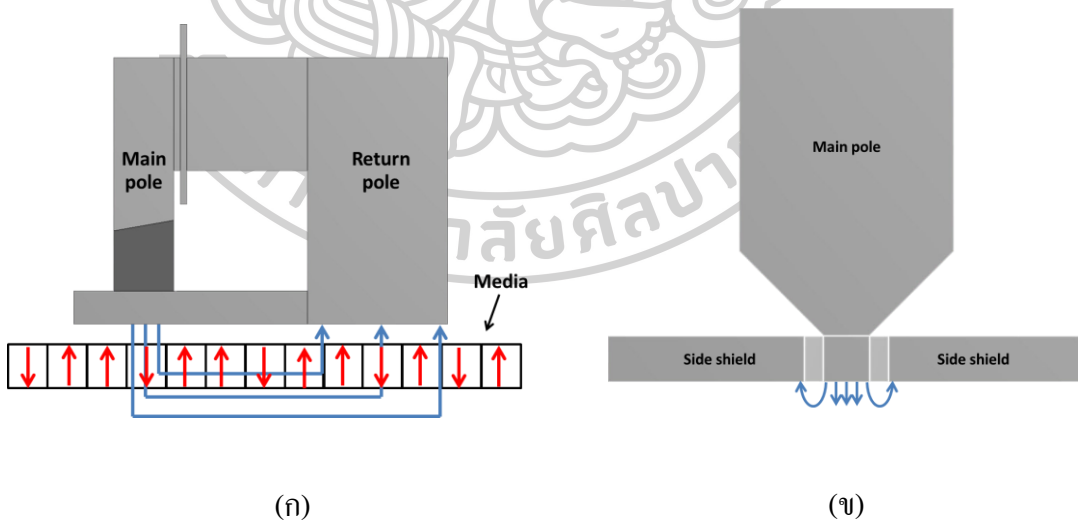
ปัจจุบันหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งจะเป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ (wrap around shield : WAS) [5] แสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ คือ โพลหลัก (main pole) รีเทิร์น โพล ขดลวด และชิลด์ (shield) การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล เกิดจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด ขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในในหัวเขียน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพุ่งออกจากส่วนปลายของโพลหลักเข้าสู่แผ่นบันทึกข้อมูลแล้ววนกลับไปรีเทิร์น โพล ทำให้หัวเขียนสามารถเขียนข้อมูลลงในแผ่นบันทึกข้อมูลได้ ส่วนชิลด์มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนไปรบกวนข้อมูลข้างเคียง เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะพุ่งเข้าสู่ชิลด์แทน [6] แสดงดังรูปที่ 1.3

ชิลด์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ชิลด์ด้านหลัง (trailing shield : TS) ชิลด์ด้านข้าง (side shield : SS) และชิลด์ด้านหน้า (leading shield : LS) [7] ดังรูปที่ 1 (ค) ชิลด์ด้านหลังและชิลด์ด้านหน้ามีหน้าที่เพิ่มเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กตามแนวคาน์แทร็ค (down track) ซึ่งช่วยลดขนาดของข้อมูลที่บันทึกลงบนมีเดียในแนวคาน์แทร็ค สำหรับชิลด์ด้านข้างจะมีหน้าที่เพิ่มเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กตามแนวครอสแทร็ค (cross track) ซึ่งช่วยลดขนาดความกว้างของข้อมูลในแนวครอสแทร็ค ซึ่งจะส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีความจุข้อมูลสูงขึ้น

จากการทบทวนเอกสารพบว่า Yimin Hsu และคณะ [8] ศึกษาผลกระทบของชิลด์ด้านหลังต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมา โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าชิลด์ด้านหลังมีส่วนช่วยในการเพิ่มเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กในแนวคาน์แทร็ค



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



รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก (ลูกศรสีฟ้า) (ก) จากหัวเขียนไปรีเทิร์นโพล และ (ข) จากหัวเขียนไปซิลด์ด้านข้าง

นอกจากนี้ Daniel Z. Bai และคณะ [7] ศึกษาผลของซิลด์ด้านข้างต่อสนามแม่เหล็ก พบว่าซิลด์ด้านข้างมีส่วนช่วยในการเพิ่มเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กในแนวครอสแตร็ค

ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลต้องคำนึงถึงความสามารถในการเขียน (writability) อัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน และความเสถียรทางอุณหภูมิ (thermal-stability) ซึ่งหัวข้อวิจัยนี้จะสนใจในส่วนของความสามารถในการเขียนสำหรับการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้ง คุณสมบัติที่สำคัญของหัวเขียน คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็ก โดยในหัวข้อวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีรูปแบบซิลด์แม่เหล็กต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง
2. ศึกษาผลกระทบของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีรูปแบบของซิลด์ต่างกันต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เกรเดียนต์สนามแม่เหล็ก และ FWHM
3. ศึกษาผลกระทบของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีขนาดของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักต่างกันต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เกรเดียนต์สนามแม่เหล็ก และ FWHM

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ในการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์โรตารีให้มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง คุณสมบัติของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งเหมาะสม จะต้องมี ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณปลายโพลที่สูง และต้องมีการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยทั้งในแนวดาวน์แตร็คและแนวครอสแตร็ค เพื่อลดขนาดของบิตข้อมูลลง ส่งผลให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งซิลด์เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ส่งผลต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ผู้วิจัยจึงสนใจในส่วนของซิลด์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน และผลของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

1.4 ขอบเขตของงาน

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยทำการคำนวณแล้วนำผลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ คอนทัวร์ (contour) เกรเดียนต์ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด และ FWHM (full width at half maximum

: FWHM) โดยสนใจลักษณะของซิดส์ที่แตกต่างกันและขนาดของช่องว่างระหว่างซิดส์กับโพลที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการศึกษาผลของรูปแบบซิดส์ที่ต่างกันที่มีต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งได้

2. การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการศึกษาผลของช่องว่างระหว่างซิดส์กับโพลที่มีขนาดต่างกันต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งได้



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันบนแผ่นบันทึกข้อมูล โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การบันทึกข้อมูลแบบอนาล็อก (analog recording) และการบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล (digital recording) การบันทึกข้อมูลแบบอนาล็อก สัญญาณจะถูกเก็บในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลง แมกนีไทเซชันแบบต่อเนื่อง ขนาดของแมกนีไทเซชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณที่ได้รับ การบันทึกสัญญาณแบบอนาล็อกเหมาะสมกับการบันทึกสัญญาณที่มาจากแหล่งกำเนิดมีรูปแบบเป็นอนาล็อก เช่น การบันทึกเสียงจากสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากไมโครโฟน (microphone) แต่สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล แมกนีไทเซชันของเกรนในแผ่นบันทึกข้อมูลจะอิมตัวไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงข้ามกัน ซึ่งรูปแบบของการบันทึกข้อมูลนี้เหมาะสำหรับจัดเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล เช่น ข้อมูลที่มีหนึ่งหรือสองสถานะ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ “0” กับ “1” ซึ่งคอมพิวเตอร์ (computer) จะมีการสร้างและประมวลผลข้อมูลอยู่ในรูปแบบของไบนารี (binary) การบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลจึงเหมาะสมกับการเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์มากที่สุด นอกจากนี้สัญญาณอนาล็อกสามารถแสดงได้ด้วยสายอักขระของค่าไบนารีที่ถูกเก็บในรูปแบบดิจิทัลได้อีกด้วย [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ถ้ากล่าวถึงการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะหมายถึงการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบดิจิทัลเท่านั้น

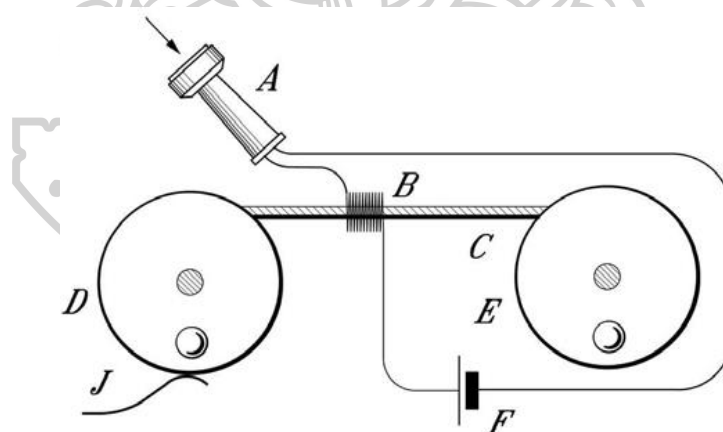
การบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลมี 2 แบบ คืออุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบเทป (tape) และอุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบแผ่นดิสก์ แต่อุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบเทปไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้เหมือนกับอุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบแผ่นดิสก์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะการบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลบนอุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบแผ่นดิสก์เท่านั้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมา ส่วนประกอบ และหลักการทำงานเบื้องต้นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วัสดุแม่เหล็ก สมการพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้า ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองของหัวเขียน เพื่อให้ทราบถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวเขียนและปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนในเบื้องต้น

2.1 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลที่บันทึกข้อมูลแม่เหล็กลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล โดยฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์ชนิดหน่วยความจำถาวร (non - volatile memory) ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทจานแม่เหล็ก (magnetic plate) และประเภท โซลิดสเตต (solid state) ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภทจานแม่เหล็กประกอบด้วย ระบบการขับเคลื่อน หัวเขียนและหัวอ่าน (actuator system) สปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) สไลเดอร์ (slider) หัวเขียน (writer) หัวอ่าน (reader) แผ่นบันทึกข้อมูล และแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board : PCB) ส่วนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภทโซลิดสเตตประกอบด้วย ส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลชนิดหน่วยความจำแฟลช (flash memory) และแผ่นวงจรพิมพ์

ฮาร์ดดิสก์ประเภทจานแม่เหล็กยังคงมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีสัดส่วนในการใช้เป็นอุปกรณ์ บันทึกข้อมูลทั่วโลกสูงกว่าร้อยละ 95 ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพราะฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภทจานแม่เหล็กมีราคาต่อกิกะไบต์ (Gigabyte) ถูกกว่าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภทโซลิดสเตต [10] ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะในส่วนของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ประเภทจานแม่เหล็ก โดยจะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาและส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์



รูปที่ 2.1 การบันทึกสัญญาณแม่เหล็กลงบนเส้นลวดเหล็ก

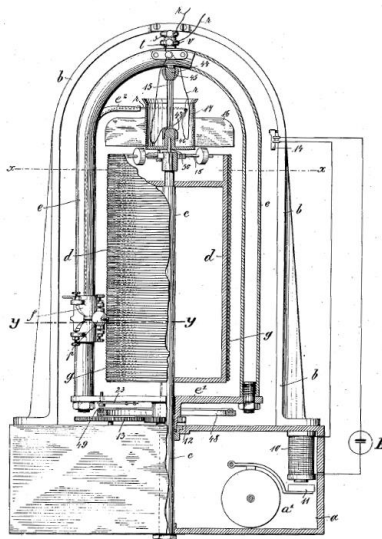
ที่มา : Oberlin Smith and the Invention of Magnetic Sound Recording. May 2017.

Available from

<http://museumofmagneticsoundrecording.org/images/R2R/EngelOberlinSmith2006.pdf>

2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

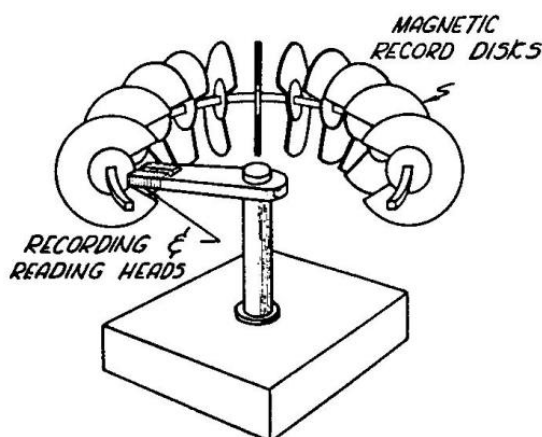
การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กหรือการบันทึกข้อมูลในรูปแบบอื่นที่มีลักษณะเดียวกันถูกค้นพบมาเป็นระยะเวลามากกว่าหนึ่งศตวรรษ ในปีคริสต์ศักราช 1878 Oberlin Smith เป็นคนแรกที่เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการบันทึกสัญญาณแม่เหล็กลงบนเส้นลวดเหล็ก [11] ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นส่วนบันทึกข้อมูลของ electrical phonograph ที่เสนอโดย Smith โดยส่วน A เป็นโทรศัพท์ธรรมดาที่ใช้ในการเก็บเสียง ซึ่งกระแสที่ได้จากการสร้างโดยแผ่นสั่นหูโทรศัพท์ (diaphragm) ในส่วน A จะผ่านเข้าสู่ขดลวดในส่วน B ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในขดลวด ทำให้เสียงถูกบันทึกลงบนเส้นลวดเหล็ก โดยเสียงที่ถูกบันทึกไว้แล้วคือส่วน C เส้นลวดเหล็กจะยาวอย่างต่อเนื่องอยู่ระหว่างล้อ D และล้อ E เสียงที่ถูกบันทึกจะอยู่ในรูปแบบของแมกนีไทเซชันที่กลับไปกลับมา ส่วน F คือ แบตเตอรี่ในวงจรที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงมาก ส่วน G ใช้สำหรับรักษาแรงดึงในเส้นลวด เมื่อเส้นลวดเหล็กที่มีรูปแบบของแมกนีไทเซชันเคลื่อนที่ผ่านขดลวด เสียงที่ถูกบันทึกไว้จะถูกเล่นอีกครั้ง โดยกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากเส้นลวดที่มีข้อมูลของเสียงบันทึกอยู่ หลักจากนั้น Valdemar Poulsen นักประดิษฐ์ชาวเดนมาร์กได้สร้างอุปกรณ์บันทึกสัญญาณแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า เทเลกราฟโฟน (telegraphone) ดังรูปที่ 2.2 ในปีคริสต์ศักราช 1898 [12] นำไปสู่การเกิดของอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าหลายพันล้านดอลลาร์ สหรัฐอเมริกาและเป็นการเริ่มต้นความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของยุคสารสนเทศ (information age)



รูปที่ 2.2 เทเลกราฟโฟน

ที่มา : Investigation of Bit Patterned Media, Thermal Flying Height Control Sliders and Heat Assisted Magnetic Recording in Hard Disk Drives. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/3nd3d29b.pdf>

อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นใหม่ในช่วงกลางของศตวรรษที่ 20 ส่งผลให้เกิดความต้องการอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลที่มีความจุข้อมูลที่สูงและการเข้าถึงข้อมูลที่รวดเร็ว อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลแม่เหล็กสำหรับข้อมูลดิจิทัลจึงถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการนี้ และกลายเป็นเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลรูปแบบหลักสำหรับข้อมูลดิจิทัลจนถึงปัจจุบันนี้ โดยจะแสดงตัวอย่างให้เห็นความแตกต่างระหว่างอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลแม่เหล็ก 2 แบบ คือ อุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบเทปและอุปกรณ์เก็บข้อมูลแม่เหล็กแบบแผ่นดิสก์



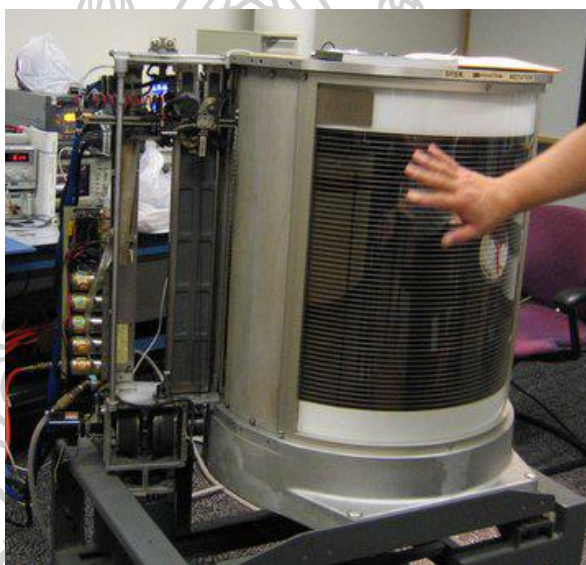
รูปที่ 2.3 แผนภาพหน่วยความจำแบบขอบเว้า (notched - disk memory) ที่ถูกแนะนำโดย Rabinow

ที่มา : **Numerical and Experimental Investigations of the Head/Disk Interface . May 2017.**
Available from <http://escholarship.org/uc/item/0th0374v.pdf>

ในขณะที่เทปยังจำเป็นสำหรับการสำรองข้อมูลและเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลระยะยาวของข้อมูลดิจิทัล แต่เทปมีการเข้าถึงข้อมูลที่ล่าช้า ในปีคริสต์ศักราช 1952 Jacob Rabinow ได้เสนอสิ่งประดิษฐ์ชื่อ หน่วยความจำแบบขอบเว้า (Notched-Disk Memory) ซึ่งในปัจจุบันรู้จักกันในชื่อ ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 ดิสก์แม่เหล็กหลายแผ่นถูกจัดเรียงบนเพลากลมในรูปของทอลอยด์ (toroid) หัวเขียนแม่เหล็กติดอยู่กับเพลาหมุนที่อยู่ตรงกลางของทอลอยด์แผ่นดิสก์ ดิสก์แต่ละแผ่นถูกเปิดออก ซึ่งเรียกว่า รอยบาก (notch) รอยบากต้องมีขนาดใหญ่พอให้หัวเขียนหมุนได้อย่างอิสระรอบเพลาหมุน หัวเขียนแม่เหล็กถูกใช้ในการเขียนและอ่านข้อมูลจากดิสก์ที่มีรอยบาก สำหรับการเขียนและการอ่านของหัวอ่านเขียน หัวอ่านเขียนจะต้องอยู่ตรงหน้าของดิสก์ หลังจากที่วางตำแหน่งของหัวอ่านเขียนแล้ว ดิสก์จะหมุนและสามารถที่จะเขียนหรืออ่านข้อมูลได้ การจัดเก็บ

เรียงดิสก์ตามแนวรัศมีของหัวเขียนทำให้ใช้พื้นที่ของดิสก์ในการจัดเก็บข้อมูลได้สูงสุด ข้อมูลจะถูกจัดเก็บในรูปของพัลส์แม่เหล็ก (magnetic pulse)

ต่อมาในปีคริสต์ศักราช 1956 ในห้องทดลองของบริษัท International Business Machines (IBM) วิศวกรของบริษัทซึ่ง นำทีมโดย Rey B. Johnson ได้สร้างฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยเรียกว่า Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC) ซึ่งมีความจุ 5 เมกกะไบต์ และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2 กิโลบิตต่อตารางนิ้ว โดยใช้แผ่นดิสก์จำนวน 50 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว หนา 1 นิ้ว ส่งผลให้ RAMAC มีขนาดใหญ่จนเท่ากับตู้เย็น ดังรูปที่ 2.4 โดยแต่ละแผ่นจะหมุนด้วยความเร็ว 1200 รอบต่อนาที (rpm) หลังจากนั้น ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ก็เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่รวดเร็ว [13]

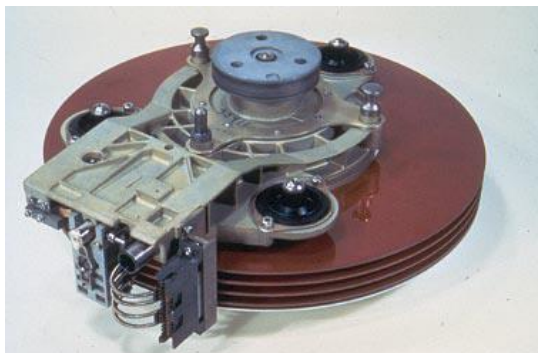


รูปที่ 2.4 Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC)

ที่มา : Numerical and Experimental Investigations of the Head/Disk Interface . May 2017.

Available from <http://escholarship.org/uc/item/0th0374v.pdf>

IBM 33340 ดังรูปที่ 1.5 เป็นอีกหนึ่งส่วนที่สำคัญในหน้าประวัติศาสตร์ของฮาร์ดดิสก์-ไครฟ์ IBM 33340 ถูกสร้างโดยเทคโนโลยีวินเชสเตอร์ (Winchester technology) ซึ่งทำให้ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีค่าใช้จ่ายที่ถูกกลง น้ำหนักเบา (น้อยกว่า 196 มิลลิวัตตัน) และระบะการบินบนแผ่นบันทึกข้อมูลที่เคลือบสารหล่อลื่นของสไลเดอร์มีค่าลดลง (เหลือประมาณ 0.5 ไมโครเมตร) เพราะฉะนั้น IBM 33340 จึงได้รับการยกย่องว่าเป็นฮาร์ดดิสก์แบบสมัยใหม่รุ่นแรกของโลก โดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น 2635 บิตต่อตารางมิลลิเมตร (1.7 เมกะไบต์ต่อตารางนิ้ว) ทำให้ลดระยะเวลาในการเข้าถึงข้อมูลลงจาก 25 มิลลิวินาที



รูปที่ 2.5 IBM 33340

ที่มา : Investigation of Bit Patterned Media, Thermal Flying Height Control Sliders and Heat Assisted Magnetic Recording in Hard Disk Drives. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/3nd3d29b.pdf>

ความก้าวหน้าของนวัตกรรมในเทคนิคการปลูกฟิล์มบางและการสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ anti-ferromagnetic coupling enhanced magnetic media ส่งผลให้ราคาและขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ารูปร่างของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการพัฒนาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1980 โดยขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ลดลงจาก 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) เหลือเพียง 46 มิลลิเมตร (1.8 นิ้ว) หลังจากมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดเก็บตำแหน่งในระบบ global positioning systems (GPS) เครื่องเล่น MP3 personal digital assistants (PDA) กล้องดิจิทัล และคอมพิวเตอร์แบบพกพา



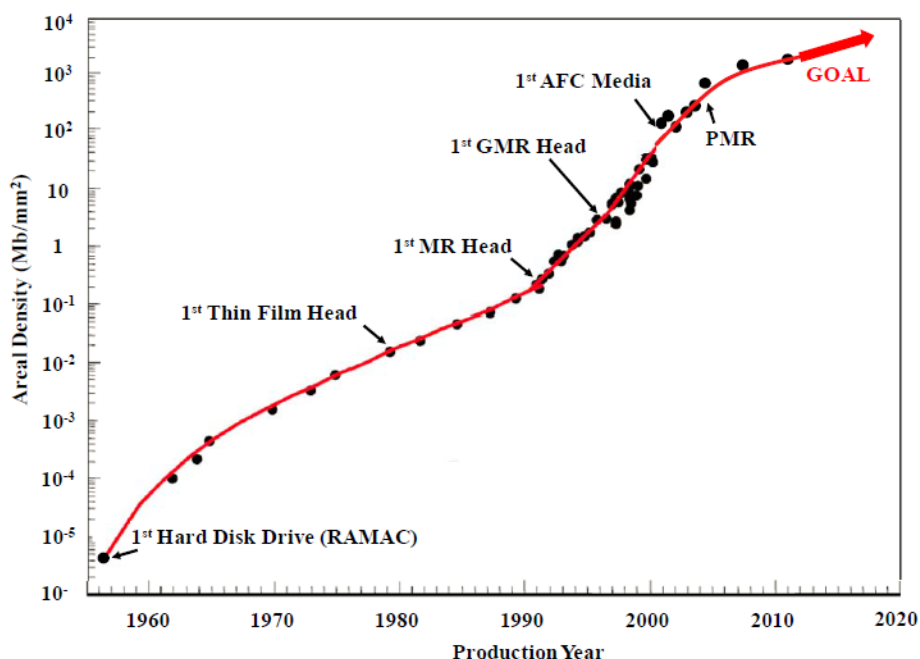
รูปที่ 2.6 แผ่นบันทึกข้อมูลแบบ anti-ferromagnetic coupling enhanced magnetic media

ที่มา : Investigation of Bit Patterned Media, Thermal Flying Height Control Sliders and Heat Assisted Magnetic Recording in Hard Disk Drives. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/3nd3d29b.pdf>

ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในคอมพิวเตอร์แบบพกพาและคอมพิวเตอร์ส่วนตัว มีขนาด 64 มิลลิเมตร (2.5 นิ้ว) และ 89 มิลลิเมตร (3.5 นิ้ว) ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ RAMAC ถึง 15 % และความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันสูงถึง 3 เทระไบต์ ซึ่งมากกว่าความจุของ RAMAC ถึง 600,000 เท่า และราคาต่อจิกะไบต์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันยังถูกลงมาก ราคาต่อจิกะไบต์น้อยกว่า 0.05 ดอลลาร์สหรัฐ (USD)

2.1.2 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แปรผันตรงกับการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ โดยความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะบอกถึงจำนวนข้อมูล (วัดในรูปของบิต) ที่สามารถเก็บได้ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวดิสก์ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ RAMAC ถูกสร้างในปี 1956 ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ RAMAC มีค่าประมาณ 3 บิตต่อตารางมิลลิเมตร (2000 บิตต่อตารางนิ้ว) ปัจจุบันความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีค่ามากกว่า 775 เมกะบิตต่อตารางมิลลิเมตร (500 กิกะบิตต่อตารางนิ้ว) ซึ่งมากกว่า RAMAC ถึง 250 ล้านเท่า



รูปที่ 2.7 การพัฒนาของความหนาแน่นเชิงพื้นที่

ที่มา : Investigation of Bit Patterned Media, Thermal Flying Height Control Sliders and Heat Assisted Magnetic Recording in Hard Disk Drives. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/3nd3d29b.pdf>

การพัฒนาของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ตั้งแต่ทศวรรษที่ 1950 มีการเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.7 อัตราเติบโตเฉลี่ยสะสมต่อปี (compound annual growth rate : CAGR) วัดจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในแต่ละปี ในสามทศวรรษแรก มีค่าประมาณร้อยละ 39 และหลังจากพบเทคนิค magnetoresistive (MR) giant magnetoresistive (GMR) tunneling magnetoresistive (TMR) และ anti-ferromagnetic coupling (AFC) enhanced magnetic media technologies ทำให้ CAGR เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 – 100 ในช่วงทศวรรษที่ 1990 และการอัตราการเพิ่มขึ้นชะลอตัวลงในต้นทศวรรษที่ 2000 การพยายามค้นหาเทคนิคใหม่ เช่น perpendicular magnetic recording (PMR) two-dimensional magnetic recording energy assisted magnetic recording และ patterned media เพื่อที่จะทำให้ CAGR สูงขึ้น ปัจจุบันอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 25 – 40 ต่อปี

เพื่อที่จะเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ จำเป็นจะต้องลดขนาดของบิตแม่เหล็กให้เล็กลงและลดขนาดของ form factors ของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก เพื่อบันทึกข้อมูลที่นำเชื่อถือนบนบิตแม่เหล็กขนาดเล็กเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก การเพิ่มประสิทธิภาพต้องหาระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึกข้อมูลที่เหมาะสม ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญของปัญหานี้ ขนาดของสัญญาณที่อ่านกลับมาลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึกข้อมูลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียนจะลดลง จนไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลได้ เมื่อหัวเขียนอยู่ห่างจากแผ่นบันทึกข้อมูล ดังนั้นการลดระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึกข้อมูลจึงมีความสำคัญมากที่สุดในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ จึงต้องปรับปรุงความเร็วของสไลเดอร์และผิวหน้าของแผ่นบันทึกข้อมูลและลดความหนาของการเคลือบผิวหน้าป้องกัน diamond-like carbon (DLC) overcoat ฟิล์มลดแรงเสียดทาน (lubricant films) และลดความสูงในการบิน (ระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึกข้อมูล) [12]

2.2 ทฤษฎีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์บันทึกข้อมูลด้วยสนามแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูล โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวเขียนแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เพื่อบันทึกข้อมูลแม่เหล็กลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล ดังนั้น การศึกษาฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวัสดุแม่เหล็ก ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ กระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก และคุณสมบัติที่ดีของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง

2.2.1 วัสดุแม่เหล็ก

แม่เหล็ก เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุหนึ่งผลักหรือดูดหรือมีอิทธิพลกับวัสดุอื่น ๆ ซึ่งรู้จักกันมาเป็นระยะเวลาพัน ๆ ปี อย่างไรก็ตามหลักการพื้นฐานและกลไกที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์แม่เหล็กเป็นสิ่งที่ยากและซับซ้อนสำหรับนักวิทยาศาสตร์ในอดีตจนมาถึงปัจจุบัน อุปกรณ์ทางเทคโนโลยีสมัยใหม่หลายอุปกรณ์ต้องอาศัยแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็ก เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง มอเตอร์ไฟฟ้า วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์และส่วนประกอบของระบบกำเนิดเสียงและภาพ

เหล็ก โลหะบางชนิด และแร่แม่เหล็กเป็นตัวอย่างที่รู้จักกันเป็นอย่างดีของวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก และบางชนิดที่ไม่คุ้นเคย แต่อย่างไรก็ตามความจริง สารทุกชนิดได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กอาจจะเป็นบางส่วนหรือมากกว่านั้น

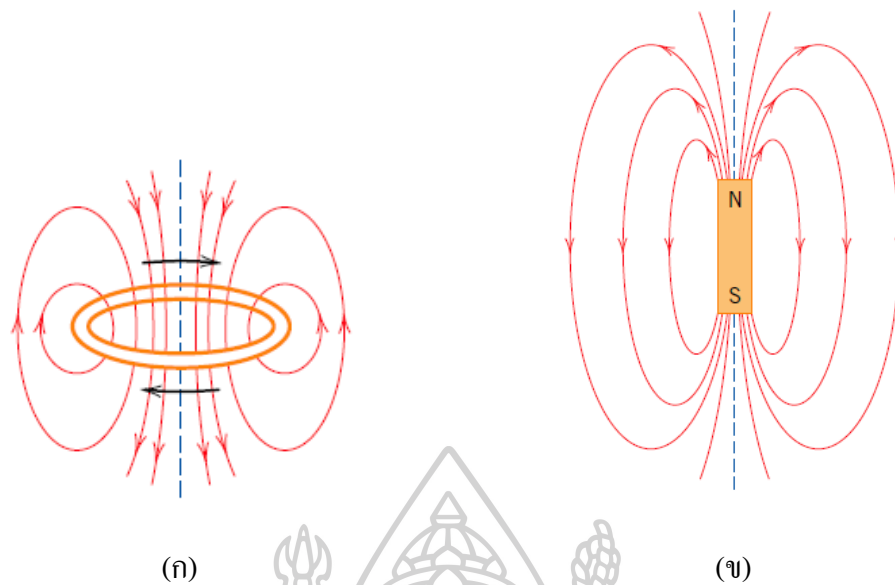
หัวข้อนี้กล่าวถึง ไดโพลแม่เหล็ก เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็ก สภาวะแม่เหล็ก และฮิสเทอรีซิสลูป

2.2.1.1 พื้นฐานแม่เหล็ก

2.2.1.1.1 ไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipole)

แนวทางแม่เหล็กเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้า ซึ่งแนวทางแม่เหล็กเป็นแรงที่ไม่รวมแนวทางไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งมีค่ามากกว่าหลายเท่า หลายครั้งแนวทางแม่เหล็กถูกกล่าวถึงในรูปของสนาม โดยใช้เส้นแรงที่วาดขึ้นเพื่อแสดงทิศทางของแรงที่บริเวณใกล้เคียงแหล่งกำเนิดสนาม การกระจายของสนามเหล็กที่ระบุโดยเส้นแรง ดังรูปที่ 2.8

ไดโพลแม่เหล็กจะพบอยู่ในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งคล้ายกับในกรณีของไดโพลไฟฟ้า อาจจะคิดว่าไดโพลแม่เหล็กมีลักษณะเสมือนแท่งแม่เหล็กเล็ก ๆ ที่ประกอบไปด้วยขั้วเหนือและขั้วใต้ซึ่งคล้ายกับประจุบวกและประจุลบในกรณีของไดโพลไฟฟ้า ในที่นี้จะกล่าวถึง ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic dipole moment) ซึ่งถูกแสดงโดยลูกศร ดังรูปที่ 2.9 ไดโพลแม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กในลักษณะเดียวกับที่ไดโพลไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก แรงที่เกิดจากสนามจะพยายามบิดไดโพลแม่เหล็กให้หมุนไปตามสนาม ตัวอย่างที่เห็นได้ง่ายที่สุดคือการหมุนตัวของเข็มทิศจะเรียงตัวตามแนวสนามแม่เหล็กของโลก [14]



รูปที่ 2.8 เส้นแรงแสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (ก) ลูปของกระแส (current loop) (ข) แท่งแม่เหล็ก

ที่มา : **Materials Science and Engineering an Introduction, May 2017. Available from**

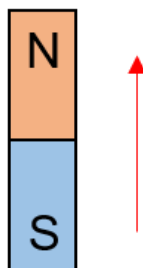
<https://www.slideshare.net/anhtieng/materials-science-and-engineering-an-introduction-8th>

2.2.1.1.2 เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (magnetic field vector)

ก่อนจะกล่าวถึงจุดกำเนิดของ โมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุของแข็ง จะกล่าวถึงพฤติกรรมของแม่เหล็กในรูปแบบของสนามเวกเตอร์ สนามแม่เหล็กภายนอกที่ถูกนำมาใช้ บางครั้งจะถูกเรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) ถูกกำหนดให้เป็น H ถ้าสนามแม่เหล็กถูกสร้างโดยขดลวดทรงกระบอกหรือโซลินอยด์ ที่ประกอบไปด้วยขดลวด N รอบที่เรียงชิดกัน มีความยาว l และจ่ายกระแสขนาด I ดังนั้น

$$H = \frac{NI}{l} \quad (2.1)$$

แผนภาพการจัดเตรียมแสดงดังรูป 2.10 (ก) สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยลูปของกระแสและแท่งแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.8 คือ สนาม H ซึ่งมีหน่วยแอมแปร์-รอบต่อเมตร (At/m) หรือแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)



รูปที่ 2.9 โมเมนต์แม่เหล็กแสดงโดยลูกศร

ที่มา : Materials Science and Engineering an Introduction. May 2017. Available from <https://www.slideshare.net/anhtieng/materials-science-and-engineering-an-introduction-8th>

การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction) หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) เขียนแทนด้วย B แสดงขนาดของสนามแม่เหล็กภายในสารซึ่งอยู่ภายใต้สนาม H หน่วยของ B คือ เทสลา (tesla : T) หรือเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2) ทั้ง B และ H เป็นสนามเวกเตอร์ ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง

ความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

พารามิเตอร์ μ ถูกเรียกว่า สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของตัวกลางที่สนาม H พุ่งผ่านและ B ถูกวัด ดังรูปที่ 2.10 (ข) สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อแอมแปร์-เมตร (Wb/Am) หรือเฮนรีต่อเมตร (H/m)

ในสุญญากาศ

$$B_0 = \mu_0 H \quad (2.3)$$

μ_0 คือ สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กในสุญญากาศ เป็นค่าคงที่สากล มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (1.257×10^{-6}) H/m พารามิเตอร์ B_0 แสดงความหนาแน่นฟลักซ์ในสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.10 (ก)

หลายพารามิเตอร์ถูกใช้เพื่ออธิบายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของของแข็ง หนึ่งในนั้นคือ อัตราส่วนระหว่างสภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กในวัสดุกับสภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กในสุญญากาศ

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ μ_r คือ สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์ ซึ่งไม่มีหน่วย สภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กหรือสภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารเป็นตัววัดความสามารถของสารในการเป็นสารแม่เหล็กหรือความสามารถที่จะเกิดสนาม B ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามภายนอก H ปริมาณสนามอีกอย่างคือ M ซึ่งเรียกว่า แมกนีไทเซชันของของแข็ง ซึ่งนิยามโดยสมการ

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2.5)$$

ภายใต้สนาม H โมเมนต์แม่เหล็กในสารจะพยายามเรียงตัวตามสนามและเสริมสนามแม่เหล็กเทอมของ $\mu_0 M$ ในสมการที่ (2.4) เป็นสิ่งที่ยืนยันขนาดของ M แปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังสมการ

$$M = \chi_m H \quad (2.6)$$

χ_m คือ ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ซึ่งไม่มีหน่วย ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กและสภาพซึมผ่านได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการ

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (2.7)$$

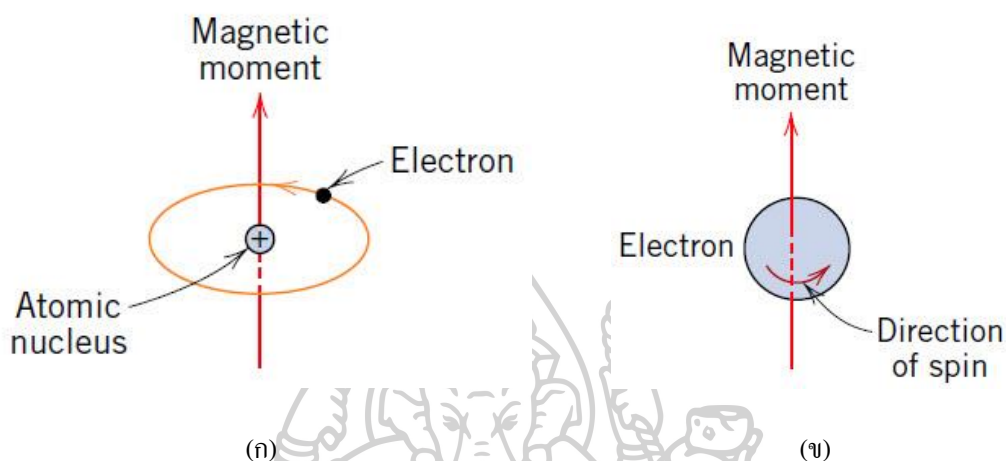
โดยสามารถแบ่งวัสดุออกเป็น 3 ประเภท ตามค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก [15] ดังนี้

วัสดุไดอะแมกเนติก (diamagnetic material)	$-1 < \chi_m < 0$
วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic material)	$0 < \chi_m \ll 1$
วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material)	$\chi_m \gg 1$

2.2.1.1.3 จุดกำเนิดของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment)

คุณสมบัติแม่เหล็กของสารในระดับมหภาค (macroscopic) เป็นผลมาจากโมเมนต์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนแต่ละตัว แนวคิดบางอย่างค่อนข้างซับซ้อนและบางอย่างเกี่ยวข้องกับหลักการเชิงควอนตัม ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึง ดังนั้น เพื่อความเข้าใจที่ง่าย จะยกเว้นรายละเอียดบางส่วน โดยแต่ละอิเล็กตรอนในอะตอมมีโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก 2 ส่วน คือ ส่วนแรกมาจากการหมุนรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน ซึ่งคล้ายกับการเคลื่อนที่ของประจุ อิเล็กตรอนอาจถือได้ว่าเป็นลูป (loop) ของกระแสเล็ก ๆ ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กเล็ก ๆ และมีโมเมนต์แม่เหล็กตามแกนที่อิเล็กตรอนหมุน ดังรูปที่ 2.10 (ก) และอีกส่วนมาจากการที่แต่ละอิเล็กตรอนอาจถูกคิดว่าเป็นอนุกรมตามแกน โดยโมเมนต์แม่เหล็กเกิดจากการที่อิเล็กตรอนสปิน (spin) ซึ่งถูกกำกับให้หมุนตามแกนสปิน

ดังรูปที่ 2.10 (ข) โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการสปินของอิเล็กตรอนจะมีได้เพียง 2 ทิศทางเท่านั้น คือ ขึ้น หรือ ลง ดังนั้นแต่ละอิเล็กตรอนในอะตอมอาจคิดว่าเป็นแม่เหล็กขนาดเล็กที่มีวงโคจรถาวร และโมเมนต์แม่เหล็กแบบสปิน



รูปที่ 2.10 โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน และ (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

ที่มา : **Materials Science and Engineering an Introduction**, May 2017. Available from <https://www.slideshare.net/anhtieng/materials-science-and-engineering-an-introduction-8th>

2.2.1.2 สถานะแม่เหล็ก (magnetism)

สารทุกชนิดสามารถแบ่งประเภทตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กได้ โดยทั่วไปคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารจะเป็น ไดอะแมกเนติกซึม (diamagnetism) หรือพาราแมกเนติกซึม (paramagnetism) ซึ่งเป็นคุณสมบัติส่วนใหญ่ของธาตุในตารางธาตุที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมักกล่าวว่าธาตุเหล่านี้ ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (nonmagnetic) ส่วนที่เรียกว่า แม่เหล็ก จะจัดอยู่ในประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ซึ่งสถานะแม่เหล็กอื่น ๆ ของธาตุบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องที่สามารถพบได้คือ แอนติเฟอร์โรแมกเนติกซึม (antiferromagnetism) โดยวัสดุแม่เหล็กที่สามารถจัดอยู่ในประเภท เฟอร์โรแมกเนติก จะไม่อยู่ในรูปของสารบริสุทธิ์แต่จะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น ออกไซด์ผสม (mixed oxide) ที่รู้จักกันในชื่อของเฟอร์ไรต์ (ferrite) [16]

2.2.1.2.1 ไดอะแมกเนติกซึม (diamagnetism)

วัสดุไดอะแมกเนติก (diamagnetic material) เมื่อไม่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่สารภายในอะตอมของสาร จะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็ก ดังตารางที่ 2.1 ส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของ

วัสดุมีค่าเป็นศูนย์ ภายใต้การรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป (applied field) สปินของอิเล็กตรอนจะมีการหมุนควง ซึ่งทำให้เกิดแมกนีไทเซชันในทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป ส่งผลให้ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ วัสดุทุกชนิดมีผลของไดอะแมกเนติกในสารที่ไม่เป็นวัสดุไดอะแมกเนติก ผลอื่น ๆ ทำให้ไดอะแมกเนติกไม่มีนัยสำคัญ ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

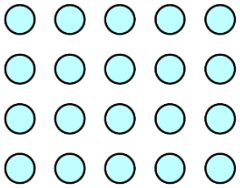
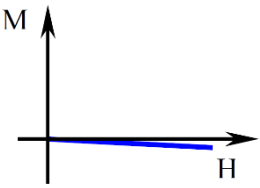
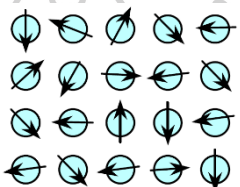
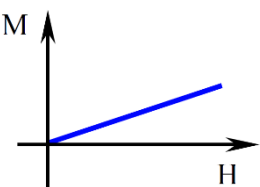
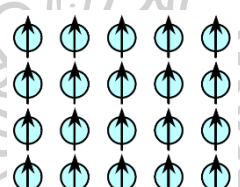
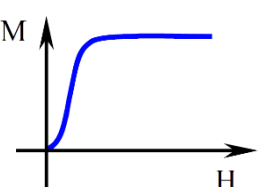
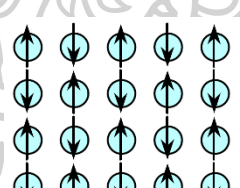
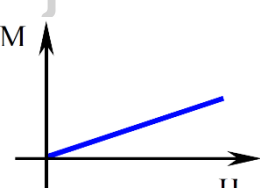
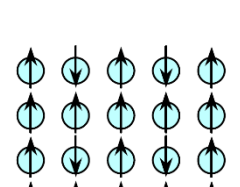
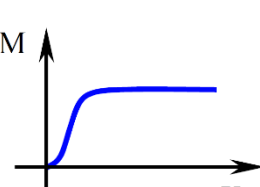
2.2.1.2.2 พาราแมกเนติซึม (paramagnetism)

วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic material) ภายในอะตอม จะมีโมเมนต์แม่เหล็กดังตารางที่ 2.1 เนื่องจากอิเล็กตรอนโคเดเดี่ยว (unpaired electron) ในออร์บิทัล (orbital) วงนอกสุด ภายใต้การรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป โมเมนต์แม่เหล็กภายในอะตอม จะเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กภายนอก แต่อย่างไรก็ตาม โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกนำออกไป ส่งผลให้แมกนีไทเซชันสุทธิและค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็กมีค่าเป็นบวก

2.2.1.2.3 แอนติเฟอร์โรแมกเนติซึม (antiferromagnetism)

ถ้าภายในโครงสร้างแม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กสองอันที่อยู่ใกล้กันในสับแลตทิซ (sub-lattice) มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศตรงกันข้าม โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิภายในวัสดุจะมีค่าเป็นศูนย์ วัสดุนี้ถูกเรียกว่า แอนติเฟอร์โรแมกเนติซึม แสดงดังตารางที่ 2.1 ในบางวัสดุ โมเมนต์แม่เหล็กภายในอะตอมจะมีอันตรกิริยาที่แข็งแรง ซึ่งเกิดจากแรงอิเล็กตรอนิกส์เอ็กซ์เชนจ์ (electronic exchange force) ที่เกิดจากควอนตัม (quantum) แรงแเอ็กซ์เชนจ์ (exchange force) ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กให้ขนาน (parallel) หรือขนานสวน (antiparallel) กัน สนามเอ็กซ์เชนจ์ (exchange field) มีค่ามากในระดับ 1,000 เทสลา ในแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnet) แรงแเอ็กซ์เชนจ์เกิดระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ติดกันขนานสวนกัน ซึ่งต่างกับในแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnet) ซึ่งแรงแเอ็กซ์เชนจ์จะเกิดระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กที่มีขนานกัน เหนืออุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิเนล (Néel temperature) พลังงานความร้อนจะมีผลมากกว่าพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ ส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กมีลักษณะแบบสุ่ม ทำให้แอนติเฟอร์โรแมกเนติซึมเปลี่ยนเป็นพาราแมกเนติซึม ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์คัปปลิง (exchange coupling constant) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างอะตอม (inter-atomic distance) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอม (atomic diameter) ดังรูปที่ 2.11 จะสังเกตเห็นว่าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อย ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ (exchange constant) มีค่าเป็นลบสำหรับวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติซึม เช่น โคเมียมและแมงกานีส แสดงคัปปลิงของโมเมนต์แม่เหล็กที่ขนานสวนกัน

ตารางที่ 2.1 สภาวะแม่เหล็ก

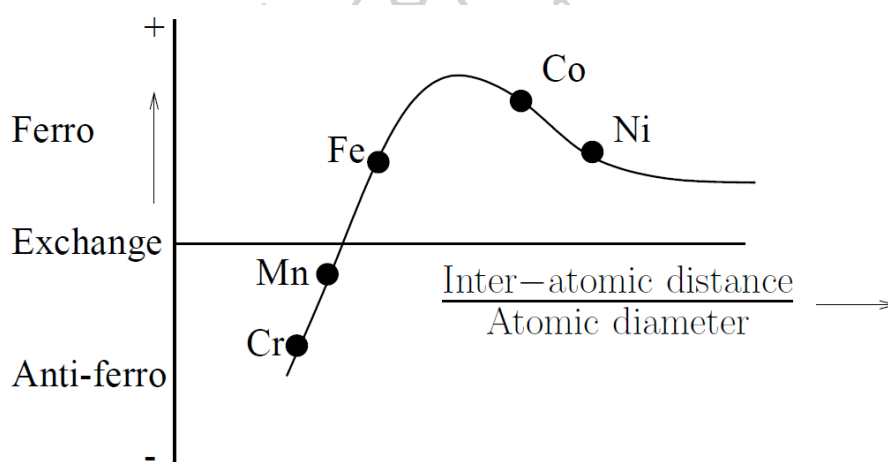
สภาวะแม่เหล็ก	อะตอม (atom)	พฤติกรรมทางแม่เหล็ก (magnetic behaviour)
ไดอะแมกเนติก		
พาราแมกเนติก		
เฟอร์โรแมกเนติก		
แอนติเฟอร์โรแมกเนติก		
เฟอร์ริแมกเนติก		

ที่มา : Magnetic Materials - eolss.net. May 2017. Available from

<https://www.eolss.net/sample-chapters/C05/E6-36-02-01.pdf>

2.2.1.2.4 เฟอร์โรแมกเนติกิซึม (ferromagnetism)

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material) จะมีโมเมนต์แม่เหล็กจัดเรียงขนานกัน ดังตารางที่ 2.1 เป็นผลให้มีค่าแมกนีไทเซชันสูงที่อุณหภูมิห้อง แม้อิทธิพลที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ตัวอย่างของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ ธาตุแทรนซิชัน (transition element) เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และโลหะผสม (alloy) ของธาตุดังกล่าว จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์มีค่าเป็นบวกในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ขนานกันของโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ติดกัน แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสามารถรักษาแมกนีไทเซชันไว้ได้ แม้ว่าสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไปจะถูกนำออกไปแล้ว และพฤติกรรมนี้ถูกเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (hysteresis)



รูปที่ 2.11 เอ็กซ์เชนจ์คัปปลิง (exchange coupling) ในโลหะแทรนซิชัน
ที่มา : COMPACT MODEL FOR A MAGNETIC TUNNEL JUNCTION. May 2017.

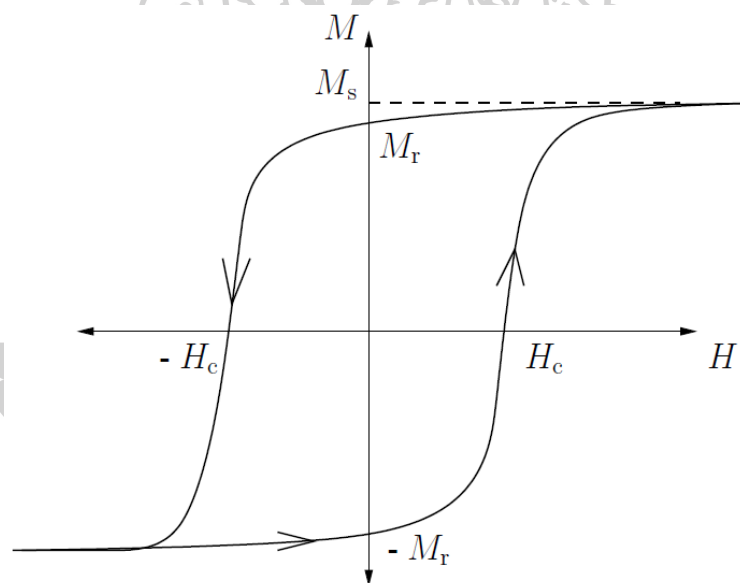
Available from

http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/6516/7/07_chapter%202.pdf

2.2.1.2.5 เฟอร์ริแมกเนติกิซึม (ferrimagnetism)

รูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้นของแม่เหล็กสามารถพบได้ในแม่เหล็กเฟอร์ริ (ferri-magnet) แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กสองอันที่อยู่ใกล้กันในสับแลตทิซมีทิศตรงกันข้าม แต่มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งไม่เหมือนกับแอนติเฟอร์โรแมกเนติกิซึม ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิมีค่าไม่เป็นศูนย์ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เฟอร์ริแมกเนติกิซึมแสดงคุณลักษณะเหมือนกับเฟอร์โรแมกเนติกิซึม วัสดุเฟอร์ริแมกเนติกเป็นตัวนำที่ไม่ดีเท่ากับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและเฟอร์ริแมกเนติกทุกชนิด จะแสดงปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส ในรูปที่ 2.12 แสดง 4 ควอดรันต์ (quadrant) ของฮิสเทอรีซิสลูป ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) สามารถใช้บอกประสิทธิภาพของวัสดุแม่เหล็กได้ M_s คือ แมกไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) เป็นตัววัดว่าวัสดุนี้มีความเป็นแม่เหล็กมากหรือน้อย โดยเป็นค่าแมกนีไทเซชันสูงสุดที่วัสดุจะมีได้ M_r คือ แมกนีไทเซชันคงค้าง (remanent magnetization) เป็นค่าแมกนีไทเซชันที่คงเหลือ โดยเป็นแมกนีไทเซชันถาวร (permanent magnetization) หลังจากนำสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไปออกแล้ว เพื่อที่จะดีแมกนีไทซ์ (demagnetize) วัสดุให้ออกจากภาวะคงค้าง (remanent state) สนามแม่เหล็กที่มีทิศตรงข้าม (reverse field) H_c สนามลบล้างแม่เหล็ก (coercive field) จะต้องใช้เพื่อลบล้างแมกนีไทเซชันที่เหลืออยู่ให้เป็นศูนย์ ค่า H_c แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสามารถกลายเป็นพาราแมกเนติก โดยจะมีโมเมนต์แม่เหล็กแบบสุ่มเมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature)



รูปที่ 2.12 ฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

ที่มา : COMPACT MODEL FOR A MAGNETIC TUNNEL JUNCTION. May 2017.

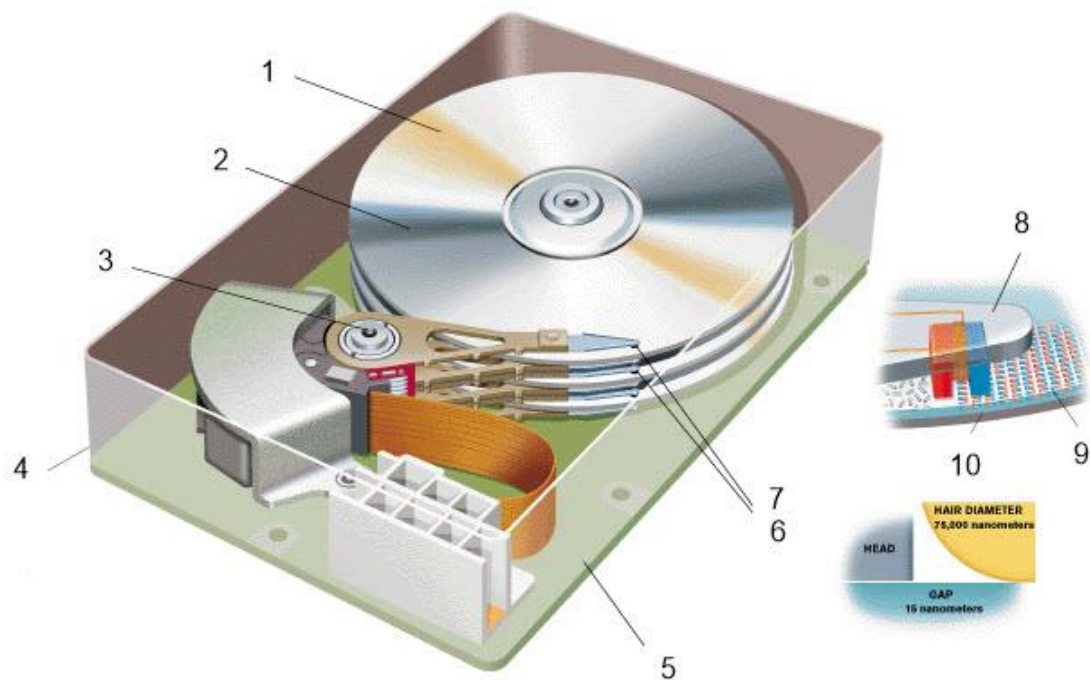
Available from

http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/6516/7/07_chapter%202.pdf

2.2.2 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของฮาร์ดดิสก์ (hard disk assembly : HDA) และ ส่วนของวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ (printed circuit board assembly :

PCBA) โดยในส่วนแรกจะเป็นส่วนประกอบของหัวอ่านเขียน แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก และส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางกล (mechanic) ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นส่วนประกอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น คอมพิวเตอร์ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 โดยประกอบไปด้วย ไฟล์ (file) ส่วนของข้อมูลที่ถูกบันทึกในรูปของแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยหนึ่งไฟล์อาจจะถูกแบ่งกระจายออกไปในแต่ละแผ่นบันทึกข้อมูล แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetically coated platter) ซึ่งทำจากโลหะหรือแก้วเคลือบด้วยวัสดุแม่เหล็ก หมุนด้วยอัตราเร็ว 5400 หรือ 7200 รอบต่อนาที ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (electric motor) ความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและชนิดของวัสดุแม่เหล็กที่ถูกเคลือบบนแผ่นบันทึกข้อมูล แขนจับหัวอ่านเขียน (head actuator) ทำหน้าที่นำหัวอ่านเขียนเข้าและออกจากแผ่นบันทึกข้อมูล รวมไปถึงควบคุมตำแหน่งของหัวเขียนให้เคลื่อนที่ไปบนแผ่นบันทึกข้อมูล ก่อสร้างบรรจุฮาร์ดดิสก์ (protective housing) ป้องกันฮาร์ดดิสก์จากฝุ่นและการกระทบกระเทือน เนื่องจากระยะห่างระหว่างหัวอ่านเขียนและแผ่นบันทึกข้อมูลมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 15 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นผมที่มีขนาดประมาณ 75,000 นาโนเมตร แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (printed circuit board : PCB) รับคำสั่งจากตัวควบคุมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และหัวอ่านเขียน (read-write head) จะอยู่ที่ปลายของแขนจับหัวอ่านเขียน โดยหัวอ่านเขียนจะอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นบันทึกข้อมูล หัวเขียนจะบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลโดยใช้สนามเหล็กในการเปลี่ยนทิศทางของสารแม่เหล็กบนผิวของแผ่นบันทึกข้อมูล และอ่านข้อมูลจากทิศทางของสารแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ 1. ฟิลล์ 2. แผ่นบันทึกข้อมูล 3. แขนจับหัวอ่านเขียน 4. กล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์ 5. แผ่นวางจโรอิเล็กทริก 6. – 8. หัวอ่านเขียน 9. ฟิล์มแม่เหล็ก (magnetic film) 10. แผ่นดิสก์ (disk)

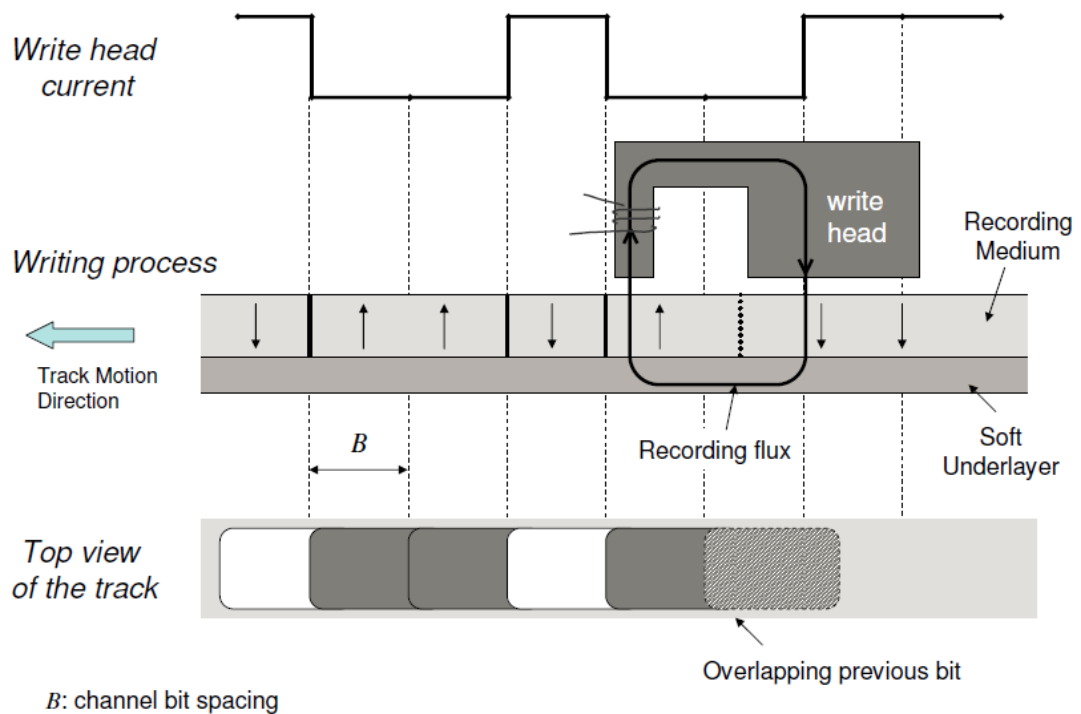
ที่มา : Magnetic Storage. May 2017. Available from <http://ffden->

2.phys.uaf.edu/211.fall2000.web.projects/J%20Kugler/magnetic.html

2.2.3 กระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก

ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ข้อมูลถูกบันทึกบนแผ่นข้อมูลแบบไบนารีบิต (binary bit) บิตถูกเขียนบนแทร็คมีลักษณะเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของแผ่นบันทึกข้อมูล [17]

ในการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ทิศทาง (polarity) ของบิตถูกกำหนดให้มีทิศขึ้นหรือลง โดยสนามแม่เหล็กที่กระทำบนแผ่นบันทึกข้อมูล กระบวนการเขียนบิตให้มีทิศทางต่างกันบนแผ่นบันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.14 ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียน (recording flux) ถูกควบคุมโดยกระแสในหัวเขียน ซึ่งกระแสที่ใช้ในการเขียนต้องมีความพอที่จะเปลี่ยนทิศของแมกนีไทเซชันและมีทิศของกระแสใช้ในการกำหนดทิศของแมกนีไทเซชัน ด้วยการหมุนของแผ่นบันทึกข้อมูล บิตบนแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกเขียนตามลำดับ โดยบิตที่ถูกเขียนทีหลังจะมีบางส่วนทับซ้อนกับบิตที่ถูกเขียนก่อนหน้า ความเร็วในการหมุนจะถูกควบคุมอย่างดีเพื่อให้ได้ระยะห่างของบิต (channel bit spacing) ที่เหมาะสม



B : channel bit spacing

รูปที่ 2.14 กระบวนการเขียนในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ที่มา : Channel modeling, signal processing and coding for perpendicular magnetic recording. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/49b5n36s.pdf>

2.2.4 คุณสมบัติของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งที่ดี

2.2.4.1 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูง (high peak field)

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ หัวเขียนต้องสร้างสนามแม่เหล็กที่มากพอสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีที่สูง ปัจจุบันสนามแม่เหล็กที่สร้างจากหัวเขียนแปรผันโดยตรงกับแมกไทเซชันอิมิตัวของวัสดุที่ใช้ในการทำหัวเขียน ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่สามารถสร้างได้จากหัวเขียนจึงถูกจำกัดโดยแมกไทเซชันอิมิตัวของวัสดุที่ใช้ทำหัวเขียน จึงมีการเสนอ SUL ขึ้นและเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแนวตั้งเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทางทฤษฎี เนื่องจากผลของอิมเมจเอฟเฟกต์ (image effect) หัวเขียนแบบเดี่ยวที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั่วไป (rectangular single pole) เมื่อมี SUL จะส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์อิมิตัว (saturation flux density) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 60 % ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าโคเออร์ซิวิตีของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ ดังนั้น การปรับปรุงรูปแบบของหัวเขียนช่วยให้สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนมีค่าเพิ่มขึ้นจนสามารถเพิ่มค่าโคเออร์ซิวิตีในแผ่นบันทึกข้อมูลได้

2.2.4.2 เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กที่สูง (high field gradient)

หัวเขียนต้องสร้างสนามแม่เหล็กที่มีเกรเดียนต์สูงทั้งในแนวครอสเท็คและคาน์แทร็ค เพื่อเพิ่มความคมชัดบริเวณรอยต่อของบิตบนแผ่นบันทึกข้อมูล เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กมีความสำคัญต่อข้อจำกัดของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear effect) เช่น non-linear transition shift (NLTS) ตำแหน่งศูนย์กลางจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวน (jitter) เป็นต้น

2.2.4.3 การลบแทร็คด้านข้าง (side track erasure : STE) หรือสนามแม่เหล็กบริเวณโพลย้อนกลับ (return pole field) ที่ต่ำ

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.14 จะต้องมีสนามแม่เหล็กที่โพลย้อนกลับที่ต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้สนามที่โพลย้อนกลับนี้ไปเปลี่ยนทิศของแมกเน็ทไอเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล หากสนามแม่เหล็กที่โพลย้อนกลับมีค่ามากพอที่จะเปลี่ยนทิศของแมกเน็ทไอเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล จะทำให้เกิดการเขียนข้อมูลที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นบนแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งเรียกการลบข้อมูลของสนามแม่เหล็กที่โพลย้อนกลับว่า การลบแทร็คด้านข้าง การลบแทร็คด้านข้างสามารถเกิดขึ้นได้กับทุก ๆ แทร็คที่กำลังถูกเขียนข้อมูลอยู่ การย้อนกลับของกำแพงพลังงาน (energy barrier) จากการให้ความร้อนของแม่เหล็กมีการตอบสนองที่ดีต่อสนามแม่เหล็กที่เข้ามา แม้ว่าสนามแม่เหล็กจากโพลย้อนกลับจะมีค่าน้อย แต่สามารถทำให้เกิด STE ขึ้นได้ ถ้าหัวเขียนอยู่บนแทร็คเดิมนาน ๆ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการสร้างโพลย้อนกลับให้มีขนาดใหญ่ หรือใช้หัวเขียนที่มีการออกแบบเป็นพิเศษที่เรียกว่า คัสป์ฟิลด์ซิงเกิลโพล (cusp field single pole type : CF-SPT) หัวเขียนแบบ CF-SPT จะมีโพลหลักจะถูกขนาบด้วยโพลย้อนกลับ เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กถูกกระจายไปยังโพลย้อนกลับทั้งสองข้างของโพลหลัก ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่โพลย้อนกลับจึงมีค่าลดลง โดยหัวเขียนแบบ CF-SPT ประกอบไปด้วยขดลวดแพนเค้ก 2 อัน โดยมีโพลหลักอยู่ตรงกลาง กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดทั้งสองจะมีทิศตรงข้ามกัน เรียกการจ่ายกระแสแบบนี้ว่า คัสป์ไครฟ์ (cusp derives) โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าและกระจายไปรอบปลายโพลและเส้นทางย้อนกลับ (return path)

2.2.4.4 การลบแทร็คที่อยู่ติดกัน (adjacent track erasure : ATE) หรือสนามแม่เหล็กออกนอกแทร็ค (off-track field) ที่ต่ำ

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทำได้โดยการลดขนาดของบิตลง ซึ่งความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูง ความกว้างของแทร็คจะมีขนาดเล็กกว่าไมครอน ปัจจุบันหัวเขียนไม่ได้ต้องการแค่เฉพาะสนามแม่เหล็กที่สูงด้วยการลดขนาดของหัวเขียนลงเท่านั้น แต่ยังต้องการ

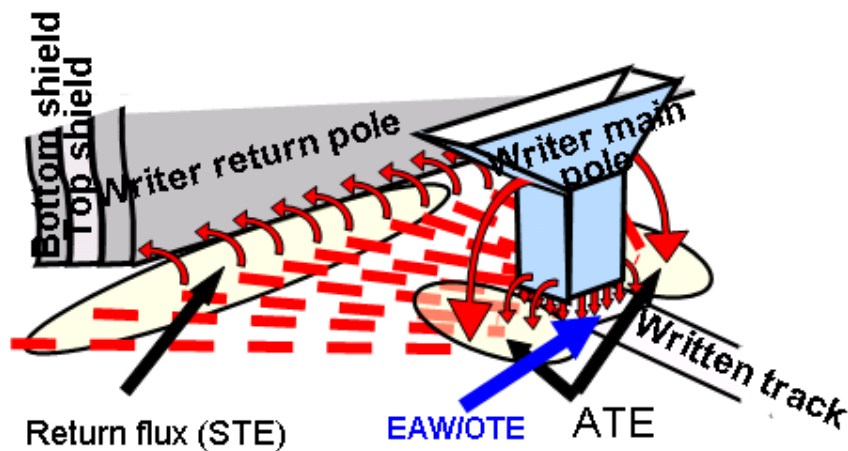
สนามแม่เหล็กด้านข้างที่ต่ำ เพื่อไม่ให้เกิดการเขียนข้อมูลด้านข้างเกิดขึ้น หรือที่เรียกว่า การรุกล้ำ (encroachment) นอกเหนือจากปัญหาการรุกล้ำที่เกิดจากหัวเขียนเหนียวทำให้เกิดการลบของข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแล้ว ยังมีปัญหาจากสนามแม่เหล็กจากแทร็คที่อยู่ติดกัน ถึงแม้สนามแม่เหล็กจากแทร็คที่อยู่ติดกันจะมีค่าน้อยกว่าสนามลบล้าง (nucleation field) ของสารที่ใช้ในการทำแผ่นบันทึกข้อมูล สนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างสูงในแทร็คที่อยู่ติดกันสามารถทำให้เกรน (grain) ของแผ่นบันทึกข้อมูลไม่เสถียรทางความร้อนหลังจากที่มีการเขียนหลาย ๆ ครั้ง บางส่วนของข้อมูลหรือทั้งหมดจะถูกลบออกไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การลบแทร็คที่อยู่ติดกัน หรือ การรบกวนแทร็คที่อยู่ติดกัน (Adjacent Track Interference : ATI)

2.2.4.5 ความเข้มสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์ (robustness to stray fields)

SUL มีประโยชน์ในการช่วยเพิ่มสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียน โดยเปรียบเสมือนภาพสะท้อนของหัวเขียนหรืออิมเมจเอฟเฟกต์ แต่ก็มีข้อบกพร่อง เนื่องจาก SUL เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าความซึมผ่านได้ (permeability) ที่สูง ดังนั้น สนามแม่เหล็กภายนอก (external field) เพียงเล็กน้อย (~ 100 Oe) สามารถไหลผ่าน SUL ที่มีความต้านทานแม่เหล็กน้อยได้ง่าย และไหลรวมไปที่ปลายโพลของหัวเขียน นำไปสู่การเขียนที่ไม่พึงประสงค์หรือการลบข้อมูลที่เขียนก่อนหน้านี้ได้ การสร้างแบบจำลองโดย Victoria และคณะ แสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าความซึมผ่านได้ของ SUL ลงได้ โดยไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน นอกจากนี้การออกแบบอื่น ๆ เช่น การใช้สารสังเคราะห์เอนไทเฟอร์โรแมกเนติกใน SUL เพื่อลดการก่อดั้วของโดเมนที่ไม่พึงประสงค์ใน SUL

2.2.4.6 ตอบสนองกับความถี่ที่ดี

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กควรมีการตอบสนองต่อความถี่ที่ดี การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของหัวเขียนควรมีความไวมากพอที่จะรองรับอัตราการเขียนที่สูงได้ โดยเวลาการเปลี่ยนแปลงของหัวเขียนขึ้นอยู่กับค่าคงที่การหน่วง (damping constant) โดยสามารถลดเวลาในการตอบสนองของหัวเขียนได้โดยการออกแบบให้หัวเขียนมีความเหนียว (inductance) และความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ต่ำมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อลดเวลาการตอบสนองลง



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการลบข้อมูลชนิดต่าง ๆ

ที่มา : Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads. May 2017. Available from

https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/99054/Patwari_umn_0130E_11497.pdf?sequence=1&isAllowed=y

2.2.4.7 การลบข้อมูลหลังการเขียน (erase after write : EAW) หรือสนามแม่เหล็กคงค้างในหัวเขียน (remnant head field) ที่ต่ำ

เมื่อหยุดจ่ายกระแสให้กลับหัวเขียน หัวเขียนจะต้องใช้เวลาในการกลับสู่สถานะคงค้าง (remnant state) ระหว่างกระบวนการคลายตัว (relaxation process) บางครั้งหัวเขียนจะค้างอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (meta-stable state) ซึ่งสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนในสภาวะนี้มีค่ามากพอที่จะสามารถลบข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์หรืออาจจะลบข้อมูลที่เขียนไว้ก่อนหน้าบางส่วนได้ โหมดที่ผิดพลาดนี้ เรียกว่า การลบข้อมูลหลังการเขียน (Erase After Write : EAW) หรือ สภาวะคงค้างที่ปลายโพล (pole tip remanence) นอกจากนี้ยังรู้จักกันในชื่อ การลบข้อมูลบนแทร็ค (on track erasure : OTE) เนื่องจากหัวเขียนได้ลบข้อมูลบนแทร็คเดียวกัน แม้ว่าหัวเขียนจะปิดอยู่ จะแตกต่างจากกรณีของ ATE อย่างชัดเจน โดยในกรณีของ ATE จะเป็นการลบข้อมูลของแทร็คที่อยู่ติดกับแทร็คที่หัวเขียนกำลังทำการเขียนอยู่ รูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นความแตกต่างของกลไกการลบแต่ละประเภทของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง จึงจำเป็นต้องทำให้หัวเขียนไม่เกิด EAW เพราะหากหัวเขียนเกิด EAW ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่กำลังใช้งานอยู่ จะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมาก [18]

2.3 สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

ในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 James Clerk Maxwell ได้เสนอกฎของสมการซึ่งสมการเหล่านั้นได้สรุปทั้งหมดของปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่รู้จักกันในสมัยนั้น สมการเหล่านั้นถูกลดรูปให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์โดย Oliver Heaviside ร่วมกับ Josiah Willard Gibbs ซึ่งทำให้ง่ายขึ้น สมการของแมกซ์เวลล์ที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งถูกทำให้เรียบง่ายโดย Heaviside คือ

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.10)$$

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

\mathbf{E} คือ สนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเมตร)

\mathbf{D} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (คูลอมบ์ต่อตารางเมตร)

\mathbf{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)

\mathbf{H} คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร)

\mathbf{J} คือ ความหนาแน่นกระแส (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์ต่อลูกบาศก์เมตร)

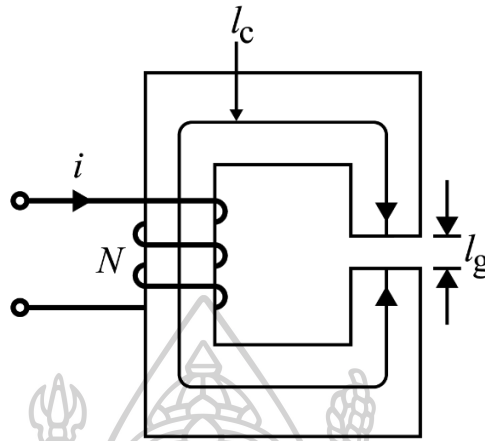
t คือ เวลา (วินาที)

โดย สมการที่ (2.8) เป็นกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) สมการที่ (2.9) เป็นส่วนขยายของกฎของแอมแปร์ (Ampere's circuital law) สมการที่ (2.10) เป็นกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law) และ สมการที่ (2.11) ยืนยันการไม่มีอยู่ของแม่เหล็กขั้วเดียว (magnetic monopole) [19]

2.4 วงจรแม่เหล็กสมมูลของหัวเขียน (equivalent magnetic circuit for write head)

ในอุปกรณ์ไฟฟ้า อินพุตและเอาต์พุตของระบบแม่เหล็กถูกแยกออกจากช่องว่าง (air gap) ในทางปฏิบัติต้องฟลักซ์แม่เหล็กในแกนแม่เหล็ก (magnetic core) และช่องว่างต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น ในช่องว่างซึ่งเป็นอากาศต้องใช้แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force : mmf) ที่มากกว่าในแกนแม่เหล็ก เนื่องจากมีความต้านทานแม่เหล็ก (magnetic reluctance) ที่สูงกว่า ถ้าค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่ามาก แกนแม่เหล็กจะอิ่มตัว แต่สำหรับแกนอากาศ

จะไม่มีกราฟอ้อมตัวเหมือนกับเส้นโค้ง B-H (B-H curve) สำหรับตัวกลางที่เป็นอากาศกราฟจะเป็นเส้นตรง เนื่องจากความซึมผ่านได้ของอากาศมีค่าคงที่



รูปที่ 2.16 แกนแม่เหล็กที่มีช่องว่าง

ที่มา : **Opposites Attract: A Review of Basic Magnetic Theories**. May 2017. Available from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-review-of-basic-magnetic-theories/>

$$mmf = Ni \quad (2.12)$$

การอธิบายโครงสร้างแม่เหล็กที่ประกอบด้วยขดลวดและช่องว่างที่มีความยาวเฉลี่ย L ดังรูปที่ 2.16 โดยแกนแม่เหล็กมีความต้านทานแม่เหล็ก R_c พื้นที่หน้าตัด A_c และช่องว่างมีความต้านทานแม่เหล็ก R_g พื้นที่หน้าตัด A_g

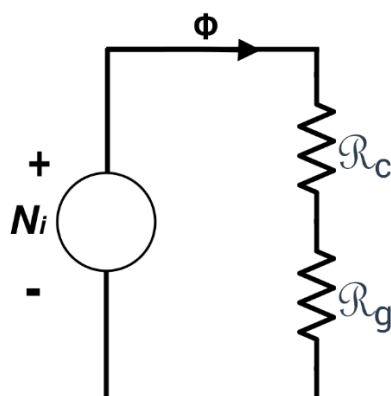
$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad (2.13)$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_g A_g} \quad (2.14)$$

$$\Phi = \frac{Ni}{R_c + R_g} \quad (2.15)$$

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (2.16)$$

พิจารณาช่องว่างที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นผลจากฟลักซ์รั่วไหลสามารถตัดทิ้งได้ สมมติว่าไม่มีการอ้อมตัว และพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องว่าง ความหนาแน่นฟลักซ์ (flux density : Φ) จะมีค่าเท่ากันทั้งในแกนแม่เหล็กและแกนอากาศด้วยอัตราส่วนของความหนาแน่นฟลักซ์ต่อพื้นที่หน้าตัดของแกน วงจรสมมูลในกรณีนี้เป็นดังรูปที่ 2.17 ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับหัวเขียน



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของแกนแม่เหล็กที่มีช่องว่าง

ที่มา : **Opposites Attract: A Review of Basic Magnetic Theories**. May 2017. Available from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-review-of-basic-magnetic-theories/>

2.5 การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองของกระบวนเขียนของหัวเขียนแม่เหล็กแนวตั้งด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ กระแสทั้งหมด (total current) ที่ถูกจ่ายให้กับขดลวดตามเส้นทางของกระแส (current path) จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กภายนอกขึ้น โปรแกรมจำลอง (simulator) จะให้ผลเฉลยของความเข้มสนามแม่เหล็ก H และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ซึ่งได้จากการคำนวณ H

2.5.1 ทฤษฎี

ระบบการคำนวณสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับเวลา (static magnetic field) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ระบบจะดำเนินการแก้ปัญหาการนำกระแสไฟฟ้า (conduction current) เพื่อจำลองการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยคำนวณความหนาแน่นกระแส (current density : J) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) ภายในตัวนำ

2. ระบบจะดำเนินการแก้ปัญหสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยคำนวณสนามแม่เหล็กภายนอก H จากความหนาแน่นกระแสของแหล่งกำเนิด

2.5.2 การแก้ปัญหาการนำกระแสไฟฟ้า

ก่อนโปรแกรมจะจำลองเพื่อคำนวณหาสนามแม่เหล็ก จะคำนวณหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายในตัวนำทั้งหมด โดยจะคำนวณเฉพาะกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ

2.5.3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ความหนาแน่นกระแส \vec{J} แปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (potential difference)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \nabla \psi \quad (2.17)$$

เมื่อ \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ในวัสดุ

ψ คือ ศักย์ไฟฟ้า (electric potential)

ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady state condition) จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ออกจากพื้นที่เล็กใด ๆ จะต้องมีการไหลของประจุเข้าสู่พื้นที่นั้น ๆ ดังนั้น ความหนาแน่นประจุ $\rho(x, y, z)$ ในพื้นที่ใด ๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

เนื่องจาก $-\sigma \nabla \psi = \vec{J}$ ดังนั้น สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของศักย์ไฟฟ้า ψ ได้

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (2.19)$$

สมการนี้จะถูกคำนวณเป็นขั้นตอนแรกในโปรแกรมจำลอง

2.5.4 การแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับเวลา

หลังจากการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแล้ว จะทำแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กสถิต (magnetostatic field) โดยการคำนวณหาสนามแม่เหล็กด้วยกฎของแอมแปร์และสมการของแมกซ์เวลล์ซึ่งอธิบายความต่อเนื่องของฟลักซ์ ดังสมการ

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.20)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.21)$$

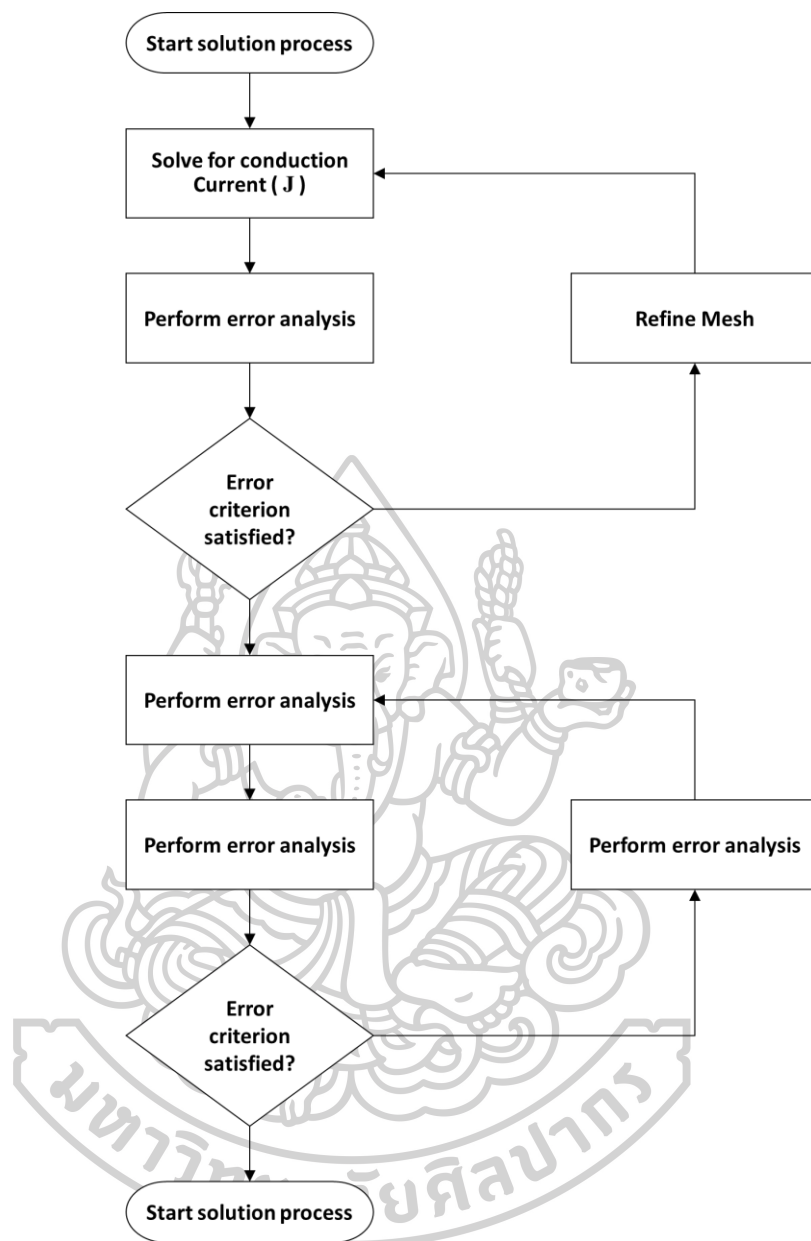
ตามลำดับ เมื่อ $\vec{H}(x, y)$ คือสนามแม่เหล็กและ $\vec{J}(x, y)$ คือ สนามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density field) และ $\vec{B}(x, y)$ คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (2.22)$$

เมื่อ μ_r คือ ความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (relative permeability) และ μ_0 คือ ความซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (permeability of vacuum) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] ในการคำนวณสมการที่ (2.20) และ (2.21) โปรแกรมจำลองจะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกที่กำหนดผ่านเงื่อนไขขอบเขต

2.5.5 กระบวนการแก้ปัญหา

การแก้ปัญหาแม่เหล็กสถิต โปรแกรมคำนวณจะเริ่มคำนวณจากการนำกระแสไฟฟ้า \vec{J} ในตัวนำทั้งหมด การคำนวณเพื่อแก้ปัญหาสำหรับ \vec{J} จะคำนวณหาค่าความผิดพลาดของคำตอบที่ได้และเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของความผิดพลาดในการนำกระแส ถ้าค่าความผิดพลาดมีค่ามากเกินไป จะมีการแบ่งเมช (mesh) ใหม่ด้วยทรงสี่หน้า (tetrahedron) ให้มีค่าผิดพลาดที่สูงที่สุดและเริ่มการคำนวณเพื่อหาคำตอบด้วยเงื่อนไขอื่นที่ใช้สำหรับการปรับปรุงเมชใหม่ จากนั้นจะคำนวณสนามแม่เหล็ก H ที่จุดปลายและจุดกึ่งกลางของแต่ละด้านของทรงสี่หน้าในไฟไนต์เอลิเมนต์เมช ภายใต้เงื่อนไขกระแสที่ใส่เข้าไป สำหรับวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear material) จะคำนวณสนามแม่เหล็กโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) ซึ่งใช้ความชัน (slope) ของเส้นโค้ง B-H ในการคำนวณเพื่อประมาณค่าเชิงเส้น (linear approximation) ของการแก้ปัญหาที่ไม่เชิงเส้น การประมาณค่านี้ใช้แทนในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับ \vec{H} ผลเฉลยจะถูกเขียนเป็นไฟล์หลังจากการแก้ปัญหาเสร็จสิ้นและทำการวิเคราะห์ข้อผิดพลาด การปรับเปลี่ยนผลการวิเคราะห์ จะทำการปรับปรุงเมชใหม่ด้วยให้มีค่าผิดพลาดที่สูงที่สุด และทำการคำนวณจนกว่าจะอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ฝั่งงานของการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของแบบจำลองในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไป [20]

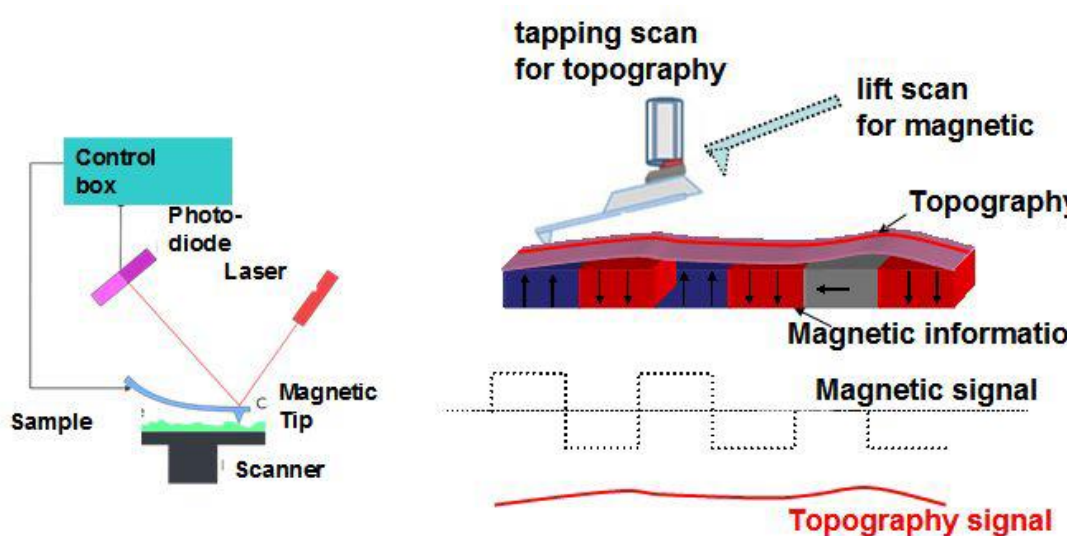


รูปที่ 2.18 ฟังก์ชันลำดับในการแก้ปัญหาสนามแม่เหล็กของโปรแกรมสำเร็จรูปโดยทั่วไป
ที่มา : K.S. Song, “Resolution of Patterned Magnetic Media.” Massachusetts Institute of Technology,
(2000): 48-52.

2.6 กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy : MFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็น โหมดพิเศษของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope : AFM) เทคนิคนี้ใช้หัววัดที่เป็นแม่เหล็ก โดยเมื่อนำหัววัดไปใกล้กับตัวอย่าง อัตรกิริยาของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากตัวอย่างใกล้พื้นผิวของตัวอย่าง ความเข้มของอัตรกิริยาแม่เหล็กที่ออกมาสามารถได้โดยการเคลื่อนที่ของทิป (tip) ที่สแกนไปบนตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกนำมาใช้ไม่นานหลักการคิดค้นกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และกลายมาเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการสร้างภาพความละเอียดสูงโดยไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง หรือสภาพแวดล้อม นับตั้งแต่ช่วงศตวรรษที่ 1990 เป็นต้นมา มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็ก เช่นเดียวกับการพัฒนาส่วนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็ก MFM สามารถตรวจวัดปริมาณที่น่าสนใจ สำหรับกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กได้ โดยวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากแผ่นบันทึกข้อมูลหรือหัวเขียน



รูปที่ 2.19 ผังแสดงการทำงานเบื้องต้นของ MFM

ที่มา : Head-disk Interface Study for Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR) and Plasmonic Nanolithography for Patterned Media. May 2017. Available from <http://escholarship.org/uc/item/0g8197fc.pdf>

MFM มีการสแกน 2 แบบ เพื่อวัดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.19 โดยครั้งแรก ทิปจะสแกนด้วยโหมดกึ่งสัมผัส (tapping mode) เพื่อสร้างภาพพื้นผิว (surface topography) ของตัวอย่าง หลังจากนั้นจะสแกนด้วยโหมดไม่สัมผัสแบบระยะห่างคงที่ (lift mode) โดยทิปจะถูกยกออกห่างจากตัวอย่างที่ระยะสูงคงที่ค่าหนึ่งตามภาพพื้นผิวที่แสดงได้ในครั้งแรก ที่ระยะห่างคงที่ แรงระหว่างโมเลกุลหรืออะตอม จะมีอิทธิฤทธิ์ที่อ่อนมากและสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นจะสามารถวัดอิทธิฤทธิ์ทางแม่เหล็กได้เป็นหลัก ซึ่งเกิดจากอิทธิฤทธิ์ระหว่างทิปกับตัวอย่าง โดยข้อมูลของสนามแม่เหล็กจะได้รับจากการวัดในครั้งนี้ [21]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความจุของฮาร์ดดิสก์ใดรฟ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งด้วยวิธีการต่าง ๆ กัน

ในปี 2008 Akira Morinaga และคณะ ได้หาวิธีลดสนามรั่วไหลที่ออกมาจากหัวเขียน (write-field leakage) ไปสู่แทร็คที่อยู่ติดกัน เพื่อที่จะเพิ่มความหนาแน่นของแทร็คในการบันทึกข้อมูลแนวตั้ง โดยสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อออกแบบหัวเขียนที่เหมาะสม ซึ่งช่วยลดสนามรั่วไหล และยืนยันผลโดยการทดลองศึกษา ATI ด้วยสปินสแตนดาร์ด (spinstand) ข้อมูลจากทั้งการสร้างแบบจำลองและการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพของ ATI สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ (wraparound- shielded : WAS) ซึ่งยังคงรักษาความสามารถในการเขียน (write-ability) ได้ดีพอสมควร เพื่อที่จะลดสนามรั่วไหล หัวเขียน WAS จะต้องมีทรอท (throat) ที่หนา ความซึมผ่านได้และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก-อิมพัลส์ที่สูง นอกจากนี้ยังยืนยันยิ่งว่า การเปลี่ยนประสิทธิภาพของ ATI เนื่องจากการกระจายตัวของความยาวแฟลร์ (flare) สามารถยับยั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับหัวเขียน WAS [3]

ในปี 2009 Kenichi Takano และคณะ ได้ศึกษาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งที่มีลักษณะของปลายโพลต่างกัน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ บนพื้นฐานของการจำลองแบบไมโครแมกเนติก (micromagnetic simulation) พบว่าหัวเขียนที่มีลักษณะเรียวลง (taper pole) สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนมีค่าเพิ่มขึ้น 13 % - 25 % และมีเกรเดียนท์ที่ดีขึ้น เพราะแมกนีไทเซชันของโพลหลักจะตั้งฉากกับ air bearing surface (ABS) มากขึ้น และเพิ่มประจุแม่เหล็ก (magnetic charge) ซึ่งไม่ได้พบเฉพาะบริเวณด้าน ABS แต่ยังพบบริเวณของหัวเขียนและชิลด์ที่เป็นมุมเอียงอีกด้วย และยังพบอีกว่าชิลด์ด้านข้าง (side shield) ช่วยลดสนามรั่วไหล (fringing field) ในแนวครอสแทร็ค แต่รูปร่างของสนามแม่เหล็กไม่ง่ายเหมือนในผลจากจำลองของ FEM ชิลด์ด้านข้างมีโดเมนที่ซับซ้อนรอบขอบ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะเปลี่ยนทิศเมื่อถูกกระตุ้น โดยกระแสที่ใช้ในการเขียน ซึ่งต่างจากสถานการณ์ของชิลด์ด้านหลัง (trailing-shield) ประจุแม่เหล็กบริเวณผนังของชิลด์ด้านข้างทำให้เกิดพีค (peak) ของสนามแม่เหล็กนอกแทร็คซึ่งเกิดจากสนามรั่วไหล และสามารถลดได้โดยการออกแบบโครงสร้างของชิลด์ด้านข้างที่เหมาะสม [18]

ในปี 2010 Daniel Z. Bai และคณะ ได้ทำการศึกษาหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบ ซึ่งประกอบด้วยทั้งชิลด์ด้านหลังและชิลด์ด้านข้าง โดยได้ศึกษาทั้งการสร้างแบบจำลองและการทดลอง หัวเขียน WAS แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าหัวเขียนชนิดชิลด์ด้านหลัง

ในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ในขณะที่ยังคงรักษาประสิทธิภาพด้านความถี่ได้ ชิลด์ด้านข้างช่วยลดสนามรบกวนได้อย่างมาก ทำให้สามารถมีความหนาแน่นแทร็คที่สูงได้ [22]

ในปี 2012 Lisha Wang และคณะ ได้ใช้การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ ในการศึกษาหัวเขียนที่ประกอบด้วยชิลด์ด้านข้าง หัวเขียนที่มีชิลด์ด้านข้างเพียงครึ่งเดียว (half side shielded writer) ได้รับความสนใจ เนื่องจากเชื่อว่าจะเป็นรูปแบบที่ให้สนามรบกวนบริเวณด้านข้างที่สูงซึ่งเหมาะกับการเขียนข้อมูลแบบซ้อนทับกัน (shingled recording) พบว่าแม้ว่าหัวเขียนแบบมีชิลด์ด้านข้างเพียงครึ่งเดียวจะให้สนามเหล็กบนแทร็คที่สูง แต่ก็มี ความโค้ง (curvature) บริเวณขอบของแทร็คเพิ่มขึ้นด้วย ความโค้งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดข้อจำกัด ในขนาดของโพลที่เพิ่มขึ้น [7]

ในปี 2013 Yuhui Tang และคณะ ใช้เทคนิคฟุตพริ้นต์ (footprint technique) ในการศึกษา หัวเขียนแนวตั้งที่มีรูปแบบต่างกัน พบการตอบสนองที่ไม่สมมาตรกันของชิลด์ด้านข้างในหัวเขียน แบบมีชิลด์ล้อมรอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองไมโครแมกเนติก ผลกระทบจากความไม่- สมมาตรของชิลด์ด้านข้างของเกรเดียนท์ในแนวครอสและ ATE ได้รับการยืนยัน [4]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ สนใจหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีรูปแบบชิลด์แม่เหล็ก ต่างกัน โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ เพื่อศึกษา ผลของชิลด์แม่เหล็กที่มีต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน สำหรับขั้นตอน การศึกษาจะกล่าวในบทต่อไป



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะศึกษาผลกระทบจากรูปแบบขดลวดและขนาดของช่องว่างระหว่างขดลวดกับโพลหลักต่อสนามแม่เหล็กของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองและวิธีการนำค่าของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะเริ่มจากการทดสอบโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์ เพื่อคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้นจะเป็นสร้างแบบจำลองของหัวเขียนแบบต่าง ๆ เพื่อคำนวณค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แล้วนำสนามแม่เหล็กที่ได้มาคำนวณหาค่าเกรเดียนท์ เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

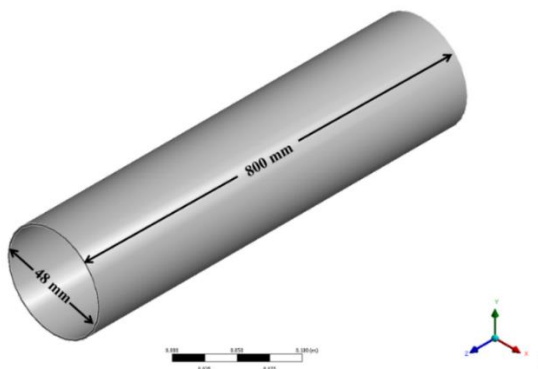
3.1 การทดสอบโปรแกรมสำเร็จรูปด้วยแบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์

โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้สร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ยืมจากผู้ผลิตโปรแกรมทดสอบมาเป็นอย่างดีแล้วและยังมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในงานที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นการทดสอบโปรแกรมสำเร็จรูปในหัวข้อนี้ ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรม แต่เพื่อให้ผู้วิจัยเข้าใจและทราบถึงวิธีการใช้โปรแกรมในการสร้างแบบจำลองอย่างถูกต้อง เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยต่อไป

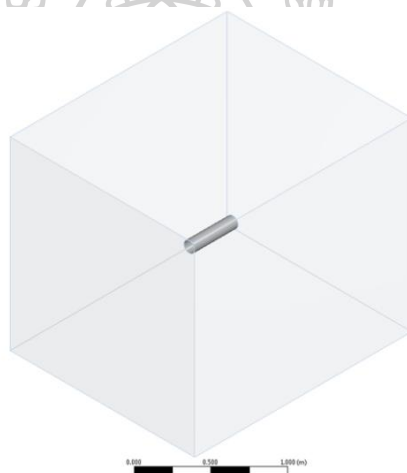
แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบคือขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกจ่ายกระแส เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้บริเวณกึ่งกลางของขดลวดโซลินอยด์ แบบจำลองนี้ถูกเลือกนำมาใช้เนื่องจากสามารถนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎี และปัญหานี้ยังมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.1.1 แบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์

แบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์เป็นรูปทรงกระบอกกลวงยาว ดังรูปที่ 3.1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 48 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร ทำจากโลหะผสมทองแดง (copper alloy) มีค่าความซึมผ่านได้สัมพัทธ์ 1 และสภาพต้านทาน (resistivity) 1.694×10^{-8} โอห์ม-เมตร (Ωm) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อยู่ภายในฝิวปิด (enclosure) ซึ่งเป็นอากาศ ดังรูปที่ 3.2 โดยแต่ละด้านของฝิวปิดห่างจากแบบจำลอง 0.5 เมตร ในการคำนวณจะกำหนดให้ขดลวดโซลินอยด์มีจำนวนรอบ 1000 รอบต่อพื้นที่นำกระแส 0.0008 ตารางเมตร และจ่ายกระแสให้กับขดลวด 1 แอมแปร์

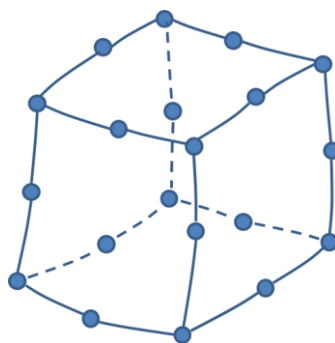


รูปที่ 3.1 ขดลวดโซลินอยด์ที่สร้างจากโปรแกรมสำเร็จรูป

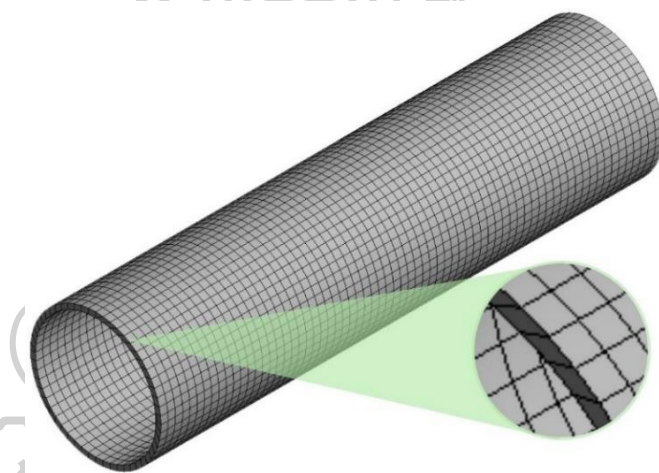


รูปที่ 3.2 ผิวปิดที่ล้อมรอบแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์

จากนั้นทำการสร้างเมช โดยโปรแกรมจะสร้างและกำหนดขนาดของเอลิเมนต์แบบออต โนมัตติ มีลักษณะเป็นรูปทรงหกหน้าแบบ 20 โหนด (20 node quadratic hexahedral) ซึ่งถูกกำหนดไว้เป็นตัวเลือกออต โนมัตติ (default) ดังรูปที่ 3.2 แบบจำลองของขดลวดโซลินอยด์ที่ทำการสร้างเมชแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 หลังจากนั้น โปรแกรมจะคำนวณหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก โดยสามารถกำหนดตำแหน่งที่สนใจในการดึงข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ก็ได้ กรณีนี้จะกำหนดเป็นเส้นตรงบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถกำหนดจุดตัวอย่างได้สูงสุดจำนวน 200 จุด (202 ค่า) โดยจุดเหล่านี้จะถูกนำข้อมูลออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป และโปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณที่ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.3 รูปทรงของเอลิเมนต์แบบหกหน้า 20 โหนด

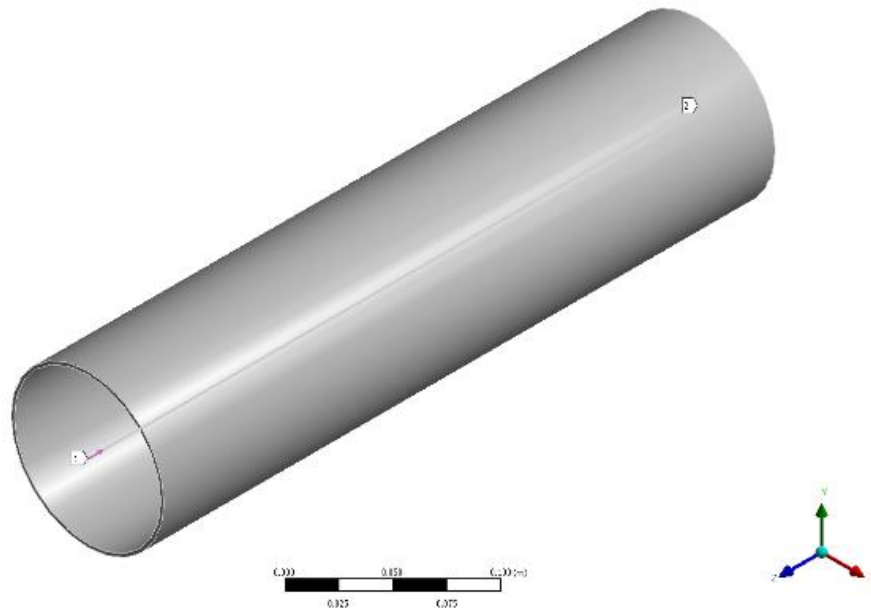


รูปที่ 3.4 ลักษณะเมฆของแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์

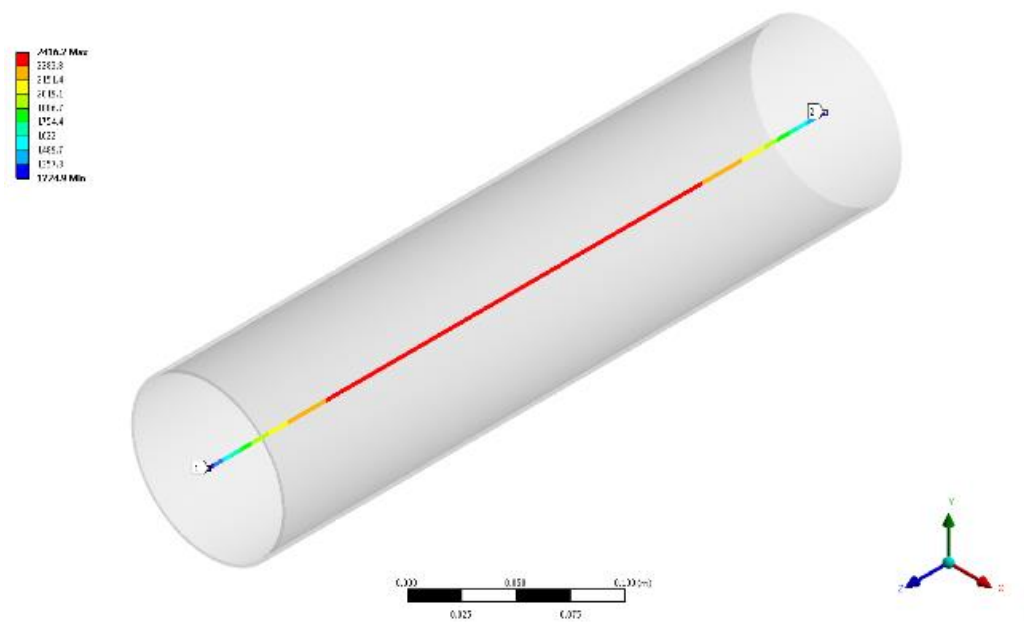
3.1.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม

จากการสร้างแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์ สามารถนำข้อมูลออกจากโปรแกรม เพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ โดยนำข้อมูลที่ได้อาวาดกราฟ ผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 3.7

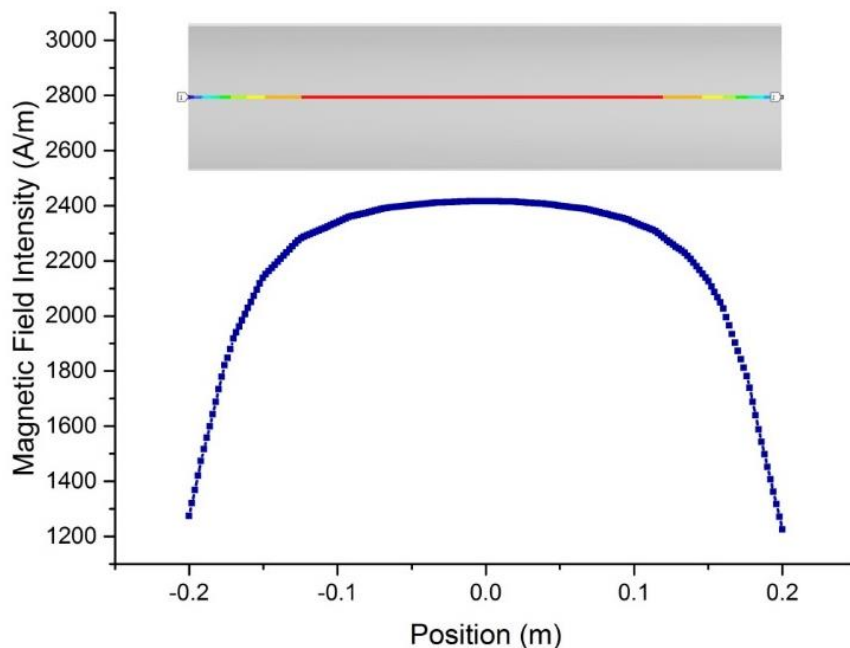
พบว่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดคือ 2415.8 แอมแปร์ต่อเมตร ที่บริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งภายในโปรแกรมจะแสดงเป็นสีแดง ส่วนบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่ใช้ในการดึงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 3.6 ผลการคำนวณที่แสดงใน โปรแกรม



รูปที่ 3.7 กราฟของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

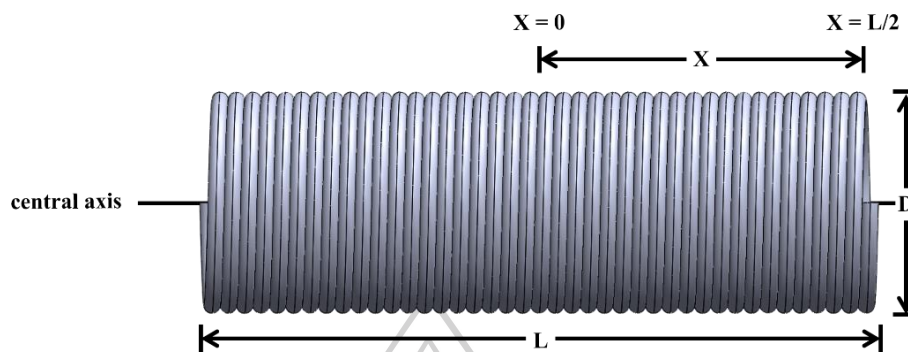
3.1.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมและจากการคำนวณ

ขดลวดโซลินอยด์บางแบบจำกัด (finite thin shell solenoid) ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความยาวของขดลวด 0.4 เมตร จำนวนรอบของขดลวด 1000 รอบ เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวด 1 แอมแปร์ สามารถคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ (3.1)

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

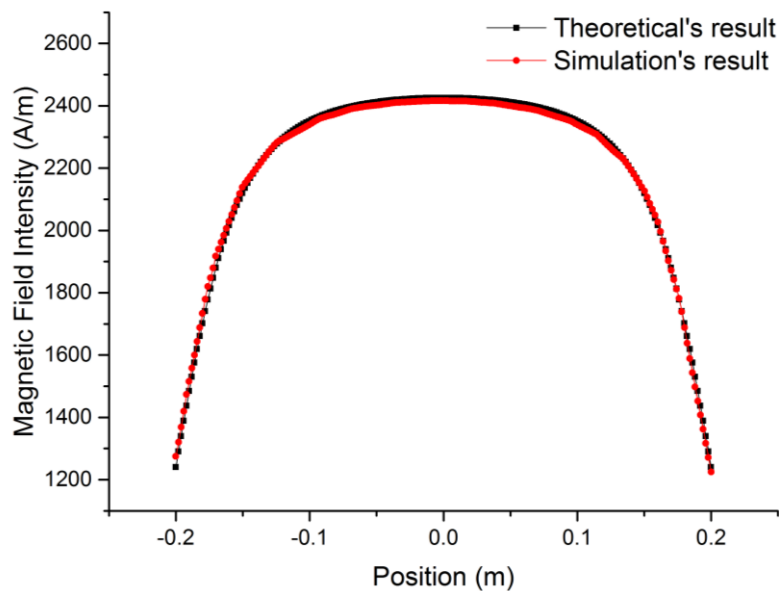
- H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์ต่อเมตร)
- N คือ จำนวนของขดลวด (รอบ)
- L คือ ความยาวของขดลวด (เมตร)
- I คือ กระแสไฟฟ้า (เมตร)
- X คือ ระยะจากกึ่งกลางของขดลวด (เมตร)
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (เมตร)

พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2425.35 แอมแปร์ต่อเมตร ส่วนบริเวณอื่น ๆ มีค่าแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ขดลวดโซลินอยด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D เมตร ความยาว L เมตร

เมื่อนำค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (สีดำ) เปรียบเทียบกับ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (สีแดง)

หลังจากนั้นนำค่าความเข้มข้นแม่เหล็กสูงสุดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีได้จากสมการที่ (3.2)

$$\text{percentage error} = \left| \frac{E - S}{S} \right| \times 100 \quad (3.2)$$

percentage error คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน

E คือ ค่าที่ได้จากการทดลองหรือสร้างแบบจำลอง

S คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งทางทฤษฎีและจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แทนค่าลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$\text{percentage error} = \left| \frac{2415.8 - 2425.35}{2425.35} \right| \times 100 \%$$

$$\text{percentage error} = 0.39 \%$$

จะพบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าเพียง 0.39 % ซึ่งมีค่าน้อยมากและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่หากต้องการความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง สามารถทำได้โดยการลดขนาดของเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กลงอีก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียงมากขึ้นและมีความละเอียดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าการคำนวณด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการคำนวณแบบจำลองต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลการคำนวณที่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก

3.2 การจำลองหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนที่มีลักษณะของซิลด์และระยะห่างของช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาผลของซิลด์ต่อเกรเดียนต์และความเข้มข้นแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของหัวเขียนลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ดีควรมีความเข้มและเกรเดียนต์ของความเข้มข้นแม่เหล็กที่สูง จะทำให้แผ่นบันทึกข้อมูลมีความจุข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานในปัจจุบัน ที่มีการเก็บข้อมูลลงในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์แบบพกพา

และขนาดของอุปกรณ์ที่มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูลให้สูงขึ้น

แบบจำลองหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการสร้างภาพจำลองของหัวเขียนที่มีลักษณะของขั้วต่าง ๆ กัน แล้วนำไปทำการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งการดำเนินการทั้งหมดดำเนินการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป แล้วนำผลการคำนวณที่ได้ออกมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปอื่น ๆ เช่น MATLAB[®] Microsoft[®] excel[®] ORIGIN[®] เป็นต้น

3.2.1 แบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

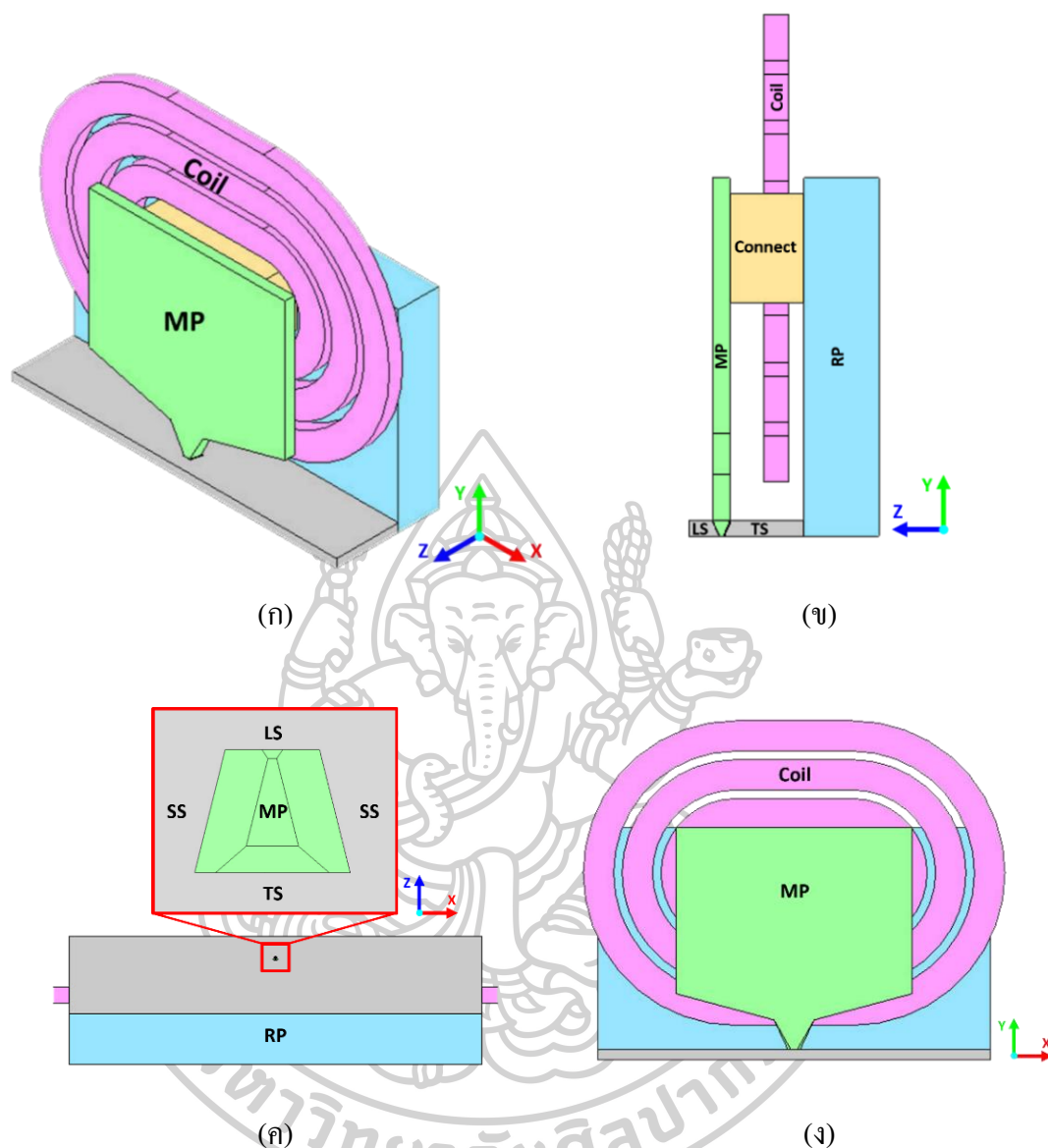
แบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะพื้นฐานดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วย โพลหลัก (main pole : MP) โพลย้อนกลับ (return pole : RP) ขั้วและขดลวด โดยขั้วจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ขั้วด้านหลัง ขั้วด้านข้าง และขั้วด้านหน้า ดังรูปที่ 3.10 (ค)

การสร้างแบบจำลองของหัวเขียนจะเริ่มจากการวาดแบบจำลองในโปรแกรมสำเร็จรูปให้ มีลักษณะและขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ดังภาคผนวก

3.2.2 คุณสมบัติของสาร

วัสดุที่ใช้ในการสร้างหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กประกอบไปด้วยวัสดุต่าง ๆ หลายชนิดทั้งที่มีความเป็นสารแม่เหล็กและไม่มีความเป็นสารแม่เหล็ก แต่ส่วนประกอบที่สำคัญของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กส่วนใหญ่จะมีความเป็นสารแม่เหล็ก ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองนี้ จะให้ความสนใจกับวัสดุที่มีความเป็นสารแม่เหล็กเท่านั้น เนื่องจากมีผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กมากกว่าวัสดุที่ไม่มีความเป็นสารแม่เหล็ก

คุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบไอโซทรอปิกเชิงเส้น (linear isotropic) ซึ่งเป็นสารที่มีค่าแมกนีไทเซชันแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งมีคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองนี้ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.10 หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลอง (ก) ISO (ข) Cross section (ค) ABS-view (ง) Front view

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไข

แบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในการศึกษาทั้งสองกรณีจะถูกล้อมรอบด้วยผิวปิด ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งผิวปิดแต่ละด้านจะอยู่ห่างจากแบบจำลอง 25 ไมโครเมตร ผิวปิดจะทำหน้าที่เป็นเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่ใช้ในการคำนวณ โดยกำหนดให้ระหว่างผิวหน้าของผิวปิดทั้งสองด้านที่ขนานกัน สนามแม่เหล็กจะต้องมีค่าต่อเนื่องกัน หัวเขียนจะถูกจ่ายกระแส

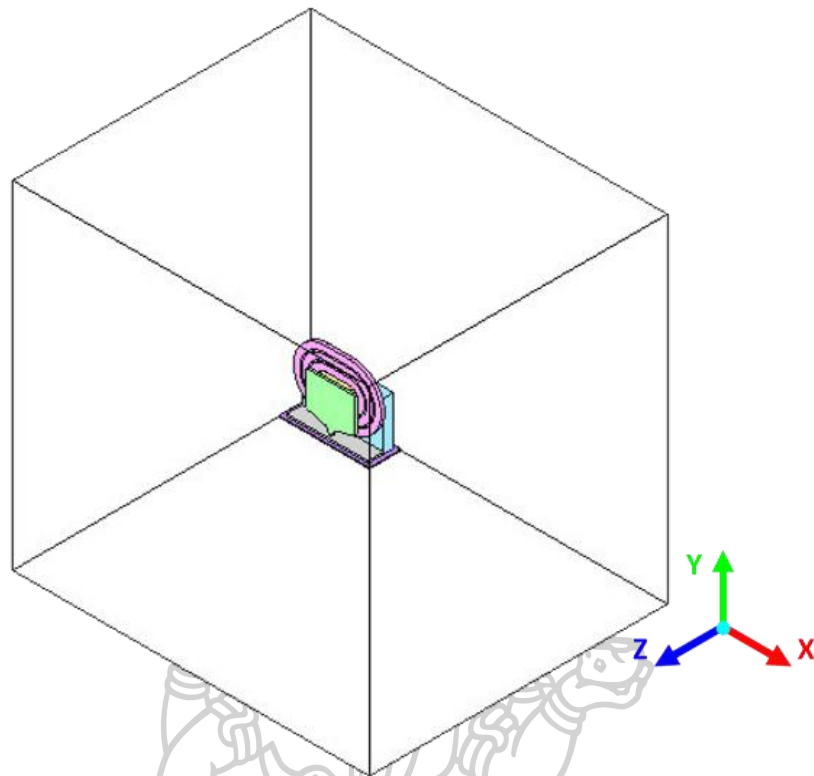
30 มิลลิแอมป์ให้กับขดลวดชนิดแพนเค้ก (pancake coil) เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในหัวใจ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลอง

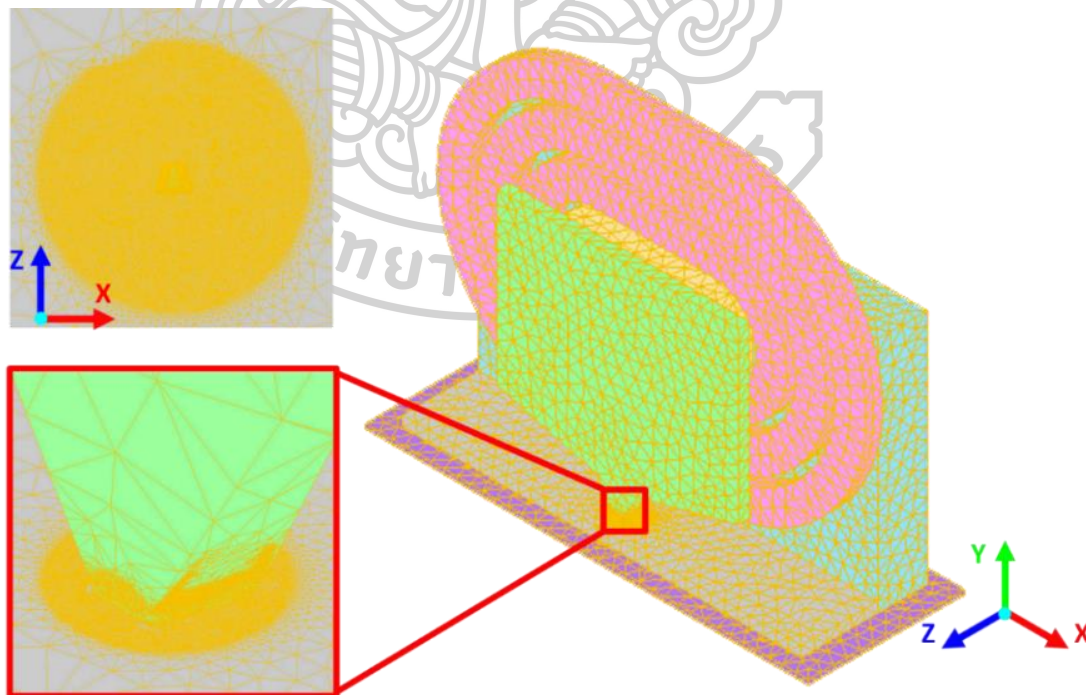
Part	Material	Saturation magnetic flux density (T)
Main pole	Fe ₆₅ Co ₃₅	2.4
Return pole	Ni ₄₅ Fe ₅₅	1.6
Leading shield	Ni ₈₀ Fe ₂₀	1
Trailing shield	Ni ₁₂ Fe ₈₈	2
Side shield	Ni ₁₂ Fe ₈₈	2

3.2.4 การสร้างเอลิเมนต์

การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองจะถูกสร้างโดยโปรแกรมแบบอัตโนมัติ โดยกำหนดให้เป็นแบบรูปทรงสี่หน้าแบบ 10 โหนด (10 node quadratic tetrahedron) ซึ่งโปรแกรมจะทำการแบ่งเอลิเมนต์หรือสร้างเมชให้เหมาะสมกับรูปทรงของแบบจำลองเป็นสำคัญ นอกจากนี้ในส่วนของบริเวณที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลยังสามารถกำหนดให้มีขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็กลงได้ ดังรูปที่ 3.12 เพื่อให้ความละเอียดของข้อมูลในบริเวณนั้น มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณลดลง แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณด้วย เนื่องจากการลดขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณจะส่งผลให้ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล (processing unit) และหน่วยความจำ (memory unit) สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.11 แบบจำลองของหัวเขินที่ถูกล้อมรอบด้วยขดลวด



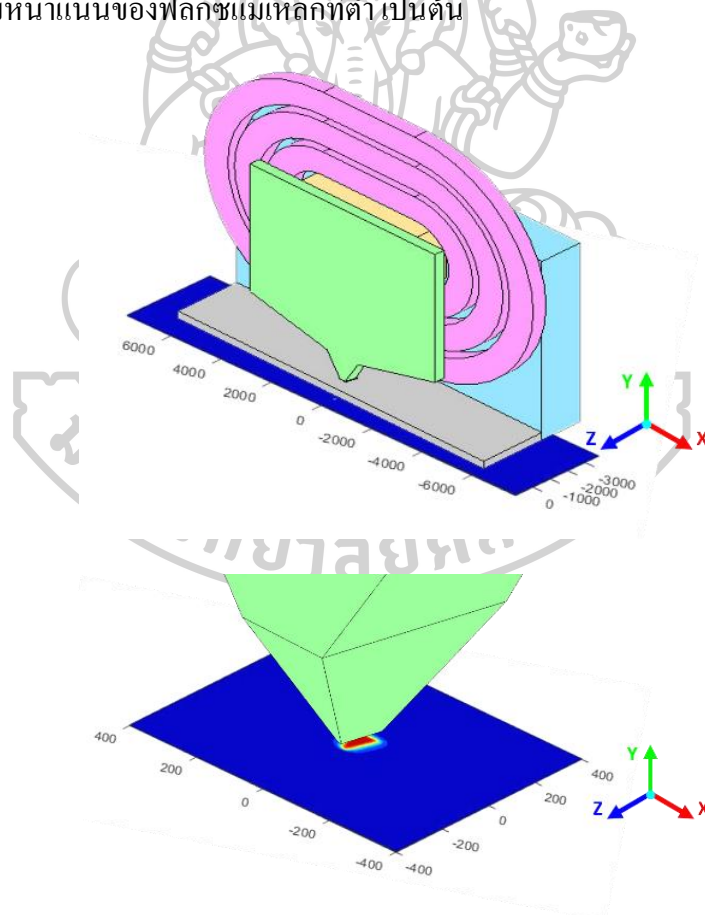
รูปที่ 3.12 แบบจำลองของหัวเขินหลังขั้นตอนการสร้างเอลิเมนต์และแบ่งเมช

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

แบบจำลองของหัวเขียนที่ถูกคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเสร็จสิ้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำออกมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะสนใจเฉพาะบริเวณปลายโพลหลักเท่านั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่ใช้ในการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำออกมาใน 2 รูปแบบด้วยกัน คือ รูปแบบของระนาบ และรูปแบบของเส้น เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของการวิเคราะห์ข้อมูล

3.2.5.1 การพิจารณาข้อมูลบนระนาบ

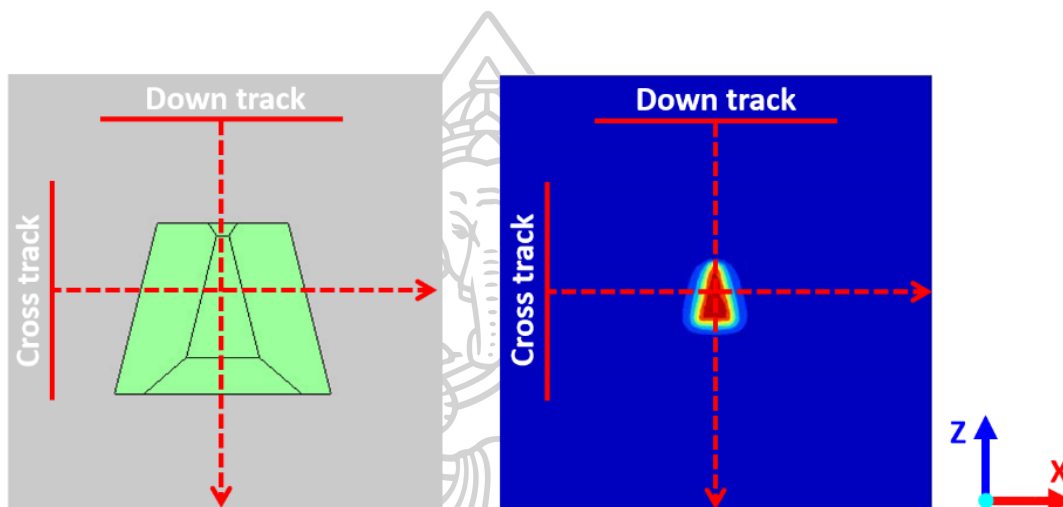
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ บนระนาบ XZ ซึ่งอยู่ห่างจากด้าน ABS 5 นาโนเมตร จะถูกดึงออกมาวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.13 โดยสีต่าง ๆ จะบ่งบอกถึงขนาดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เช่น สีแดงจะแสดงถึงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูง สีน้ำเงินจะแสดงถึงความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 3.13 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระนาบ 5 นาโนเมตรจากด้าน ABS

3.2.5.2 ข้อมูลในรูปแบบของเส้น

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ จะถูกดึงออกมาในรูปแบบของเส้น ทั้งในแนวครอสแตรีกและดาวน์แตรีก โดยจะดึงข้อมูลระหว่าง -400 ถึง 400 นาโนเมตร จากจุดกึ่งกลางโพล ดังรูปที่ 3.14 ที่ระยะห่างจากด้าน ABS 5 นาโนเมตร ข้อมูลที่ถูกดึงออกมาจะมีจำนวนสูงสุดได้ 202 จุด ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของโปรแกรมที่สามารถดึงออกมาได้ ข้อมูลที่ถูกนำออกมาทั้งในแนวครอสแตรีกและดาวน์แตรีกจะถูกนำมาหาค่า FWHM และค่าเกรเดียนท์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งที่ทำการดึงข้อมูลในแนวครอสแตรีกและดาวน์แตรีก

บทที่ 4

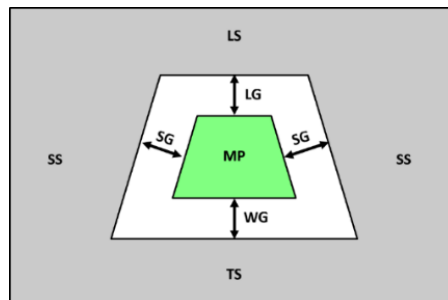
การวิเคราะห์สนามความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้ง

หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กมีการออกแบบให้ใช้วัสดุและรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการเขียนข้อมูลของหัวเขียนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งรูปแบบของชิลด์เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหัวเขียน ปัจจุบันหัวเขียนที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งจะเป็นหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็มซึ่งประกอบไปด้วยชิลด์ 3 ส่วน ได้แก่ ชิลด์ด้านหลัง ชิลด์ด้านข้าง และชิลด์ด้านหน้า แต่ในอดีตมีหัวเขียนอีกหลายรูปแบบที่มีส่วนประกอบของชิลด์น้อยกว่าหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม เช่น หัวเขียนชนิดมีชิลด์ล้อมรอบ หัวเขียนแบบมีชิลด์ด้านข้าง หัวเขียนแบบชิลด์ด้านหลัง และหัวเขียนแบบไม่มีชิลด์

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของชิลด์ที่ส่งผลต่อเกรเดียนต์และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างจากหัวเขียนที่มีลักษณะต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ศึกษาผลของรูปแบบชิลด์ที่แตกต่างกัน และศึกษาผลของขนาดช่องว่างต่อหัวเขียนชนิดชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม

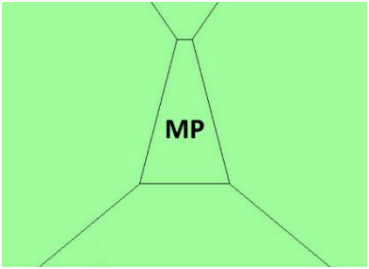
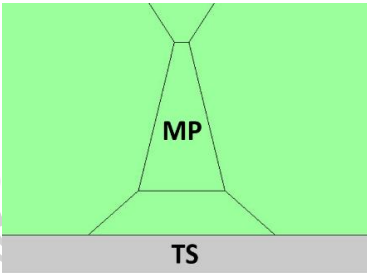
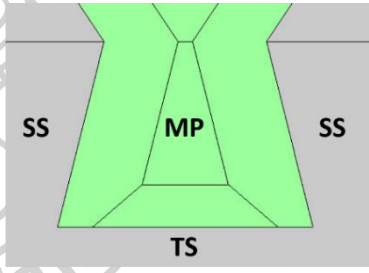
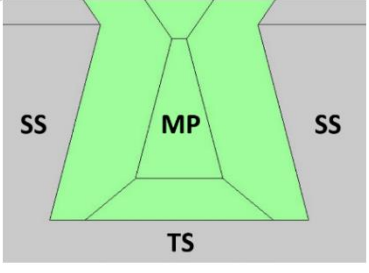
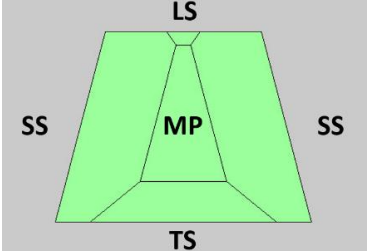
4.1 ผลของรูปแบบชิลด์ที่แตกต่างกันต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน

งานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะของชิลด์ในการแบ่งประเภทของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กออกเป็น 5 ชนิด ได้แก่ หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่ไม่มีชิลด์ (single pole writer : SP) หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่มีเฉพาะชิลด์ด้านหลัง (trailing shielded writer : TS) หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีเฉพาะชิลด์ด้านข้างและชิลด์ด้านหลัง (side shielded writer SS) หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีชิลด์ล้อมรอบ (wrap around shielded writer : WAS) และหัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม (full wrap around shielded writer : FWAS) โดยหัวเขียนแต่ละชนิดจะมีลักษณะของชิลด์ต่างกัน ดังตารางที่ 4.1



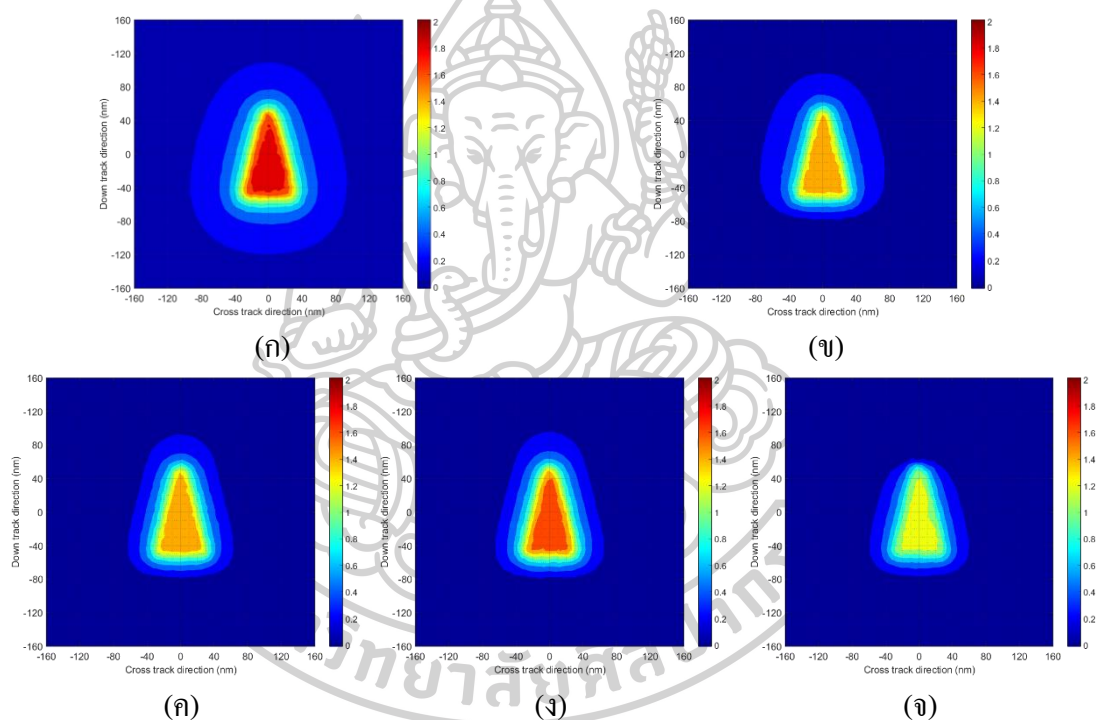
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบชิลด์และช่องว่างระหว่างโพลหลักกับชิลด์ของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของหัวเขียนแต่ละชนิด

ชนิดของหัวเขียน	ภาพด้าน ABS
หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่ไม่มีชิลด์ : มีเฉพาะส่วนของโพลหลักและรีเทิร์นโพลเท่านั้น โดยไม่มีชิลด์เป็นส่วนประกอบ	
หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่มีเฉพาะชิลด์ด้านหลัง : ประกอบด้วยโพลหลัก รีเทิร์นโพล และชิลด์ ซึ่งจะมีเฉพาะชิลด์ด้านหลังเท่านั้น ซึ่งเป็นส่วนที่ยื่นต่อมาจากรีเทิร์นโพล	
หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีเฉพาะชิลด์ด้านข้างและชิลด์ด้านหลัง : ประกอบด้วยโพลหลัก รีเทิร์นโพล และชิลด์ ในส่วนของชิลด์ประกอบด้วยชิลด์ด้านหลังและชิลด์ด้านข้าง โดยชิลด์ด้านข้างจะเป็นส่วนที่ยื่นต่อมาจากชิลด์ด้านหลังและล้อมรอบโพลหลักไว้ แต่ขอบของชิลด์บริเวณด้านหน้า จะไม่เกินขอบของด้านหน้าของโพลหลัก	
หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีชิลด์ล้อมรอบ : ประกอบด้วยโพลหลัก รีเทิร์นโพล และชิลด์ ซึ่งชิลด์ประกอบด้วยชิลด์ด้านหลัง และชิลด์ด้านข้าง โดยขอบของชิลด์บริเวณด้านหน้า จะเกินขอบด้านหน้าของโพลหลัก มีลักษณะกึ่งล้อมรอบโพลหลัก	
หัวเขียนแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม : ประกอบด้วยโพลหลักรีเทิร์นโพล และชิลด์ ในส่วนของชิลด์จะประกอบด้วยชิลด์ด้านหลัง ชิลด์ด้านข้าง และชิลด์ด้านหน้า โดยโพลหลักจะถูกล้อมรอบด้วยชิลด์ทั้งหมด	

หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบมีชิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม จะประกอบไปด้วยช่องว่างระหว่างโพลหลักกับชิลด์จำนวน 3 ช่อง ได้แก่ ช่องว่างด้านหลัง (writer gap : WG) ช่องว่างด้านข้าง (side gap : SG) และช่องว่างด้านหน้า (leading gap : LG) ดังรูปที่ 4.1 ส่วนหัวเขียนชนิดอื่น ๆ จะมีองค์ประกอบของช่องว่างระหว่างชิลด์กับโพลหลักลดลงตามลักษณะของชิลด์ในหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแต่ละประเภท

แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในหัวข้อนี้ จะมีขนาดของช่องว่างด้านหน้า 10 นาโนเมตร ขนาดของช่องว่างด้านข้าง 50 นาโนเมตร และขนาดของช่องว่างด้านหลัง 30 นาโนเมตร ผลการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.2

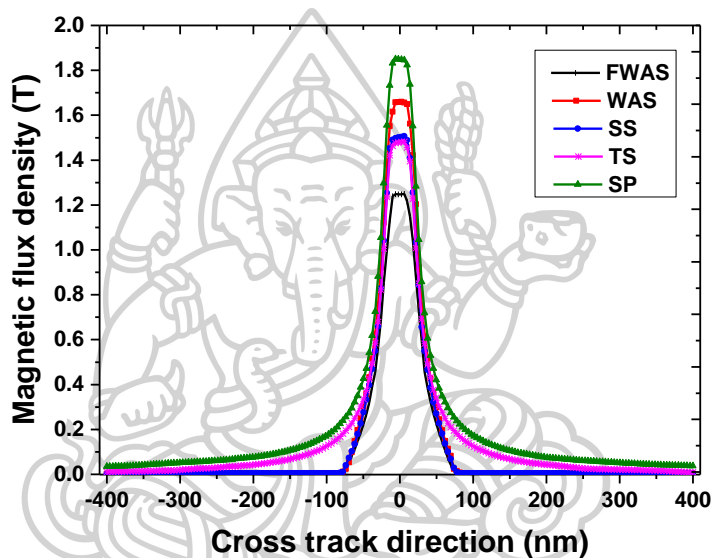


รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียน (ก) SP (ข) TS (ค) SS (ง) WAS และ (จ) FWAS

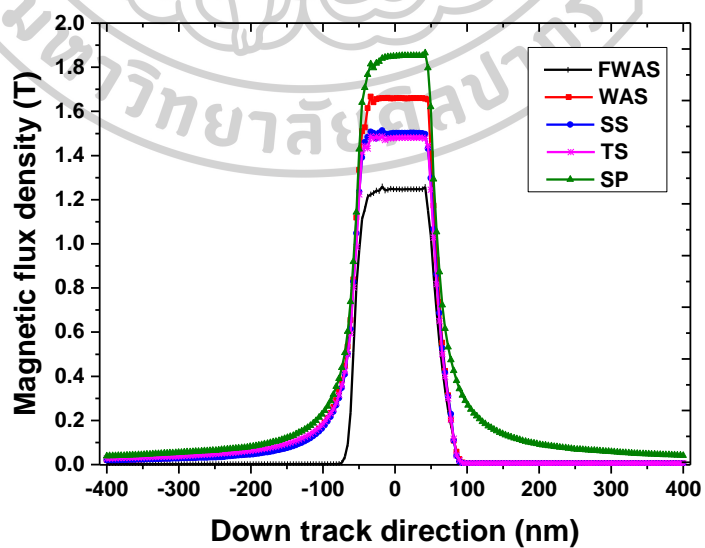
จากผลการคำนวณพบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนชนิด SP รูป 4.2 (ก) ซึ่งไม่มีชิลด์เป็นส่วนประกอบจะมีการกระจายตัวมากที่สุด เมื่อมีชิลด์ด้านหลังเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนชนิด TS รูป 4.2 (ข) มีการกระจายตัวลดลงตามแนวคาน์แทร์คทางด้านของ TS อย่างชัดเจน เนื่องจาก TS มีส่วนช่วยในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลหลักของหัวเขียน โดยสนามแม่เหล็กบางส่วน

จะพุ่งเข้าสู่ซีกด้านหลัง ส่งผลให้ซีกด้านหลังมีส่วนช่วยในการควบคุมการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กตามแนวดาวนัทรีคทางด้าน TS ได้เป็นอย่างดี

เมื่อมีการเพิ่มซีกด้านข้างขึ้นมาในหัวเขียนชนิด SS พบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณด้านข้างมีการกระจายตัวลดลงจากหัวเขียนชนิด TS และ SP ซึ่งแสดงว่าซีกด้านข้างมีส่วนช่วยควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลหลักของหัวเขียนตามแนวครอสแทรีคให้มีการกระจายตัวลดลง เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนจะพุ่งเข้าสู่ซีกด้านข้างแทนที่จะพุ่งเข้าสู่ SUL



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ตามแนวครอสแทรีค (ข) ตามแนวดาวนัทรีค

สำหรับซิลด์ด้านหน้าในหัวเขียนชนิด WAS ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความยาวที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้รูปทรงของซิลด์เปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มส่วน LS ของซิลด์ในหัวเขียนชนิด FWAS พบว่า พบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก บริเวณด้านหน้ามีการกระจายตัวน้อยที่สุดในหัวเขียนทั้ง 5 ชนิดในการจำลองนี้

เมื่อนำข้อมูลในแนวคอสเทรีคและดาวน์แทร็คออกมาวาดกราฟ ดังภาพที่ 4.3 แล้วนำไปหาค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์

ชนิดของหัวเขียน	B_{max} (T)		FWHM (nm)		$Gradient_{max}$ ($\times 10^7$ T/m)			
	CT	DT	CT	DT	CT		DT	
					L	R	TS	LS
SP	1.85	1.86	56.50	117.07	6.46	6.75	8.23	7.17
TS	1.48	1.49	56.49	118.19	5.80	5.53	5.46	6.02
SS	1.51	1.51	55.41	119.06	5.36	5.59	5.81	5.53
WAS	1.66	1.67	56.08	117.41	6.54	7.07	6.20	7.04
FWAS	1.25	1.26	56.79	115.49	4.16	4.16	4.50	7.66

พบว่า หัวเขียนชนิด SP มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงที่สุด เนื่องจากไม่มีซิลด์ส่งผลให้สนามแม่เหล็กส่วนใหญ่จึงออกจากปลายโพลหลักพุ่งลงสู่ SUL เพียงอย่างเดียว จะสังเกตเห็นว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตามแนวดาวน์แทร็คและตามแนวคอสเทรีคมีค่าไม่เท่ากัน เป็นผลมาจากการตั้งข้อมูลความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้ อ้างอิงจากตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางโพลหลัก แต่หากตั้งโดยอ้างอิงจากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จะส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตามแนวคอสเทรีคมีค่าเท่ากับ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดตามแนวดาวน์แทร็ค เมื่อเปรียบเทียบกราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวดาวน์แทร็ค รูปที่ 4.2 (ข) ของหัวเขียนชนิด SP กับหัวเขียนชนิด TS พบว่า สนามแม่เหล็กบริเวณซิลด์ด้านหลังมีค่าลดลง เนื่องจากผลของซิลด์ด้านหลังที่ทำให้เกรเดียนท์บริเวณนี้มีค่าสูงขึ้น แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กบางส่วนพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหลัง เมื่อพิจารณาหัวเขียนชนิด TS กับหัวเขียนชนิด SS พบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณซิลด์ด้านข้างมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.2 (ก) เนื่องจากสนามแม่เหล็กบางส่วนพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านข้างมากขึ้น ส่งผลให้พุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหลังลดลง

แต่เนื่องจาก SUL มีค่าความต้านทานแม่เหล็กที่ต่ำกว่า ส่งผลให้สนามแม่เหล็กส่วนใหญ่พุ่งสู่ SUL ทำให้ความหนาแน่น-ฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนชนิด SS มีค่าสูงกว่า LS เล็กน้อย เช่นเดียวกับในกรณีของ WAS ที่ส่วนของซิลด์ด้านข้างมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่พุ่งเข้าสู่ SUL มากกว่าที่จะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหลัง

สำหรับในกรณีของหัวเขียนชนิด WAS เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเขียนชนิดอื่น ๆ จะพบว่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กแม่เหล็กสูงสุดมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากหัวเขียนชนิดนี้ประกอบไปด้วยซิลด์ล้อมรอบปลายโพลทั้งหมด ส่งผลให้สนามส่วนใหญ่พุ่งเข้าสู่ซิลด์ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวคาน์เทร็ครูปที่ 4.2 (ข) บริเวณด้านหน้ากับหัวเขียนชนิดอื่นพบว่า สนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากซิลด์ด้านหน้า ซึ่งมีระยะห่างระหว่างซิลด์กับปลายโพลเท่ากับระยะห่างระหว่าง SUL กับ ปลายโพล ส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหน้ามากกว่าซิลด์ด้านอื่น ๆ ส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของหัวเขียนชนิดนี้ต่ำกว่าชนิดอื่น ๆ

หัวเขียนชนิด SS จะมีค่า FWHM ตามแนวคาน์เทร็คน้อยกว่าหัวเขียนชนิดอื่น ๆ และหัวเขียนชนิด FWAS จะมีค่า FWHM ตามแนวคาน์เทร็คน้อยกว่าหัวเขียนชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากซิลด์ วัสดุและระยะห่างระหว่างซิลด์

4.2 ศึกษาผลของขนาดช่องว่างต่อหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม

หัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม จะถูกนำมาศึกษาในหัวข้อนี้ เนื่องจากหัวเขียนชนิดนี้ประกอบไปด้วยช่องว่าง 3 ช่อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาผลของระยะห่างระหว่างซิลด์กับปลายโพล หรือขนาดของช่องว่างนั้น จะส่งผลต่อสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนอย่างไร ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาผลของขนาดช่องว่างแต่ละชนิดที่มีต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม โดยจะกำหนดให้ขนาดช่องว่างด้านหน้ามี 10 นาโนเมตร ขนาดของช่องว่างด้านข้าง 50 นาโนเมตร และขนาดของช่องว่างด้านหลัง 30 นาโนเมตร แล้วทำการเปลี่ยนขนาดของช่องว่าง ทีละช่องว่าง โดยขนาดของช่องว่างอื่น ๆ จะมีค่าคงที่

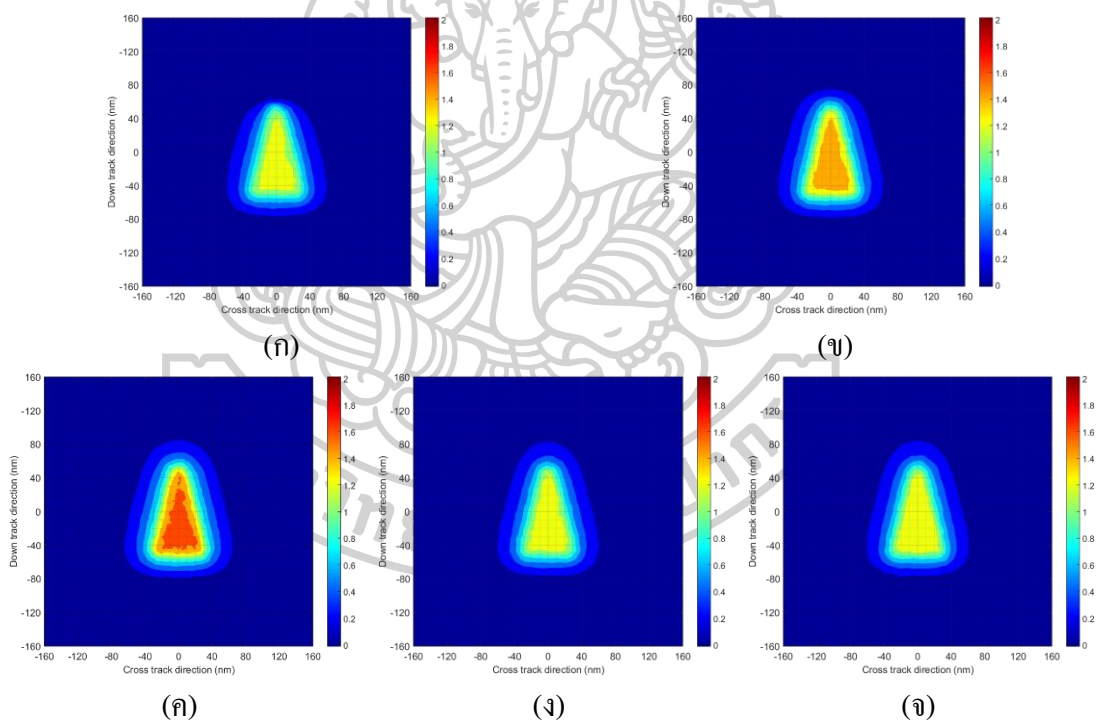
4.2.1 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านหน้า

ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านหน้า ขนาด 10 30 50 70 และ 90 นาโนเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 พบว่ามีการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านหน้ามากขึ้น เมื่อช่องว่าง

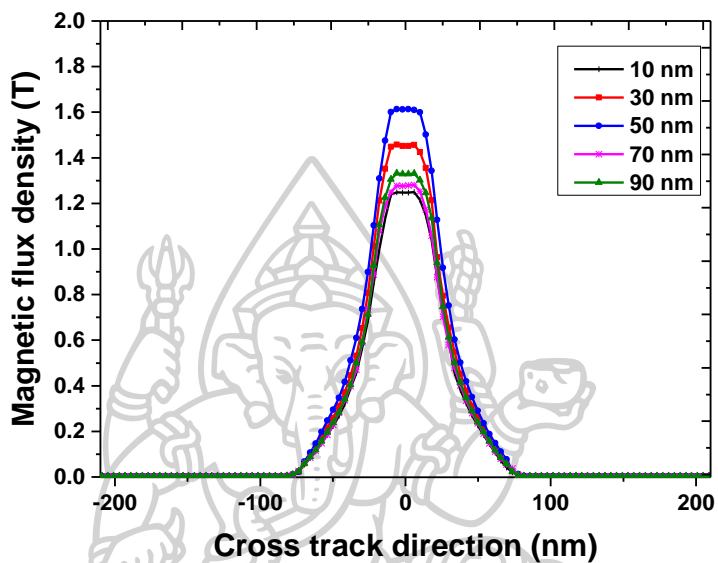
ด้านหน้ามีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากซิลด์ด้านหน้ามีส่วนช่วยในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กบางส่วนจะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหน้า ส่งผลให้ซิลด์ด้านหน้ามีผลในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ ช่องว่างด้านหน้า

เมื่อนำข้อมูลตามแนวคอรอสแทร็คและตามแนวคาวน์แทร็ค ดังรูปที่ 4.5 มาวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลตามแนวคาวน์แทร็ค ดังรูปที่ 4.5 (ข) บริเวณซิลด์ด้านหน้า มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อช่องว่างด้านหน้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีเกรเดียนต์ที่ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของช่องว่างด้านหน้าที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านหลัง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับเกรเดียนต์ที่ทั้งทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของสนามแม่เหล็กตามแนวคอรอสแทร็ค ดังรูปที่ 4.5 (ก)

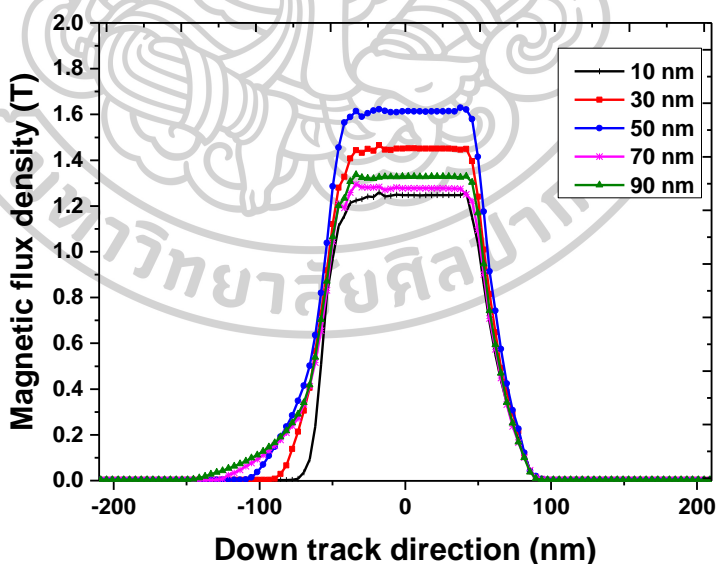


รูปที่ 4.4 คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านหน้า (ก) 10 นาโนเมตร (ข) 30 นาโนเมตร (ค) 50 นาโนเมตร (ง) 70 นาโนเมตร และ (จ) 90 นาโนเมตร

FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.6 พบว่า FWHM ด้านคาน์แทร็ค มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างด้านหน้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนด้านครอสแทร็คไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงช่องว่างด้านหน้า ส่งผลต่อ FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวคาน์แทร็ค ซึ่งเป็นแนวเดียวกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่างด้านหน้า

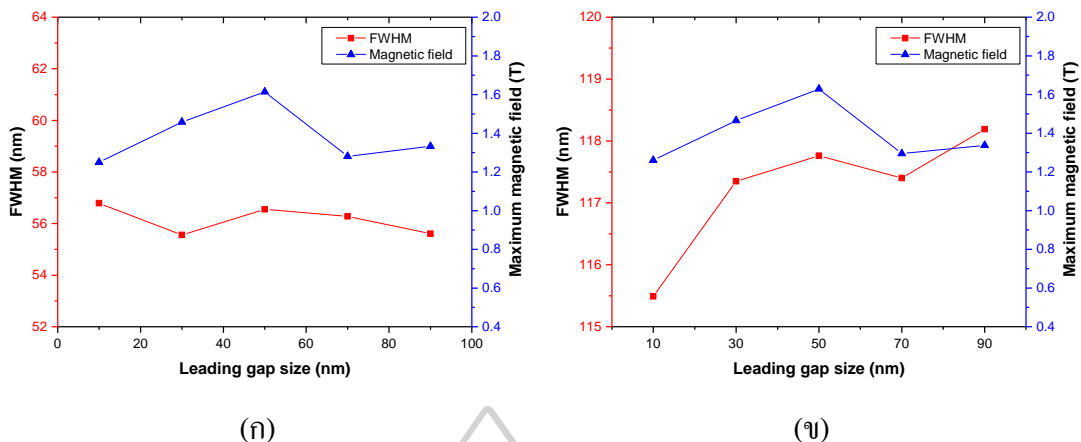


(ก)

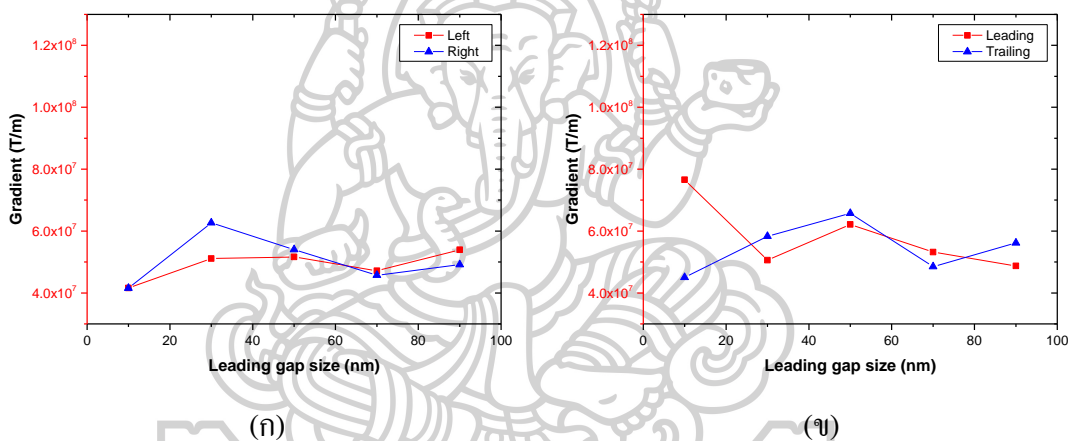


(ข)

รูปที่ 4.5 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ตามแนวครอสแทร็ค (ข) ตามแนวคาน์แทร็ค



รูปที่ 4.6 กราฟ FWHM กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครอสแทร็ค (ข) ดาวน์แทร็ค



รูปที่ 4.7 กราฟเกรเดียนต์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครอสแทร็ค (ข) ดาวน์แทร็ค

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และมีค่าลดลงเมื่อขนาดของช่องว่างด้านหน้ามีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างด้านข้าง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อขนาดของช่องว่างด้านหน้ามีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างด้านข้าง เป็นผลมาจากเมื่อช่องว่างด้านหน้ามีขนาดเท่ากับช่องว่างด้านข้างทำให้สนามแม่เหล็กส่วนใหญ่พุ่งเข้าสู่ช่องว่างด้านหลังซึ่งมีขนาด 30 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่องว่างด้านหน้ามีบทบาทต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยลง เมื่อมีขนาดของช่องว่างที่ใหญ่เกินไป

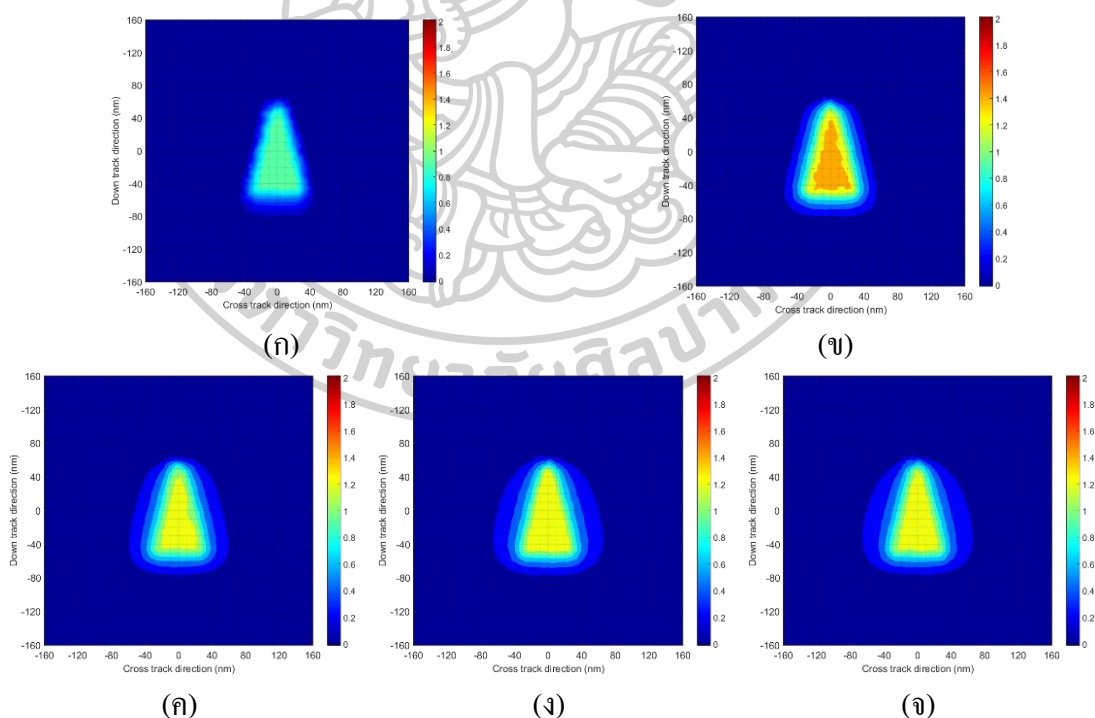
สำหรับค่าเกรเดียนต์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.7 พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องเกรเดียนต์ที่นำมาแสดงเป็นเกรเดียนต์สูงสุด ซึ่งไม่ใช่บริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่เห็นถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างด้านหน้าที่มีผลต่อเกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านข้าง

ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านข้าง ขนาด 10 30 50 70 และ 90 นาโนเมตร ตามลำดับ

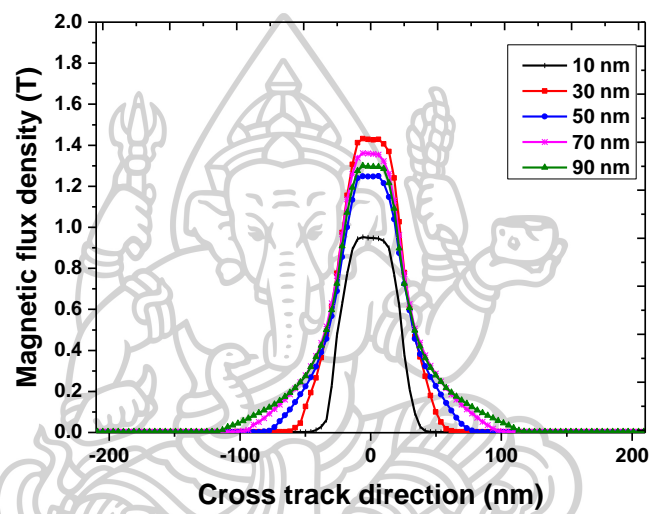
ผลการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้ ดังรูปที่ 4.8 พบว่า การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านข้างมากขึ้น เมื่อช่องว่างด้านหน้ามีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากซิลด์ด้านข้างมีส่วนช่วยในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กบางส่วนจะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านข้าง ส่งผลให้ซิลด์ด้านข้างมีผลในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านข้าง

เมื่อนำข้อมูลตามแนวครอสแทร็คและตามแนวดาวน์แทร็ค ดังรูปที่ 4.9 มาวิเคราะห์ พบว่า ข้อมูลตามแนวดาวน์ครอสแทร็ค ดังรูปที่ 4.9 (ก) มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านข้าง คือ เมื่อช่องว่างด้านข้างมีขนาดใหญ่ขึ้น พบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีเกรเดียนต์ที่ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของช่องว่างด้านข้างที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านหน้าและช่องว่างด้านหลัง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.9 (ข)

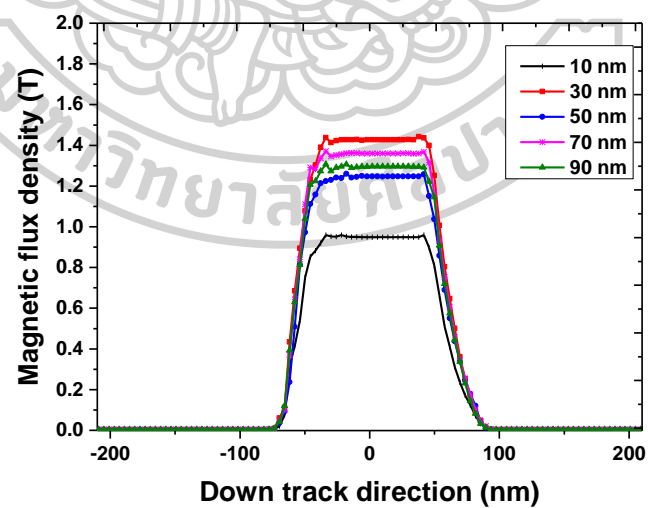


รูปที่ 4.8 คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านข้าง (ก) 10 นาโนเมตร (ข) 30 นาโนเมตร (ค) 50 นาโนเมตร (ง) 70 นาโนเมตร และ (จ) 90 นาโนเมตร

FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ในช่วงแรก FWHM ด้านครอสแทร็ค มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างด้านข้างมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะมีลักษณะเริ่มคงที่เมื่อช่องว่างด้านข้างมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดของช่องว่างด้านข้างที่ใหญ่เกินไป ทำให้ผลของการเพิ่มขนาดของช่องว่างด้านข้างไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ส่วนด้านดาวน์แทร็คไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงช่องว่างด้านข้าง ส่งผลต่อ FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวครอสแทร็ค ซึ่งเป็นแนวเดียวกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่างด้านข้าง

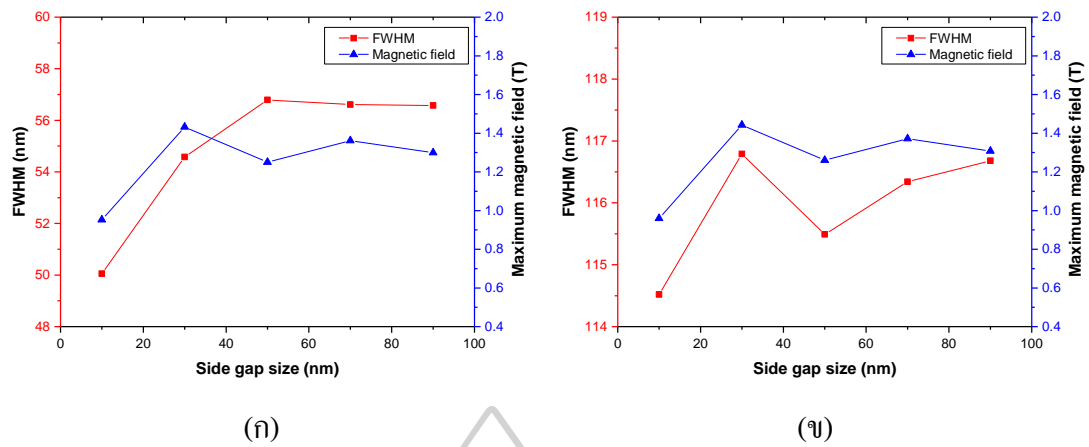


(ก)

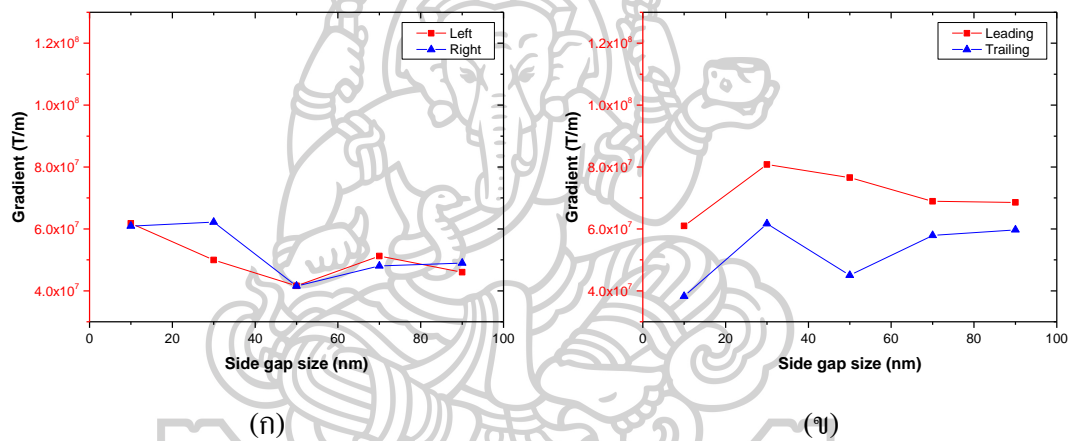


(ข)

รูปที่ 4.9 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ตามแนวครอสแทร็ค (ข) ตามแนวดาวน์แทร็ค



รูปที่ 4.10 กราฟ FWHM กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครอสเทรีค (ข) คาวน์เทรีค



รูปที่ 4.11 กราฟเกรเดียนต์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครอสเทรีค (ข) คาวน์เทรีค

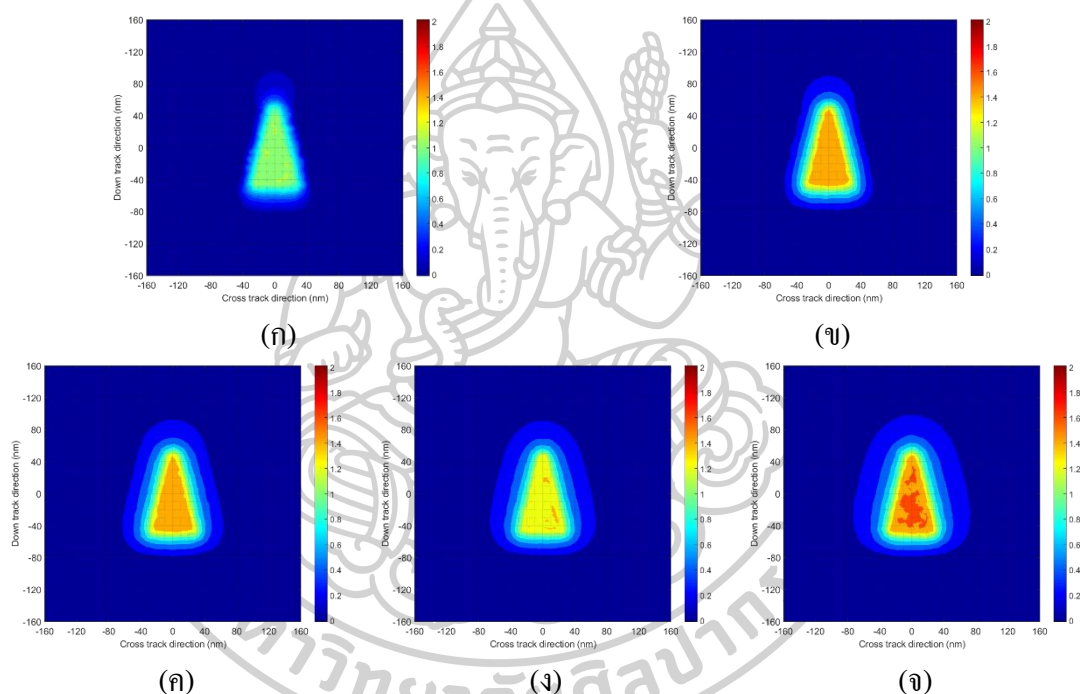
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ดังรูปที่ 4.10 พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และมีลักษณะเริ่มคงที่ เมื่อขนาดของช่องว่างด้านข้างมีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างด้านหลัง เป็นผลมาจากเมื่อช่องว่างด้านข้างมีขนาดเท่ากับช่องว่างด้านข้างทำให้สนามแม่เหล็กส่วนใหญ่พุ่งเข้าสู่ช่องว่างด้านหน้าซึ่งมีขนาด 10 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ช่องว่างด้านข้างมีบทบาทต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยลง เมื่อมีขนาดของช่องว่างใหญ่เกินไป

สำหรับค่าเกรเดียนต์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.11 พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องเกรเดียนต์ที่นำมาแสดงเป็นเกรเดียนต์สูงสุด ซึ่งไม่ใช่บริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่เห็นถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างด้านหน้าที่มีผลต่อเกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ

4.2.3 ผลจากการเปลี่ยนขนาดของช่องว่างด้านหลัง

ในหัวข้อนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนชนิดซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านหลัง ขนาด 10 30 50 70 และ 90 นาโนเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้ ดังรูปที่ 4.12 พบว่า มีการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างหลังมากขึ้น เมื่อช่องว่างด้านหลังมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากซิลด์ด้านหลังมีส่วนช่วยในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กบางส่วนจะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ด้านหลัง ส่งผลให้ซิลด์ด้านหลังมีผลในการควบคุมการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านหลัง

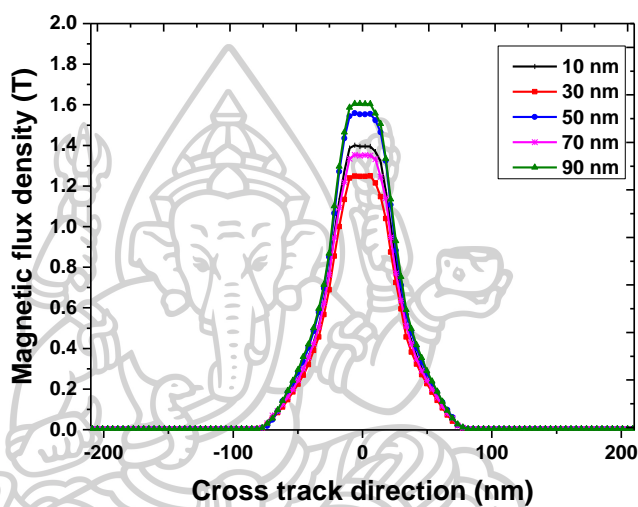


รูปที่ 4.12 คอนทัวร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณของหัวเขียนที่มีซิลด์ล้อมรอบแบบเต็ม ที่มีขนาดของช่องว่างด้านหลัง (ก) 10 นาโนเมตร (ข) 30 นาโนเมตร (ค) 50 นาโนเมตร (ง) 70 นาโนเมตร และ (จ) 90 นาโนเมตร

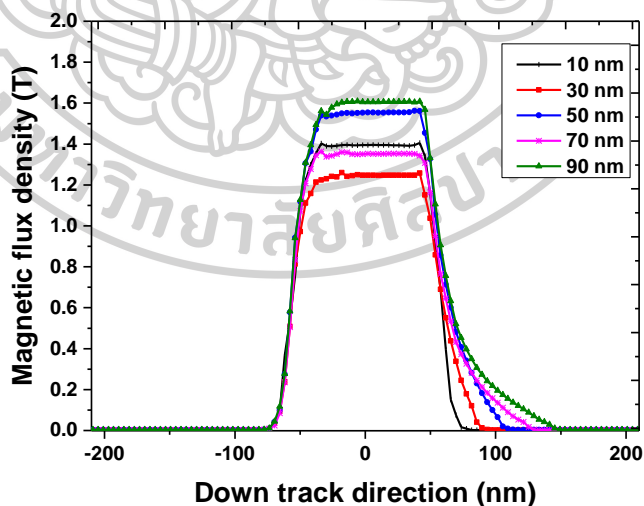
เมื่อนำข้อมูลตามแนวครอสแทร็คและตามแนวดาวน์แทร็ค ดังรูปที่ 4.13 มาวิเคราะห์ พบว่า ข้อมูลตามแนวดาวน์แทร็ค ดังรูปที่ 4.13 (ข) บริเวณซิลด์ด้านหลัง มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ เมื่อช่องว่างด้านหลังมีขนาดใหญ่ขึ้น พบว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีเกรเดียนต์ที่ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของช่องว่างด้านหลังที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องว่างด้านหน้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ

เกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับเกรเดียนต์ทั้งทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของสนามแม่เหล็กตามแนวครอสแทร็ค ดังรูปที่ 4.13 (ก)

FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.14 พบว่า FWHM ด้านดาวน์แทร็คมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อช่องว่างด้านหลังมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนด้านครอสแทร็คไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงช่องว่างด้านหลัง ส่งผลต่อ FWHM ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวดาวน์แทร็ค ซึ่งเป็นแนวเดียวกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่างด้านหลัง

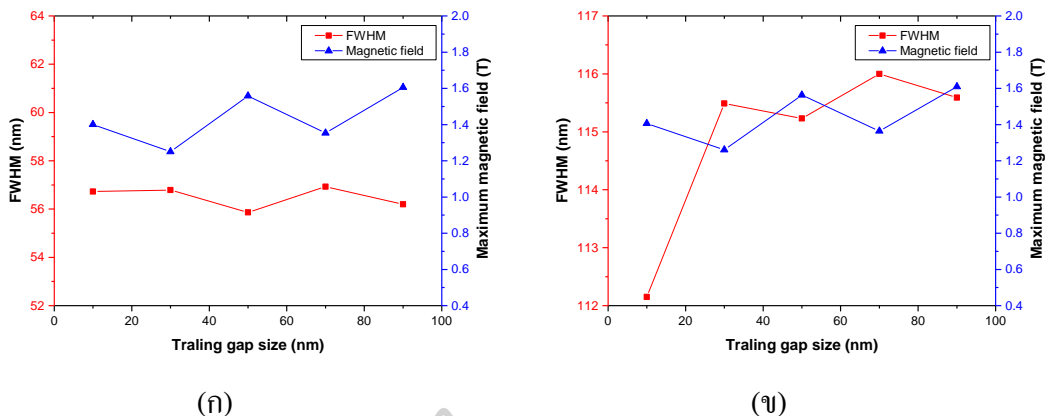


(ก)

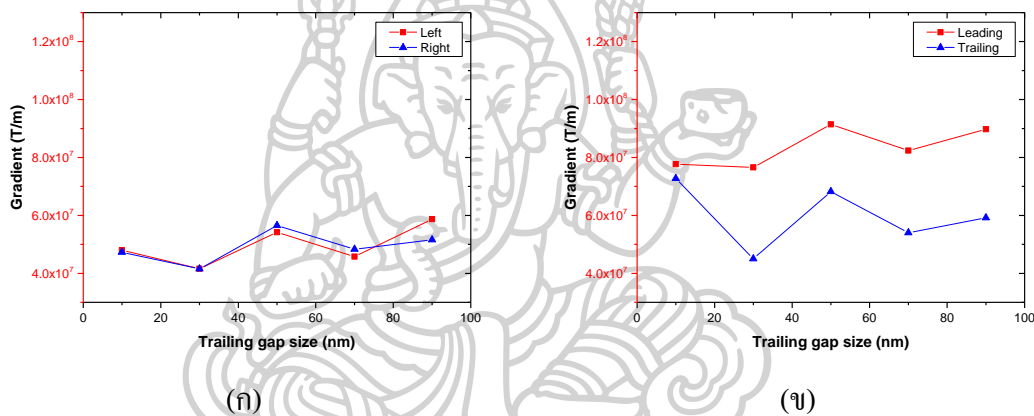


(ข)

รูปที่ 4.13 กราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (ก) ตามแนวครอสแทร็ค (ข) ตามแนวดาวน์แทร็ค



รูปที่ 4.14 กราฟ FWHM กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครออสแตร็ค (ข) ควอเตอร์แตร็ค



รูปที่ 4.15 กราฟเกรเดียนต์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (ก) ครออสแตร็ค (ข) ควอเตอร์แตร็ค

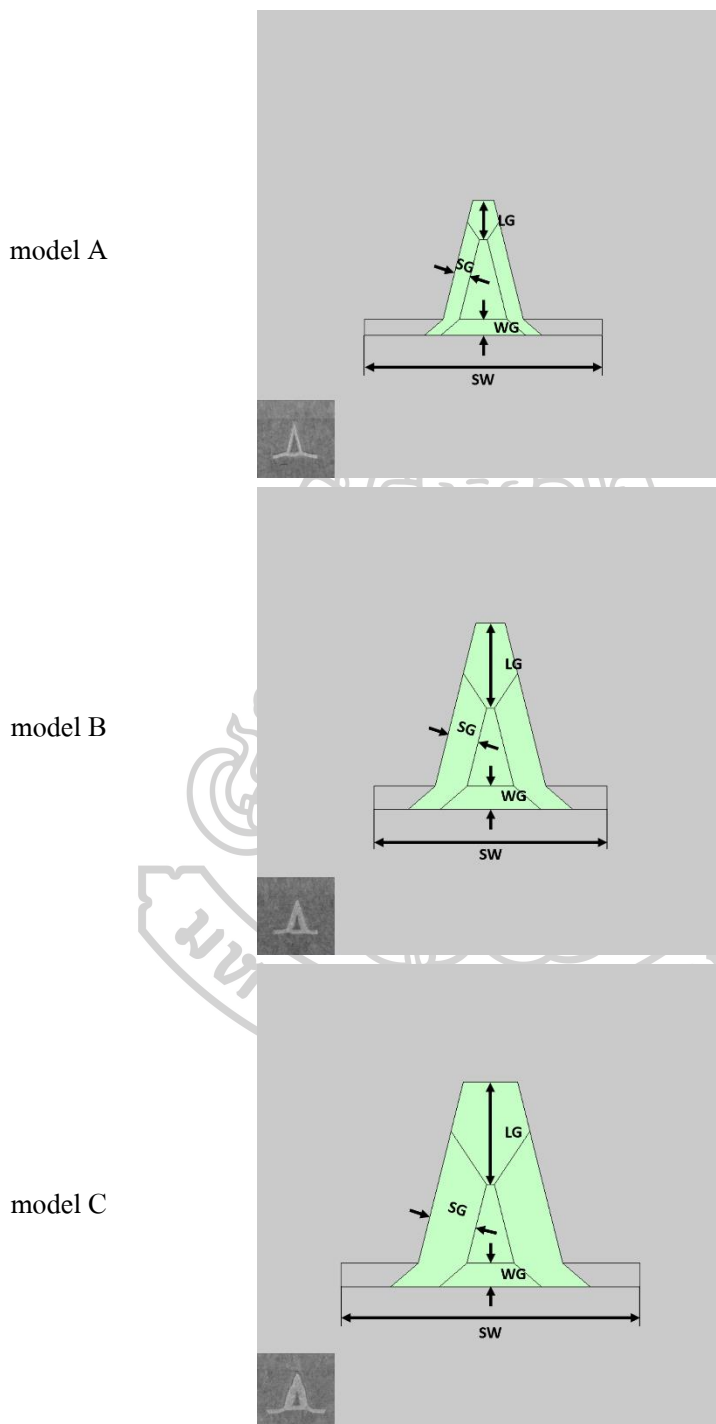
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ดังรูปที่ 4.14 พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของช่องว่างด้านหลังมีขนาดใหญ่ขึ้น

สำหรับค่าเกรเดียนต์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.15 พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องเกรเดียนต์ที่นำมาแสดงเป็นเกรเดียนต์สูงสุด ซึ่งไม่ใช่บริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่เห็นถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างด้านหน้าที่มีผลต่อเกรเดียนต์อย่างมีนัยสำคัญ

4.3 การเปรียบเทียบผลระหว่างไฟไนต์เอลิเมนต์กับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้วัดสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน เนื่องจากสามารถวัดสนามแม่เหล็กที่ออกจากหัวเขียนได้โดยตรงและมีความคมชัดสูง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการวัดจาก

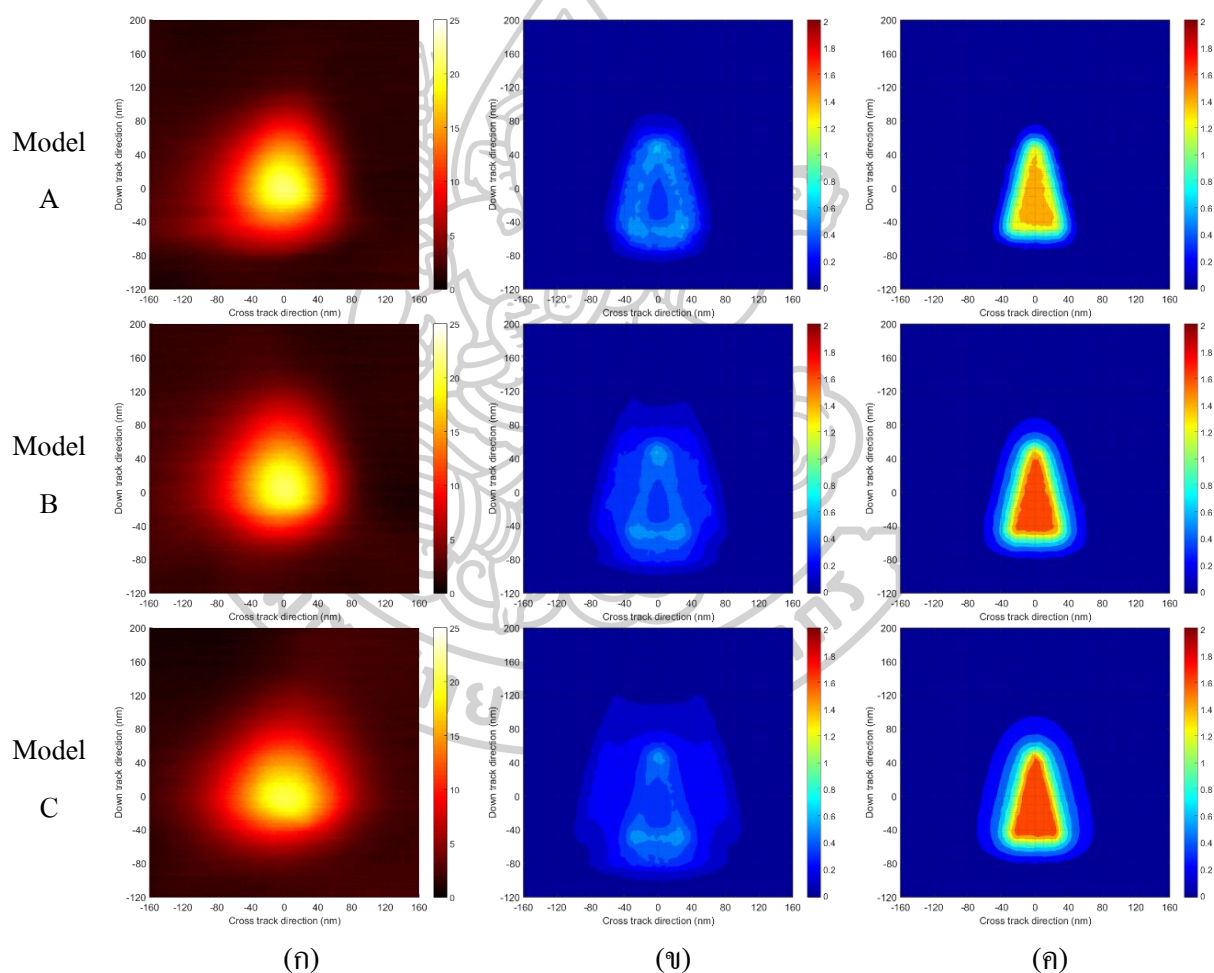
กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เพื่อศึกษาถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลการจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์กับผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



รูปที่ 4.16 ด้าน ABS ของหัวเจียนที่ใช้ในการจำลองและ SEM ของหัวเจียน

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

parameter model	LG (nm)	SG (nm)	WG (nm)	SW (nm)
A	50	20	20	300
B	110	40	30	300
C	130	60	30	380



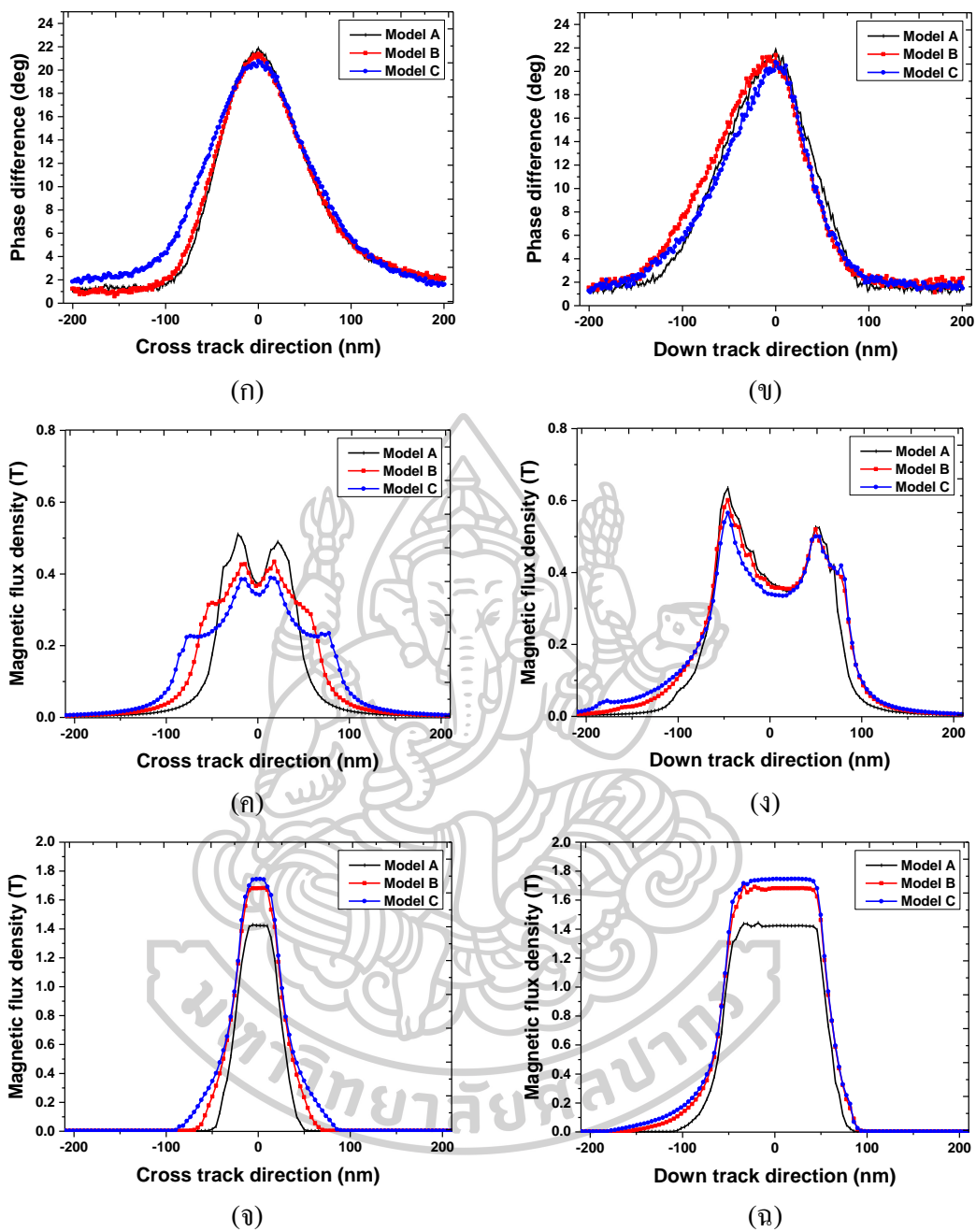
รูปที่ 4.17 คอนทัวร์ที่ได้จาก (ก) MFM (ข) FEM แบบไม่มี SUL และ (ค) มี SUL

ในหัวข้อนี้จะศึกษาหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กแนวตั้งแบบ FWAS ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตโดยหัวเขียนที่นำมาทดลองมีขนาดของช่องว่างระหว่างโพลกับซิลด์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และมีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.3

ในการทดลอง เราจะทำการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากหัวเขียนทั้ง 3 โมเดล โดยทำการป้อนกระแสตรง 30 มิลลิแอมป์ให้กับหัวเขียน แล้วทำการสแกนด้วย MFM ได้ผลดังรูปที่ 4.17 (ก) เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น โดยใช้พารามิเตอร์เช่นเดียวกับตารางที่ 4.3 โดยจะสร้างแบบจำลองทั้งที่ไม่มี SUL และมี SUL ได้ผลดังรูปที่ 4.17 (ข) และ (ค) ตามลำดับ

ผลการวัดจาก MFM ดังรูปที่ 4.17 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองดังรูปที่ 4.17 (ข) และ (ค) พบว่าการกระจายตัวของผลการวัดและการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีลักษณะที่สอดคล้องกัน คือ เมื่อขนาดของช่องว่างมากขึ้น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีการกระจายตัวมากขึ้นตามไปด้วย และการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กระหว่างไม่มี SUL และมี SUL จะมีการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ต่างกัน โดยหัวเขียนที่ไม่มีชั้นของ SUL จะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก บริเวณขอบของโพลหลักที่สูง แต่ในส่วนของหัวเขียนที่มี SUL ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณกึ่งกลางโพลจะมีค่าสูง เนื่องจาก SUL มีคุณสมบัติคล้ายกับส่วนของโพลหลัก คือ มีค่า B_s ที่สูงกว่าในส่วนของซิลด์ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กส่วนใหญ่จึงวิ่งเข้าสู่ชั้นของ SUL มากกว่าซิลด์และอีกปัจจัยคือ ระยะห่างระหว่าง SUL กับโพลหลัก ที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างซิลด์กับโพลหลักอีกด้วย

เมื่อนำข้อมูลตามแนวคอรอสแตรีกและตามแนวคาวน์แตรีกที่ผ่านจุดที่มีความต่างเฟสสูงสุดจากการวัดด้วย MFM ดังรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลตามแนวคอรอสแตรีกและตามแนวคาวน์แตรีกที่ผ่านจุดกึ่งกลางโพลหลัก ทั้งแบบที่ไม่มี SUL และมี SUL ดังรูปที่ 4.18 (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ โดยในส่วนของผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง จะพบว่าในกราฟทั้งในแนวคอรอสแตรีกและในแนวคาวน์แตรีกระหว่างที่ไม่มี SUL และมี SUL มีลักษณะต่างกัน โดยในส่วนที่ไม่มี SUL ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีความเข้มสูงที่บริเวณขอบของโพล เนื่องจากสนามส่วนใหญ่จะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ได้ดีกว่าพุ่งออกสู่อากาศ สำหรับหัวเขียนที่มี SUL เนื่องจาก SUL เป็นสารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติที่คล้ายกับโพล ซึ่งมีความต้านทานแม่เหล็กต่ำ ดังนั้นสนามแม่เหล็กจึงพุ่งเข้าสู่ SUL ได้ดีกว่าที่จะพุ่งเข้าสู่ซิลด์ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กบริเวณกึ่งกลางโพลมีความเข้มมากกว่าบริเวณขอบของโพล



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ที่ได้จากการวัดด้วย MFM (ก) และ (ข) การจำลองด้วย FEM แบบไม่มี SUL (ค) และ (ง) การจำลองด้วย FEM แบบมี SUL (ฉ) และ (ฉ) ตามแนวคาน์แทร์คและครอสแทร์คตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ชนิดของหัวเขียน	Phase difference _{max} (deg)		FWHM (nm)		Gradient _{max} (deg/m)			
	CT	DT	CT	DT	CT		DT	
					L	R	TS	LS
Model A	21.88	21.88	103.60	110.40	0.52	0.41	0.64	0.79
Model B	21.38	21.38	110.13	113.56	0.53	0.51	0.77	0.61
Model C	20.78	20.78	126.68	102.51	0.47	0.47	0.77	0.96

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบไม่มีชั้นของ SUL

ชนิดของหัวเขียน	B _{max} (T)		FWHM (nm)		Gradient _{max} (x10 ⁷ T/m)			
	CT	DT	CT	DT	CT		DT	
					L	R	TS	LS
Model A	0.51	0.64	89.96	136.06	2.45	1.99	3.55	3.17
Model B	0.43	0.60	129.50	149.44	1.49	1.36	2.58	2.18
Model C	0.39	0.57	162.62	149.87	1.04	9.49	2.11	2.78

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบมีชั้นของ SUL

ชนิดของหัวเขียน	B _{max} (T)		FWHM (nm)		Gradient _{max} (x10 ⁷ T/m)			
	CT	DT	CT	DT	CT		DT	
					L	R	TS	LS
Model A	1.43	1.44	52.18	115.09	6.07	6.06	5.78	6.56
Model B	1.68	1.70	56.14	117.95	5.63	6.20	6.93	5.70
Model C	1.75	1.75	56.15	117.14	7.07	6.16	7.18	7.12

นอกจากนี้ พบว่า กราฟของความต่างเฟสที่ได้จาก MFM มีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟที่ได้จากการสร้างแบบจำลองชนิดที่มี SUL มากกว่า เนื่องจากการวัดหัววัด MFM มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ดังนั้นจึงส่งผลให้ขณะทำการวัดมีลักษณะเหมือนมี SUL อยู่ด้วย และพบข้อแตกต่างระหว่างผลการวัดด้วย MFM และผลจากการจำลอง โดยกราฟที่ได้จากการจำลองมีลักษณะสมมาตรต่างจากการวัดด้วย MFM ที่จะมีลักษณะไม่สมมาตร ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน โดยในการจำลองจะไม่คำนึงถึงผลจากการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน และยังพบว่า ผลที่ได้จากการวัดด้วย MFM จะมีขนาดใหญ่กว่าผลที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากการจำลอง ข้อมูลที่ถูกนำออกมาวิเคราะห์ จะมีลักษณะเป็นจุด ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้เป็นความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดนั้น ต่างจากผลการวัดของ MFM ซึ่งเป็นการวัดสนามแม่เหล็กโดยรวมที่จุดนั้น ค่าที่ได้จากการวัดจึงเป็นผลรวมของสนามแม่เหล็ก โดยรอบจุดที่กำลังทำการวัดข้อมูลอยู่

FWHM ตามแนวครอสแตร็ค ดังตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5 พบว่า ความกว้างของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งผลที่ได้จาก MFM และผลจากการสร้างแบบจำลองทั้งที่ไม่มี SUL และมี SUL ส่วนค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในส่วนของแบบจำลองทั้งที่ไม่มี SUL จะมีค่าน้อยกว่าในส่วนของแบบจำลองที่มี SUL เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะพุ่งเข้าสู่ SUL มากกว่าชนิดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการศึกษาแบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีรูปแบบขั้วแม่เหล็กต่างกัน โดยอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน แล้วนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของขั้วแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน โดยวิเคราะห์จากคอนทัวร์ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด เกรเดียนท์ และ FWHM

แบบจำลองหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ขนาดโพลหลัก 60 นาโนเมตร มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัวสูงสุด 2.4 เทสลา และมีชั้น SUL หนา 200 นาโนเมตร อยู่ห่างจากด้าน ABS 10 นาโนเมตร ในการจำลอง จะทำการจ่ายกระแส 30 มิลลิแอมป์ ให้กับขดลวดชนิดแพนเค้ก เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในหัวเขียน

แบบจำลองของหัวเขียนที่มีชนิดของขั้วแม่เหล็กต่างกัน 5 แบบ ได้แก่ หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่ไม่มีขั้ว หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่มีเฉพาะขั้วด้านหลัง หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีเฉพาะขั้วด้านข้างและขั้วด้านหลัง หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีขั้วล้อมรอบ และหัวเขียนแบบมีขั้วล้อมรอบแบบเต็ม หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่ไม่มีขั้ว จะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลสูงที่สุด แต่มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กสูงที่สุดเช่นกัน เมื่อมีการเพิ่มในส่วนของขั้วด้านหลังขึ้นมาในหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่มีเฉพาะขั้วด้านหลัง จะส่งผลให้การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณขั้วด้านหลังมีค่าลดลง หัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีเฉพาะขั้วด้านข้างและขั้วด้านหลัง จะมีการกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กทางด้านข้างน้อยกว่าหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กชนิดที่มีเฉพาะขั้วด้านหลัง และหัวเขียนชนิดมีขั้วล้อมรอบแบบเต็ม จะมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในน้อยที่สุด ดังนั้นขั้วจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก

แบบจำลองของหัวเขียนชนิดมีขั้วล้อมรอบแบบเต็ม ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของช่องว่างทั้ง 3 ช่อง ได้แก่ ช่องว่างด้านหน้า ช่องว่างด้านข้าง และช่องว่างด้านหลัง โดยทำการเปลี่ยนค่าความกว้างของช่องว่างที่ละช่องว่าง ตั้งแต่ 10 จนถึง 90 นาโนเมตร ผลจากการเปลี่ยนแปลงช่องว่างด้านหน้า พบว่า ช่องว่างด้านหน้ามีผลในการควบคุมเกรเดียนท์ของความหนาแน่นฟลักซ์

แม่เหล็กตามแนวคาน์แทร์คบริเวณช่องว่างด้านหน้า เมื่อช่องว่างด้านหน้ามีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้เกรเดียนต์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นช่องว่างด้านหน้าจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ตดิสก์โครพี สำหรับช่องว่างด้านข้าง เมื่อช่องว่างด้านข้างมีขนาดเล็กลงก็ส่งผลให้เกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กในแนวคอสแทร์คมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ช่องว่างด้านข้างมีส่วนช่วยในการเพิ่มความจุของฮาร์ตดิสก์โครพี และเมื่อช่องว่างด้านหลังมีขนาดเล็กลงก็ส่งผลให้เกรเดียนต์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจะเพิ่มตามของแนวคาน์แทร์ค บริเวณช่องว่างด้านหลัง ดังนั้นช่องว่างด้านหลังจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มความจุของฮาร์ตดิสก์โครพีเช่นกัน แต่การลดขนาดของช่องว่าง จะส่งผลให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลดลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถเขียนข้อมูลแม่เหล็กได้

การวัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียน สามารถวัดได้โดยอาศัยเครื่อง MFM ซึ่งจะวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กออกมาในรูปของความต่างเฟส ซึ่งจากผลการวัดเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า การกระจายตัวของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีการกระจายตัวสอดคล้องกับค่าความต่างเฟสที่วัดได้จากเครื่อง MFM ดังนั้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสามารถใช้ทำนายผลของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ออกมาจากหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ หรือวิศวกรรม ก่อนที่จะทำการทดลองจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในพฤติกรรมของสิ่งที่สนใจ ทั้งยังช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นอีกด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] Y. Wang, "Physics and Micromagnetic Analysis of Advanced Recording Technologies," no. May, 2011.
- [2] A. Dissertation, "Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads," no. September, 2010.
- [3] A. Morinaga *et al.*, "Adjacent track interference analysis of shielded perpendicular writers," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 22, pp. 2955-2958, 2008/11/01/ 2008.
- [4] Y. Tang, S. Song, and L. Guan, "Characterization of Adjacent Track Erasure in Perpendicular Recording by a Stationary Footprint Technique," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 2, pp. 744-750, 2013.
- [5] S. Song, L. Guan, S. Li, and S. Mao, "Micromagnetic Analysis of Adjacent Track Erasure of Wrapped-Around Shielded PMR Writers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, pp. 3730-3732, 2009.
- [6] S. Khizroev and D. Litvinov, *Perpendicular Magnetic Recording*. Springer Netherlands, 2006.
- [7] L. Wang, D. Z. Bai, and J. Wang, "Finite Element Modeling of Writer Head Design for Shingled Recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3551-3554, 2012.
- [8] Y. Hsu *et al.*, "Challenges for Perpendicular Write Heads at High Recording Density," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 2, pp. 605-608, 2007.
- [9] โป. ปิยะ, การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล. 2550, pp. 6-6.
- [10] ท. พรชัย, "เทคโนโลยีรีดแซมแนลเบื้องต้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์," ed.
- [11] G. Dalakov, "The Magnetic Tape of Valdemar Poulsen and Fritz Pfleumer," ed.
- [12] H. Zheng, "Investigation of bit patterned media, thermal flying height control sliders and heat assisted magnetic recording in hard disk drives," ed, 2011.
- [13] Y. Zou, "Micromagnetic simulation on advanced recording media," 2003.
- [14] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2010.

- [15] P. Marcon, "Overview of Methods for Magnetic Susceptibility Measurement," no. January 2012, 2016.
- [16] M. Malathi, "Compact model for a magnetic tunnel junction," 2009.
- [17] Z. Wu, "Channel modeling, signal processing and coding for perpendicular magnetic recording," ed, 2009.
- [18] K. Takano, L. Guan, Y. Zhou, Y. Liu, J. Smyth, and M. Dovek, "Micromagnetic simulation of various pole-tip design perpendicular magnetic recording heads," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 7, p. 07B711, 2009.
- [19] R. Otín, "Regularized Maxwell equations and nodal finite elements for electromagnetic field computations in frequency domain," 2011.
- [20] K. S. Song, "Resolution of patterned magnetic media," Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [21] S. Xiong, "Head-disk Interface Study for Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR) and Plasmonic Nanolithography for Patterned Media," ed, 2014.
- [22] D. Z. Bai *et al.*, "High Density Perpendicular Recording With Wrap-Around Shielded Writer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 3, pp. 722-729, 2010.





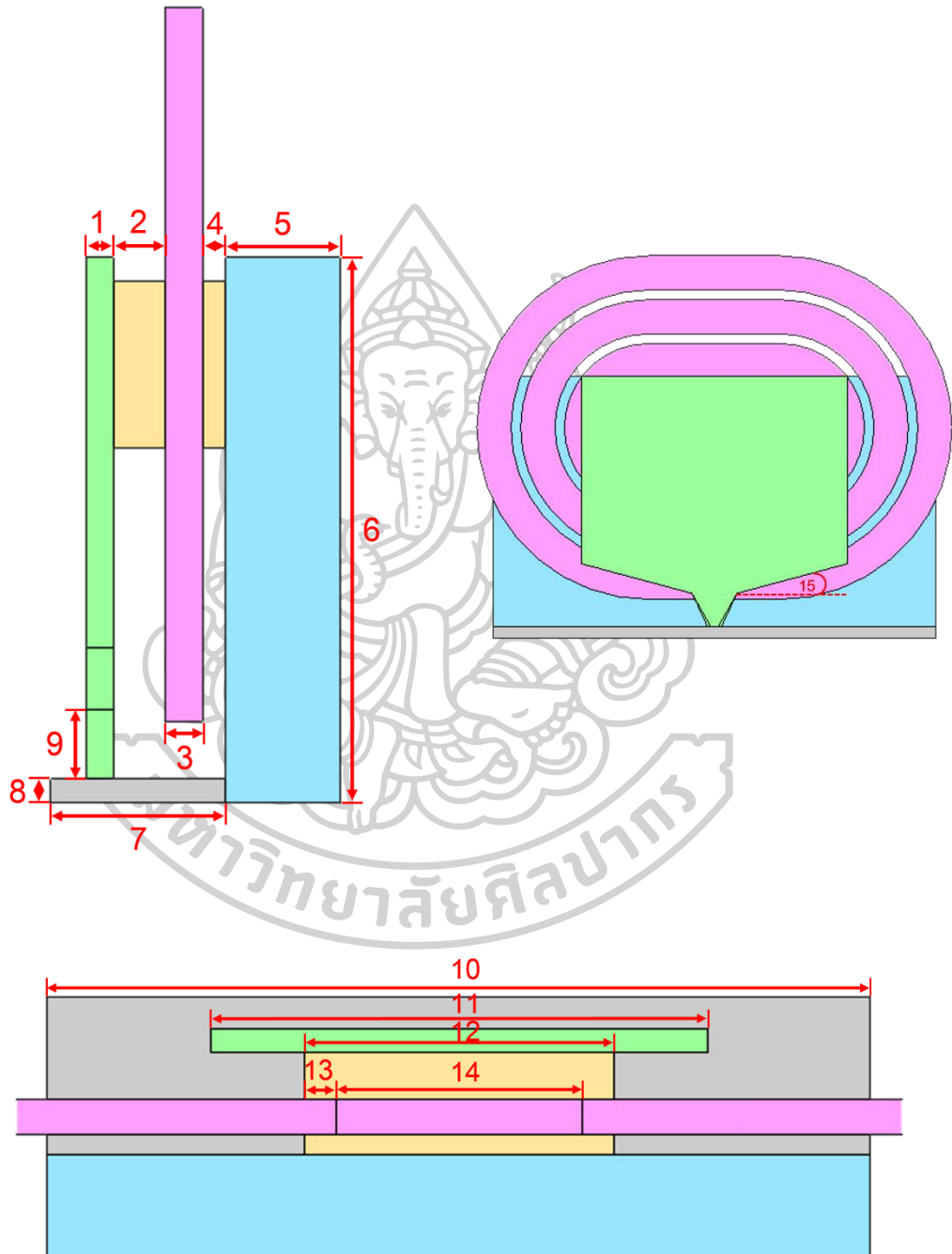
ภาคผนวก

โครงสร้างของหัวเขียนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

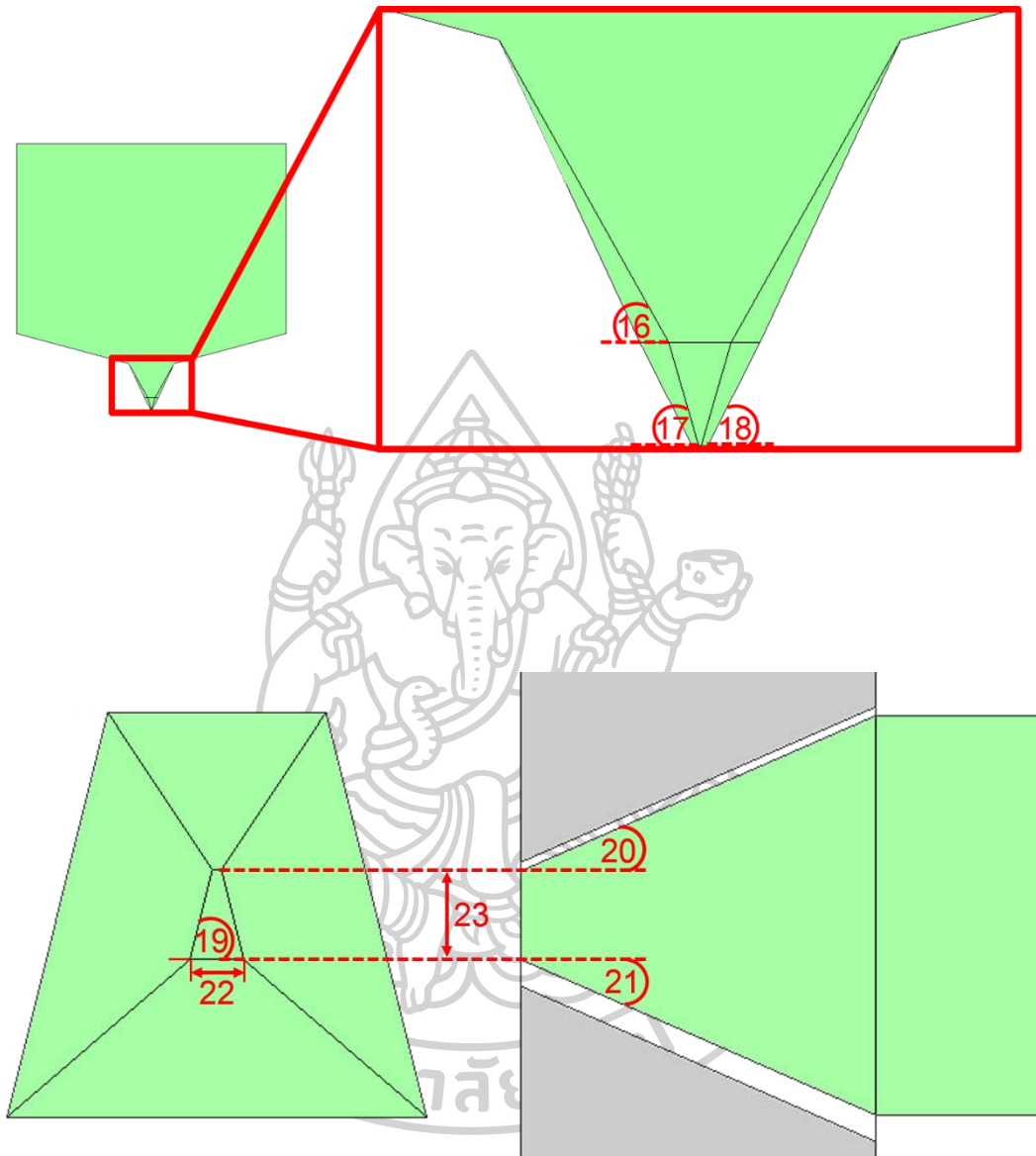
พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองของหัวเขียนบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ ก.1 ก.2

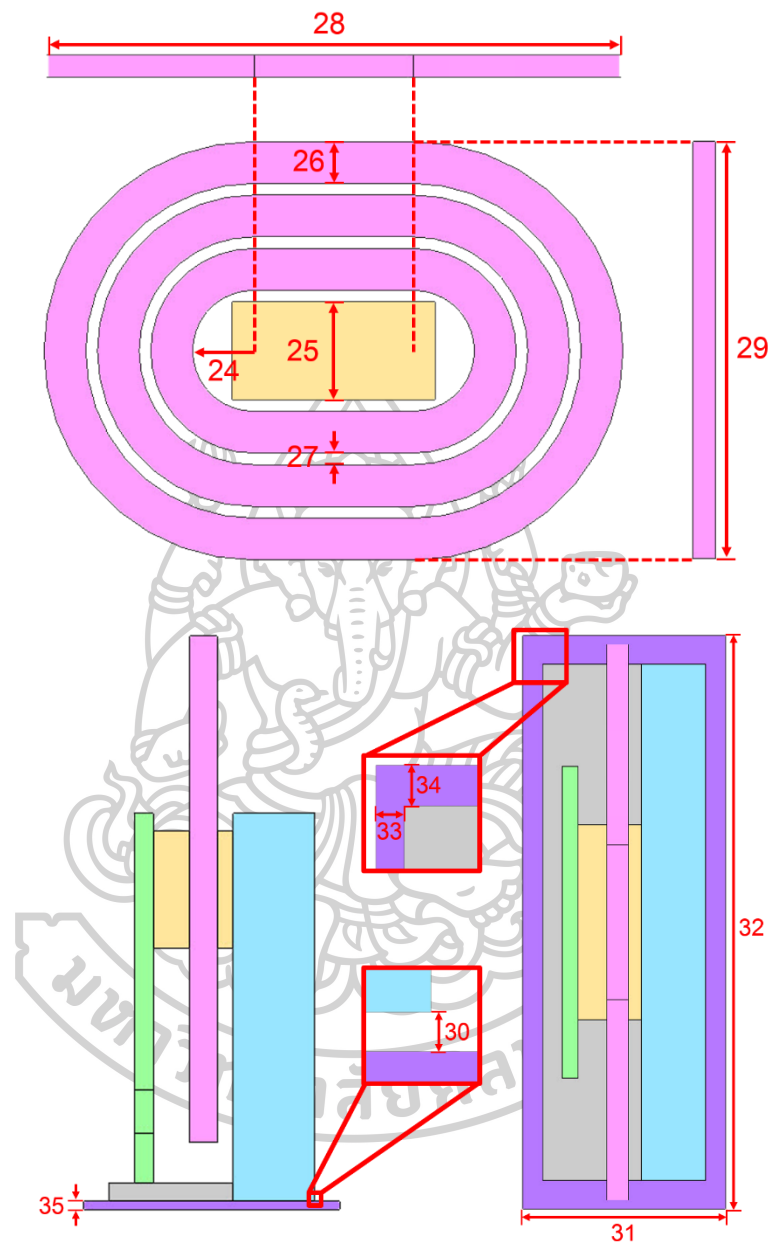
และ ก.3



รูปที่ ก. 1 แสดงพารามิเตอร์ลำดับที่ 1 – 15



รูปที่ ก. 2 แสดงพารามิเตอร์ลำดับที่ 16 - 23



รูปที่ ก. 3 แสดงพารามิเตอร์ลำดับที่ 24 – 35

ตารางที่ ๓.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลอง

No.	Parameters	Size
1	main pole thickness (nm)	450
2	gap between main pole and coil (nm)	480
3	coil thickness (nm)	637
4	gap between coil and return pole (nm)	380
5	return pole thickness (nm)	1,912
6	return pole width (nm)	9,097
7	shield width (nm)	2,919
8	shield thickness (nm)	400
9	distance between first flare angle and second first flare angle (nm)	1,170
10	shield length (nm)	1,530
11	main pole width (nm)	4,625
12	connect length (nm)	5,775
13	distance between connect and coil center (nm)	600
14	distance between coil center point (nm)	4,575
15	second flare angle (deg)	15
16	first flare angle (deg)	60
17	chisel angle (deg)	74
18	back chisel angle (deg)	64
19	angle of trapezoid angle (deg)	76
20	top bevel angle (deg)	24
21	back bevel angle (deg)	24
22	pole width (nm)	60
23	pole thickness (nm)	100

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลอง (ต่อ)

No.	Parameters	Size
24	coil radius (nm)	1,718
25	connect width (nm)	2,775
26	coil width (nm)	1,190
27	gap between coil (nm)	330
28	major axis of coil (nm)	16,471
29	minor axis of coil (nm)	11,896
30	Flying height (nm)	10
31	media width (nm)	6,000
32	media length (nm)	17,000
33	distance between leading (nm) shield and media	583
34	distance between side shield and media (nm)	850
35	media thickness (nm)	200



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฤทธิรงค์ บ้านเย็น
วัน เดือน ปี เกิด	6 ธันวาคม 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี สาขา ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2555 ศึกษาต่อ ระดับปริญญาโท สาขา ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	35/1 หมู่ 10 ซอย ไร่จิง 32 ถนนพุทธมณฑลสาย 6 ตำบล ไร่จิง อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม 73210

