



การศึกษาไมโครแมกเนติกของสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพล
ในหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

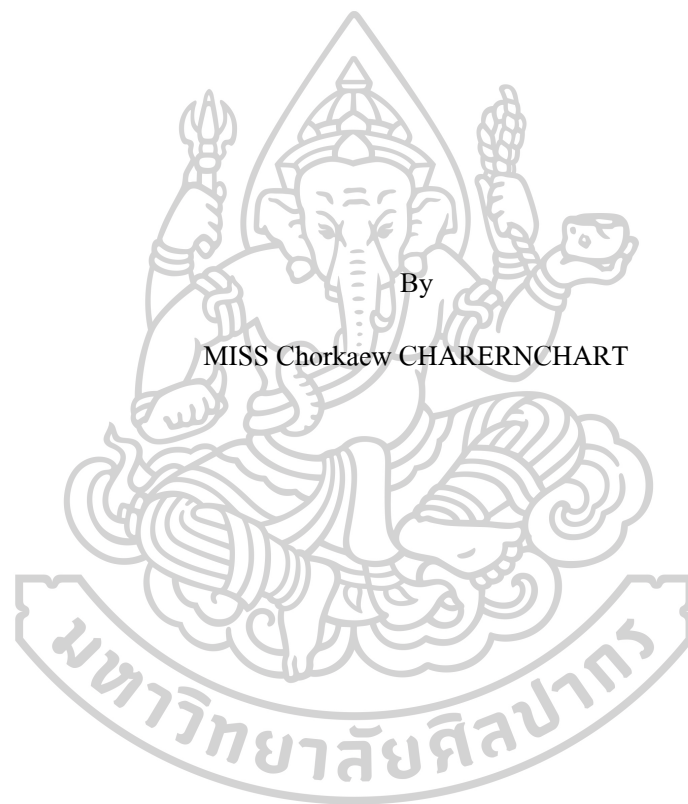
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาไมโครแมกเนติกของสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพล
ในหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

MICROMAGNETIC STUDY OF POLE TIP REMANANCE IN PERPENDICULAR
MAGNETIC RECORDING HEADS



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements

for Master of Science (PHYSICS)

Science Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

| | |
|----------------------|--|
| หัวข้อ | การศึกษาไมโครเมกเนติกของสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพล ในหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง |
| โดย | ช่อแก้ว เจริญชาติ |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์ |

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัทริยา คำรงค์ศักดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มยุรี หาญสุภาอนุสรณ์)



55306202 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : แบบจำลองไมโครแมกเนติก, สนามแม่เหล็กคาง

นางสาว ช่อแก้ว เจริญชาติ: การศึกษาไมโครแมกเนติกของสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพล
ในหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลของหัวเขียนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ถูกศึกษาโดยใช้การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม object oriented micro-magnetic framework (OOMMF) สนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลนี้คือสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลของหัวเขียนในแนวตั้งหลังจากหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเขียน นอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์และกระบวนการผลิตสไลเดอร์ (slider) เนื่องจากกระบวนการ magnetic field initialization (MFI) ที่ต้องทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกแม่เหล็ก ในส่วนแรกใช้แบบจำลอง 3 มิติ ของหัวเขียนแบบง่าย เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากพารามิเตอร์ของรูปทรงและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพต่อสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพล ในทางทฤษฎีแบบจำลองหัวเขียนจะถูกป้อนด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกในสองทิศทาง โดยทิศทางหนึ่งอยู่ในแนวแกน z เพื่อจำลองสนามแม่เหล็กที่สร้างจากการเหนี่ยวนำของขดลวดและอีกอันหนึ่งอยู่ในแนวแกน y เพื่อจำลองกระบวนการ MFI หลังจากที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนจะค่อย ๆ เคลื่อนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ทำให้พลังงานภายในระบบต่ำสุด ที่สภาวะสมดุลของระบบสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลสามารถอธิบายได้ด้วยแมกนีไทเซชันเฉลี่ยที่เมนโพลของหัวเขียน นอกจากนี้ยังคำนวณพลังงานดีแมกนีไทเซชันเพื่อวิเคราะห์การรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูปทรงและคุณสมบัติทางกายภาพ สนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลในแบบจำลอง 3 มิติ ของหัวเขียนแม่เหล็กที่เสมือนจริงมากขึ้นถูกนำเสนอในส่วนสุดท้าย เราจะศึกษาผลกระทบของหัวเขียนที่มีพารามิเตอร์ของโยคแตกต่างกัน ได้แก่ ขนาดของมุมแฟลร์ (flare angles) และความยาวปลายโพล (throat height) ต่อสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพล นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางแม่เหล็กเพื่อตรวจสอบสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพล ผลการจำลองทั้งแบบจำลองแบบง่ายและแบบเสมือนจริงแสดงให้เห็นว่าความยาวปลายโพลมีผลต่อสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพลเป็นอย่างมาก สนามแม่เหล็กคางจะน้อยเมื่อความยาวปลายโพลสั้นกว่า 150 nm สำหรับแบบจำลองแบบง่ายและ 130 nm สำหรับแบบจำลองเสมือนจริง ตามลำดับมุมแฟลร์ของหัวเขียนยังส่งผลต่อสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กคางลดลงเมื่อขนาดของมุมแฟลร์แคบ นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนมีผลต่อสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพล หัวเขียนแม่เหล็กที่ทำจากโลหะผสมของวัสดุแม่เหล็กอ่อน (เช่น NiFe) พบว่ามีสนามแม่เหล็กคางที่ปลายโพลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ทำจากโลหะผสมของวัสดุแม่เหล็กแข็ง (เช่น CoFeNi)

55306202 : Major (PHYSICS)

Keyword : micromagnetic simulation, remanence

MISS Chorkaew CHARERNCHART : Micromagnetic study of pole tip remanence in perpendicular magnetic recording heads Thesis advisor : Badin Damrongsak, Ph.D.

In this thesis, the pole-tip remanence in magnetic write heads, which is one of significant problems in perpendicular magnetic recording, was studied using the open source micromagnetic simulation, object oriented micro-magnetic framework (OOMMF). The pole-tip remanence is the remaining out-of-plane magnetic field on the main write pole after a write current was turned off. It can also occur from device and slider fabrication during magnetic field initialization (MFI) process where the external magnetic field was applied to magnetic recording heads. In the first section, a simplified 3D model of the magnetic write head was employed to investigate the effects of geometrical parameters and physical properties variations on the pole-tip remanence. In principle, the writer model was applied by the external magnetic field in two directions: one direction was in the z axis to simulate the induced magnetic field generated from a write coil and the other was in the y axis to simulate the MFI process. After the magnetic field was set to zero, magnetizations inside the write head were relaxed back to the equilibrium state, minimizing the internal energy. At the steady state, the pole-tip remanence can be determined by averaging magnetizations on the main write pole. In addition, the calculated demagnetization energy was used for an analysis of the magnetic flux leakage corresponding to variations in the geometrical factors and the physical properties. The pole-tip remanence in a more realistic 3D model of the magnetic write head was presented in the last section. We studied the effect of the write head with different yoke parameters, including flare angles and throat height, on the pole-tip remanence. Moreover, the influence of magnetic properties on the pole remanence was investigated. Simulation results from both the simplified and more realistic models revealed that the throat height had a massive impact on the pole remanence. The remnant field was minimized when the throat height was shorter than 150 nm for the simplified model and 130 nm for the realistic model, respectively. The flare angle of the write head also affected the pole remanence. Results showed a decrease in the intensity of the remnant field for the narrow flare angle. In addition, it was found that the magnetic properties of the write head had the effect on the pole remanence. The magnetic write heads made of a soft magnetic alloy (such as NiFe) showed less pole remanence compared with those made of a hard magnetic alloy (i.e. CoFeNi)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก อ.ดร.บดินทร์ คำรงค์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทริยา คำรงค์ดี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.มยุรี หาญสุกานุกรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้วิจัยส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณทางบริษัทเวสต์เทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่คอยสนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ช่วยให้ความรู้ให้คำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษาแลกเปลี่ยนความรู้ ให้คำแนะนำโปรแกรมและให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลกันด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่มอบโอกาสทางการศึกษาตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



ช่อแก้ว เจริญชาติ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 5 |
| 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย | 5 |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย | 6 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 6 |
| บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน..... | 7 |
| 2.1.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)..... | 7 |
| 2.1.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction) | 10 |
| 2.1.3 แมกเนติกไดโพลโมเมนต์ (magnetic dipoles moment)..... | 12 |
| 2.1.4 สภาวะแม่เหล็กของวัสดุ | 12 |
| 2.1.4.1 ไดอะแมกเนติก | 13 |
| 2.1.4.2 พาราแมกเนติก | 13 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.1.4.3 | เฟอร์โรแมกเนติก | 14 |
| 2.1.4.4 | แอนติเฟอร์โรแมกเนติก | 15 |
| 2.1.4.5 | เฟอร์ริแมกเนติก | 16 |
| 2.1.5 | ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop)..... | 16 |
| 2.1.6 | แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก (anisotropy of the magnetic material) | 18 |
| 2.1.6.1 | แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับโครงสร้างผลึก | 19 |
| 2.1.6.1.1 | แอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ | 19 |
| 2.1.6.1.2 | แอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล | 20 |
| 2.1.6.2 | แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปร่าง..... | 20 |
| 2.1.7 | โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain and magnetic domain walls)..... | 22 |
| 2.1.7.1 | ทฤษฎีโดเมนแม่เหล็ก..... | 22 |
| 2.1.7.2 | โครงสร้างผนังโดเมนแม่เหล็ก | 23 |
| 2.1.7.3 | ผนังโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain walls) | 24 |
| 2.1.7.3.1 | ผนังโดเมนแบบบลอชและผนังโดเมนแบบนีล | 24 |
| 2.1.7.3.2 | ผนังโดเมน 90° และ 180° และโครงสร้าง cross-tie [17] | 25 |
| 2.1.7.4 | รูปแบบโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กในฟิล์มบาง | 27 |
| 2.1.7.5 | การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กเบื้องต้น | 30 |
| 2.2 | ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive)..... | 33 |
| 2.2.1 | เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 33 |
| 2.2.2 | องค์ประกอบพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 35 |
| 2.3 | หลักการดำเนินงานของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก | 37 |
| 2.3.1 | กระบวนการอ่านข้อมูล (reading process)..... | 38 |
| 2.3.2 | กระบวนการเขียนข้อมูล (writing process)..... | 38 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.4 | กระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก | 40 |
| 2.4.1 | กระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน | 40 |
| 2.4.2 | กระบวนการ magnetic field initialization | 42 |
| 2.5 | หลักเกณฑ์ที่สำคัญสำหรับหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง | 42 |
| 2.5.1 | ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง | 42 |
| 2.5.2 | ความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์ (robustness to stray fields) | 43 |
| 2.5.3 | สนามแม่เหล็กคงค้างต่ำหรือลบข้อมูลหลังจากเขียน (low remnant head field or erase after write) | 44 |
| 2.6 | ไมโครแมกเนติก | 44 |
| 2.6.1 | วิธีคำนวณแบบสถิต (static method) | 45 |
| 2.6.2 | วิธีคำนวณแบบไดนามิก (dynamic method) | 46 |
| 2.6.2.1 | การหมุนรอบแกนกลาง (gyromagnetic precession) | 46 |
| 2.6.2.2 | สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau – Lifshitz equation) | 47 |
| 2.6.2.3 | สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์กิลเบิร์ต (Landau - Lifshitz Gilbert equation) | 48 |
| 2.6.3 | สนามแม่เหล็กยังผล | 50 |
| 2.6.3.1 | พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy) | 50 |
| 2.6.3.2 | พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy) | 52 |
| 2.6.3.2.1 | แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดี่ยว | 53 |
| 2.6.3.2.2 | แอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ | 55 |
| 2.6.3.3 | พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy) | 56 |
| 2.6.3.4 | พลังงานซีแมน (zeeman energy) | 58 |
| 2.7 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลของหัวเขียน | 58 |
| บทที่ 3 | การจำลองไมโครแมกเนติก | 60 |
| 3.1 | การสร้างแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนแม่เหล็กด้วยโปรแกรม OOMMF | 60 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.1 ภาพจำลองของหัวเขียน | 61 |
| 3.1.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียน | 62 |
| 3.2 การจำลองไมโครแมกเนติกสำหรับหัวเขียนด้วยโปรแกรม OOMMF | 64 |
| 3.3 การวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม OOMMF | 67 |
| 3.3.1 ผลที่ได้จากโปรแกรม OOMMF | 68 |
| 3.3.2 จำนวนหาสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนจากผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม OOMMF | 70 |
| บทที่ 4 การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากกระบวนการผลิต | 76 |
| 4.1 ขั้นตอนการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลเนื่องจากกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก | 76 |
| 4.2 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนและวิเคราะห์ผล | 79 |
| 4.2.1 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย | 79 |
| 4.2.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลของหัวเขียน | 80 |
| 4.2.1.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณโพล | 83 |
| 4.2.1.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ easy axis | 87 |
| 4.2.2 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง | 88 |
| 4.2.2.1 ผลกระทบเนื่องจากการกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน | 88 |
| 4.2.2.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์ | 93 |
| 4.2.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็ก ... | 96 |
| บทที่ 5 การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก | 102 |
| 5.1 ขั้นตอนการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดตัวนำ | 102 |
| 5.2 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนและวิเคราะห์ผล | 104 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.1 ผลการจำลองสำหรับหัวเข็ญที่มีรูปทรงแบบง่าย..... | 104 |
| 5.2.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลของหัวเข็ญ..... | 104 |
| 5.2.1.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเข็ญบริเวณโยค..... | 108 |
| 5.2.1.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ easy axis..... | 111 |
| 5.2.2 ผลการจำลองสำหรับหัวเข็ญที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเข็ญจริง..... | 112 |
| 5.2.2.1 ผลเนื่องจากระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเข็ญ..... | 113 |
| 5.2.2.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์..... | 116 |
| 5.2.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเข็ญ..... | 120 |
| บทที่ 6 สรุปและอภิปรายผล..... | 124 |
| รายการอ้างอิง..... | 132 |
| ภาคผนวก..... | 136 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 142 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์..... | 63 |
| ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์..... | 63 |
| ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้จำลองไมโครแมกเนติก..... | 79 |
| ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์วัสดุแม่เหล็กตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน.... | 79 |
| ตารางที่ 4.3 ขนาดความยาวและขนาดความกว้างของปลายโพลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ของหัวเขียนสำหรับแบบจำลองไมโครแมกเนติก..... | 89 |
| ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน..... | 97 |
| ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองของหัวเขียนสำหรับแบบจำลองไมโครแมกเนติก...97 | |
| ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวเขียนกับความยาวเอ็กเซนจ์สำหรับ โลหะผสม NiFe และ CoFeNi..... | 98 |



สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างและ โดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก | 2 |
| รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างและ โดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนจากเทคนิค time resolved scanning kerr microscopy | 2 |
| รูปที่ 1.3 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก..... | 3 |
| รูปที่ 1.4 องค์ประกอบของหัวเขียนมุมมองด้านหน้า ภาพของหัวเขียนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตัวอย่างภาพแบบจำลองของหัวเขียน..... | 4 |
| รูปที่ 2.1 แรงระหว่างขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกัน | 8 |
| รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กขั้วเดียว..... | 9 |
| รูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดโซลินอยด์..... | 9 |
| รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นโดยขดลวดทรงกระบอก ในสุญญากาศและในวัสดุที่เป็นของแข็ง..... | 10 |
| รูปที่ 2.5 โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียส และการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน..... | 12 |
| รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับไดอะแมกเนติก ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และกรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก | 13 |
| รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับพาราแมกเนติก ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และกรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก | 14 |
| รูปที่ 2.8 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับเฟอร์โรแมกเนติก ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และกรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก | 15 |
| รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับแอนติเฟอร์โรแมกเนติก..... | 15 |
| รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับสารแม่เหล็กเฟอร์รี..... | 16 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.11 | อิทธิพลของรูปร่างของเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อแกนนอนคือสนามแม่เหล็กภายนอก และแกนตั้งคือแมกนีไทเซชัน | 17 |
| รูปที่ 2.12 | อิทธิพลของรูปร่างของเฟอร์โรแมกเนติก สำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างแข็ง และ สำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อน | 18 |
| รูปที่ 2.13 | เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับผลึกเดี่ยวของเหล็กและนิกเกิล..... | 19 |
| รูปที่ 2.14 | เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับผลึกเดี่ยวของโคบอลต์..... | 20 |
| รูปที่ 2.15 | เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก..... | 21 |
| รูปที่ 2.16 | โครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กเมื่อวัสดุแม่เหล็กเป็นทรงกลม และทรงสี่เหลี่ยม | 21 |
| รูปที่ 2.17 | การลดพลังงานแมกนีโตสแตติกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร | 22 |
| รูปที่ 2.18 | โครงสร้างภายในของผนังโดเมนแม่เหล็ก | 23 |
| รูปที่ 2.19 | การหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมภายในผนังโดเมน ผนังโดเมนแบบบลอช และผนังโดเมนแบบนีล | 24 |
| รูปที่ 2.20 | แผนภาพของผนังโดเมน 90° | 25 |
| รูปที่ 2.21 | แผนภาพของผนังโดเมน 180° | 26 |
| รูปที่ 2.22 | แผนภาพของผนังโดเมน cross-tie | 26 |
| รูปที่ 2.23 | โดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง เมื่อกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกนนอนและ แกนตั้ง โดยป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกนนอนและแกนตั้ง | 27 |
| รูปที่ 2.24 | โครงสร้างโดเมนแม่เหล็กของโลหะผสม $Ni_{80}Fe_{20}$ เมื่อมีขนาดของฟิล์มแม่เหล็ก แตกต่างกัน | 28 |
| รูปที่ 2.25 | ชนิดของโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง..... | 29 |
| รูปที่ 2.26 | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลองกับความยาวเอ็กเซนจ์สำหรับ แบบจำลองแบบง่าย..... | 30 |
| รูปที่ 2.27 | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลองกับความยาวเอ็กเซนจ์ เมื่อเปลี่ยนแปลง ขนาดของแบบจำลอง | 31 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.27 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลองกับความยาวเอ็กเซนจ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลอง | 32 |
| รูปที่ 2.27 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลองกับความยาวเอ็กเซนจ์ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลอง | 33 |
| รูปที่ 2.28 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวนอน และการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง | 34 |
| รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์..... | 35 |
| รูปที่ 2.30 ชุดประกอบ head gimbal assembly และ ชุดประกอบ head stack assembly | 36 |
| รูปที่ 2.31 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทางกายภาพและการจัดแบ่งแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 37 |
| รูปที่ 2.32 ชุดประกอบหัวบันทึกข้อมูลที่ลอยอยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูล | 37 |
| รูปที่ 2.33 แบบจำลองกระบวนการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 38 |
| รูปที่ 2.34 แบบจำลองกระบวนการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 39 |
| รูปที่ 2.35 แผนภาพจำลองกระบวนการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล..... | 39 |
| รูปที่ 2.36 แผนภาพแสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก | 40 |
| รูปที่ 2.37 ขนาดของปลายโพลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า..... | 41 |
| รูปที่ 2.38 แผนภาพแสดงการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ของเครื่อง MFI..... | 42 |
| รูปที่ 2.39 แผนภาพของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งเนื่องจากมี SUL | 43 |
| รูปที่ 2.40 การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กยังผล การหมุนแบบไม่มีการหน่วง และการหมุนแบบมีการหน่วง | 49 |
| รูปที่ 2.41 พื้นผิวพลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว เส้นประแสดง easy axis ที่อยู่ในแนวแกน z | 54 |
| รูปที่ 2.42 พื้นผิวพลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ เส้นประแสดง easy axis ที่อยู่ในแนวแกน x y และ z..... | 55 |
| รูปที่ 3.1 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก..... | 61 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของหัวเขียนมุมมองด้านหน้าโดยภาพของหัวเขียนจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและตัวอย่างภาพแบบจำลองของโยคหัวเขียน | 62 |
| รูปที่ 3.3 รูปทรงของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ | 63 |
| รูปที่ 3.4 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนด้วยโปรแกรม OOMMF | 68 |
| รูปที่ 3.5 โดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับหัวเขียน จากการจำลองไมโครแมกเนติกด้วย โปรแกรม OOMMF และจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก | 69 |
| รูปที่ 3.6 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน ที่บริเวณหัวเขียนและบริเวณ ปลายโพลของหัวเขียน | 70 |
| รูปที่ 3.7 ตำแหน่งเซลล์ในแบบจำลองหัวเขียน | 71 |
| รูปที่ 3.8 ตำแหน่งเซลล์บริเวณปลายโพลของหัวเขียน | 71 |
| รูปที่ 3.9 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน | 75 |
| รูปที่ 4.1 จำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการ MFI โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางทำให้สนามแม่เหล็กภายนอก | 77 |
| รูปที่ 4.2 ภาพแบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก | 78 |
| รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของหัวเขียนบริเวณปลายโพล สำหรับแบบจำลองของหัวเขียนแบบที่ 4..... | 78 |
| รูปที่ 4.4 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดยที่ปลายโพล มีความยาวแตกต่างกัน | 80 |
| รูปที่ 4.4 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดยที่ปลายโพล มีความยาวแตกต่างกัน | 81 |
| รูปที่ 4.5 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพล ขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm..... | 82 |
| รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีความยาว ปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm..... | 83 |
| รูปที่ 4.7 โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดยมุมแฟลร์ขนาด 15° 30° 45° และ 60° | 84 |
| รูปที่ 4.8 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60° | 84 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเมื่อมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60° | 85 |
| รูปที่ 4.10 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง โดยมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาวเท่ากับ 1:2 และ 1:1 | 86 |
| รูปที่ 4.11 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน ลูกศรแทนทิศของแมกนีไทเซชัน โดยที่ easy axis อยู่ในแกน y และ easy axis อยู่ในแกน z | 87 |
| รูปที่ 4.12 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้าง โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน | 90 |
| รูปที่ 4.12 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้าง โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน | 91 |
| รูปที่ 4.13 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm | 92 |
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm | 92 |
| รูปที่ 4.15 ขนาดของมุมแฟลร์ สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติก | 93 |
| รูปที่ 4.16 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ และ $(30^\circ, 15^\circ)$ | 94 |
| รูปที่ 4.16 (ต่อ) รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(20^\circ, 5^\circ)$ | 95 |
| รูปที่ 4.17 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ | 95 |
| รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ | 96 |
| รูปที่ 4.19 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม $Ni_{80}Fe_{20}$ $Ni_{10}Fe_{90}$ และ $Ni_{45}Fe_{55}$ | 98 |
| รูปที่ 4.20 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม $Co_{80}Fe_{10}Ni_{10}$ $Co_{35}Fe_{60}Ni_{15}$ และ $Co_{60}Fe_{39}Ni_1$ | 99 |

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 4.21 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน..... | 100 |
| รูปที่ 4.22 ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน..... | 100 |
| รูปที่ 5.1 จำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนเนื่องจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด ลูกศรสีแดงแสดงทิศทางการให้สนามแม่เหล็กภายนอก..... | 103 |
| รูปที่ 5.2 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่ความยาว 150 nm ในสถานะคงค้างเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z..... | 104 |
| รูปที่ 5.3 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่ความยาว 150 nm ในสถานะคงค้างเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -z..... | 105 |
| รูปที่ 5.4 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm..... | 106 |
| รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z และทิศ -z เมื่อหัวเขียนมีปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm..... | 107 |
| รูปที่ 5.6 โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้างสำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z เมื่อหัวเขียนมีปลายโพลขนาด 50 nm 100 nm และ 200 nm..... | 107 |
| รูปที่ 5.7 โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดยมีมุมแฟลร์ขนาด 15° 30° 45° และ 60°..... | 108 |
| รูปที่ 5.8 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60°..... | 109 |
| รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z และทิศ -z เมื่อหัวเขียนมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60°..... | 110 |
| รูปที่ 5.10 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาว มีค่าเท่ากับ 1:2 และ 1:1..... | 111 |
| รูปที่ 5.11 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน ลูกศรแทนทิศของแมกนีไทเซชัน โดยที่ easy axis อยู่ในแนวแกน y และ easy axis อยู่ในแนวแกน z..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| รูปที่ 5.12 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้างจากโปรแกรม OOMMF โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน | 113 |
| รูปที่ 5.12 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้างจากโปรแกรม OOMMF โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน | 114 |
| รูปที่ 5.13 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพล ตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm | 115 |
| รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็ก ภายนอกในทิศ +z และทิศ -z โดยที่หัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 ถึง 150 nm... | 116 |
| รูปที่ 5.15 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดมุม แฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°).... | 117 |
| รูปที่ 5.16 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°) | 118 |
| รูปที่ 5.16 (ต่อ) ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°)..... | 119 |
| รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็ก ภายนอกในทิศ +z และทิศ -z โดยที่หัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°)..... | 120 |
| รูปที่ 5.18 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อน เป็นโลหะผสม Ni ₈₀ Fe ₂₀ Ni ₁₀ Fe ₉₀ และ Ni ₄₅ Fe ₅₅ สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ในทิศ +z..... | 120 |
| รูปที่ 5.19 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อน เป็นโลหะผสม Co ₈₀ Fe ₁₀ Ni ₁₀ Co ₃₅ Fe ₆₀ Ni ₁₅ และ Co ₆₀ Fe ₃₉ Ni ₁ สำหรับกรณีป้อน สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z..... | 121 |
| รูปที่ 5.20 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน | 121 |
| รูปที่ 5.20 (ต่อ) ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน | 122 |

รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็ก
ภายนอกในทิศ $+z$ และทิศ $-z$ เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน122



บทที่ 1

บทนำ

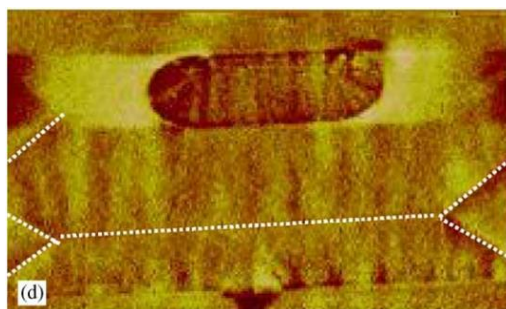
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า HDD ซึ่งเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลดิจิทัลที่อาศัยหลักการแปลความหมายของตัวเลขไบนารีจากความต่างของขั้วแม่เหล็กที่กำหนดในแถบข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หรือที่เรียกกันว่า เป็นอุปกรณ์ประเภท magnetic recording โดยในปัจจุบันมีความต้องการที่จะพัฒนาเทคโนโลยี HDD เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลและเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) หรือชื่อเรียกว่า PMR บริษัทแรกที่มีการจำหน่ายฮาร์ดดิสก์โดยใช้การบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งคือ Toshiba [1] นอกจากนี้อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ยังพยายามพัฒนาหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording heads) ให้มีประสิทธิภาพในการเขียนบันทึกสูงเพื่อเพิ่มความจุของข้อมูล โดยการออกแบบรูปทรงของหัวเขียนเพื่อทำการกำหนดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ออกจากปลายหัวเขียน เช่น การเปลี่ยนแปลงความยาวของปลายหัวเขียน (pole tip) และขนาดของมุมแฟลร์ (flare angle) [2, 3] อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาตามมาที่ต้องได้รับการแก้ไขและพัฒนาเกี่ยวกับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กคือ ความไม่เสถียรของหัวเขียนในเรื่องของการมีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน ซึ่งเป็นความกังวลอย่างยิ่งสำหรับการเขียนข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง

การคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลนั้น เกิดขึ้นได้จาก 2 สาเหตุหลักคือ 1) เกิดจากผลของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต เพื่อไปจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นฟรีของหัวอ่าน (free layer, FL) ให้มีทิศทางตามต้องการ [4] และการกระทำนี้อาจส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลของหัวเขียนได้อีกด้วย กล่าวคือเมื่อหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กถูกนำไปผ่านกระบวนการผลิตขั้นต่อไป จะทำให้มีโอกาสที่อนุภาคปนเปื้อนจำพวกเหล็กหรือนิกเกิลที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือในอากาศไปเกาะติดบริเวณปลายโพล ซึ่งในกรณีที่ปลายโพลมีสนามแม่เหล็กค้างอยู่นี้จะส่งผลทำให้หัวบันทึกข้อมูลเสียหายหรือใช้งานไม่ได้ สาเหตุที่ 2) เป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดในระหว่างกระบวนการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง [5-8] กล่าวคือเมื่อทำการหยุดจ่ายกระแสให้กับขดลวดหรือหัวเขียนหยุดทำงาน จะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนค่อย ๆ เคลื่อนตัวเข้าสู่สถานะสมดุลหรืออยู่ในสถานะแมกนีไทเซชันคงค้าง ซึ่งเป็นเหตุให้เกิด

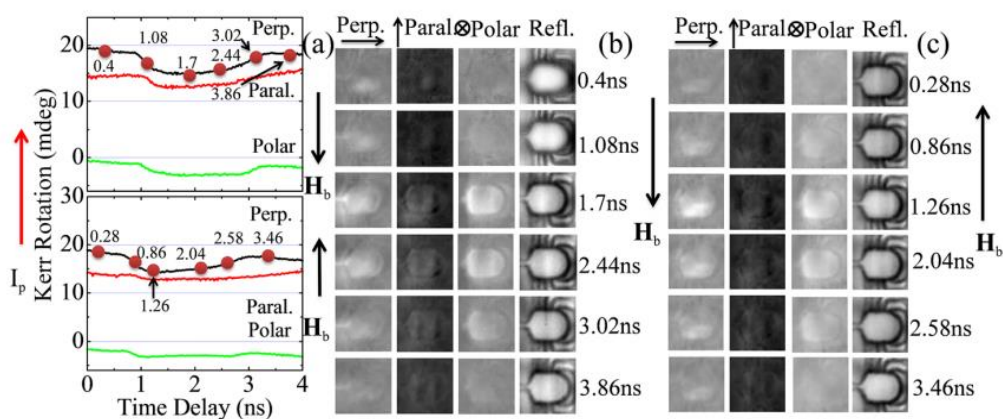
การคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน ดังนั้นการมีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนในกรณีนี้จะก่อให้เกิดการเขียนข้อมูลทับซ้อนกับข้อมูลเดิมที่ต้องการเก็บบันทึกในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก และอาจทำให้ข้อมูลเกิดความเสียหายได้

โดยในทางปฏิบัติการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียนสามารถศึกษาได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscope) หรือเรียกโดยย่อว่า MFM [8] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ time resolved scanning kerr microscopy (TRSKM) [9] ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างและ โดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ที่มา : K. Hirata, T. Roppongi, and K. Noguchi. (2005). “A study of pole material properties for pole erasure.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 287: 352-356.

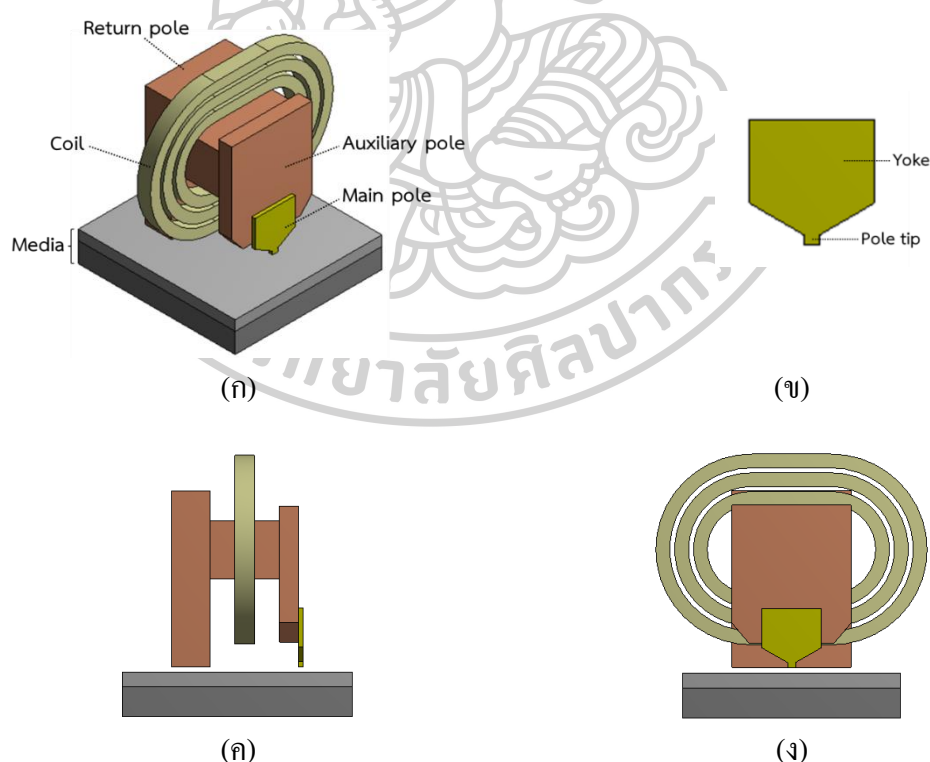


รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างและ โดเมนแม่เหล็กของหัวเขียนจากเทคนิค Time Resolved Scanning Kerr Microscopy

ที่มา : W. Yu, et al. (2013). “Time resolved scanning Kerr microscopy of hard disk writer structures with a multilayered yoke.” *Appl. Phys. Lett* 102, 162407.

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิค TRSKM ที่สามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันและการเคลื่อนที่ของโดเมนแม่เหล็กในหัวเขียนได้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวมีความยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงาน และอาจทำลายพื้นผิวของชิ้นงานเกิดความเสียหายได้นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อความเค้น ความเครียดของหัวเขียนแม่เหล็กที่ต้องการศึกษา โดยค่าของความเค้นความเครียดก็จะส่งผลต่อแมกนีไทเซชันที่อยู่ภายในหัวเขียนด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจใช้การจำลองทางไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF (object oriented micromagnetic framework) [10] เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขดลวดตัวนำ และสนามแม่เหล็กภายนอกในกระบวนการผลิต รวมไปถึงผลกระทบจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน

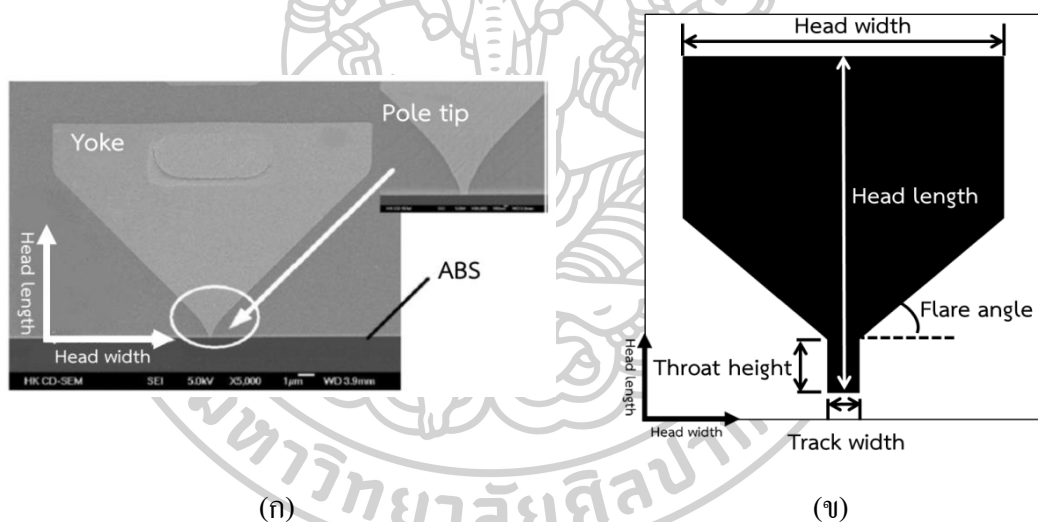
หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กจะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างสามมิติซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ (1) โพลย้อนกลับ (return pole) (2) ขดลวด (coil) (3) auxiliary pole และ (4) โพลหลัก (main pole) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ก) [11] โดยในงานวิจัยนี้เราสนใจเฉพาะบริเวณ โพลหลักของหัวเขียนเพราะเป็นส่วนที่ส่งผลโดยตรงต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็ก รูปที่ 1.3 (ข) แสดงโครงสร้างของโพลหลักซึ่งประกอบไปด้วยโยค (yoke) และปลายโพล (pole tip)



รูปที่ 1.3 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก (ก) ภาพหัวเขียนมุมมองสามมิติ (isometric; ISO) และ (ข) ภาพขยายบริเวณ main pole (ค) ภาพหัวเขียนมุมมองด้านข้าง (side view) และ (ง) ภาพหัวเขียนมุมมองด้านหน้า (front view)

ดังนั้นในการจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้ เราสนใจสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของโพลหลักขึ้น (ดูรูปที่ 1.4 (ข) ประกอบ) เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน การเกิดโดเมนแม่เหล็ก และการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน รูปที่ 1.4 (ก) แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของโพลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยผู้วิจัยจะทำการลอกแบบโครงสร้างดังกล่าวด้วยโปรแกรมวาดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ข) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง โดยมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ความยาวของหัวเขียนด้านกว้าง (head width)
- 2) ความยาวของหัวเขียนด้านยาว (head length)
- 3) ความยาวที่ปลายโพลของหัวเขียน (throat height)
- 4) ความกว้างของปลายโพล (track width)
- 5) ขนาดของมุมแฟลร์ (flare angle)



รูปที่ 1.4 องค์ประกอบของหัวเขียนมุมมองด้านหน้าโดย ภาพของหัวเขียนจาก (ก) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ (ข) ตัวอย่างภาพแบบจำลองของหัวเขียน

ที่มา : 1.4 (ก) K. Hirata, et al. (2005). "Material Properties and Domain Structure Influence on Pole Erasure Occurrence in Perpendicular Recording Heads." *IEEE Transactions on magnetics* 41, 10 (October): 2902-2904.

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองของหัวเข็มนาฬิกาและโปรแกรมสำหรับศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่โพลหลักของหัวเข็มนาฬิกา
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกา เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขดลวดตัวนำและสนามแม่เหล็กภายนอกในระหว่างกระบวนการผลิตหัวบันทึกรหัสแม่เหล็ก
3. เพื่อศึกษาผลกระทบที่ส่งต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหลักของหัวเข็มนาฬิกาจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเข็มนาฬิกา และจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเข็มนาฬิกาต่อสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกา
4. เพื่อศึกษาผลของทิศทาง easy axis และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเข็มนาฬิกาต่อสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกา

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ปัจจัยสำคัญที่ผู้วิจัยคาดการณ์ว่าจะมีผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกาได้แก่

1. ผลจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกรหัสแม่เหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งสนามแม่เหล็กภายนอกนี้จะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเข็มนาฬิกาอยู่ในสถานะคงค้าง และเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกาได้
 2. ผลจากการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเนื่องจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กภายนอกนี้จะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเข็มนาฬิกาอยู่ในสถานะคงค้าง และเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกาได้เช่นเดียวกัน
 3. การเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวเข็มนาฬิกา โดยผลของขนาดหัวเข็มนาฬิกาจะส่งผลกระทบต่อแอมไพอิสโทรีปีทีขึ้นกับรูปทรง ซึ่งจะทำการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลเปลี่ยนแปลงไป
 4. การเปลี่ยนแปลงทิศทางของ easy axis และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเข็มนาฬิกาจะมีผลต่อค่า exchange length ซึ่งจะมีผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกาได้
- โดยผู้วิจัยจะใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์เหล่านี้ต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเข็มนาฬิกา

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก โดยใช้โปรแกรม OOMMF และพัฒนาโค้ดสำหรับดึงข้อมูลการคงค้างของสนามแม่เหล็ก พลังงานภายในของหัวเขียน เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล

สนามแม่เหล็กภายนอกที่สนใจ ได้แก่ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำ และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กขนาด 1 เทสลา จากกระบวนการ magnetic field initialization (MFI)

พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลหลักของหัวเขียนที่ผู้วิจัยสนใจ ได้แก่ ขนาดความยาวของปลายโพล ขนาดความกว้างและความยาวของหัวเขียน บริเวณ โยค ขนาดของมัมแฟลร์ ผลกระทบเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า และคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่เปลี่ยนไป เช่น แนวแกน easy axis รวมทั้งวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียน ซึ่งในที่นี้เราสนใจเพียงสองวัสดุได้แก่ NiFe และ CoFeNi

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF สามารถใช้ในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขดลวดตัวนำและสนามแม่เหล็กภายนอกในกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กได้

2. การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF สามารถใช้เพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากรูปทรงของหัวเขียนแบบต่างๆ กระบวนการขัดเปิดผิวหน้าของหัวเขียน และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียน

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ถือเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญสำหรับการบันทึกข้อมูลในรูปแบบแม่เหล็กที่มีความจุสูง และที่สำคัญมันเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง แม้ว่าเครื่องจะถูกปิดแต่ก็ยังสามารถเรียกข้อมูลที่ได้เคยบันทึกไว้นามาใช้งานได้อีก

การพัฒนาเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง สนใจมุ่งเน้นศึกษาในเรื่องการเพิ่มความจุของข้อมูลหรือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ โดยมีการพัฒนาอยู่หลายแนวทาง เช่น พัฒนาแผ่นบันทึกข้อมูลให้เขียนง่ายขึ้น และพัฒนาหัวเขียนให้มีความสามารถในการเขียนดีขึ้น แต่ถึงเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลให้มากขึ้นเท่าใด ปัญหาที่ตามมาก็มีมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น แผ่นบันทึกข้อมูลไม่มีเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) และปัญหาที่สำคัญที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเกิดการคั่งค้างของสนามแม่เหล็ก

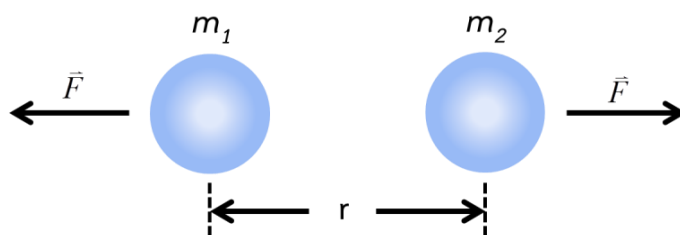
ในบทนี้เราจึงกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็นทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการเกิด โดเมนแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และองค์ประกอบพื้นฐาน รวมทั้งกระบวนการที่ส่งผลให้เกิดการคั่งค้างของสนามแม่เหล็กที่หัวเขียน และการจำลองไมโครแมกเนติกโดยอาศัยสมการแลนเดา – ลิฟชิตซ์ – กิลเบิร์ต (Landau – Lifshitz – Gilbert equation, LLG) เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละช่วงเวลาเมื่อหัวเขียนถูกกระตุ้น โดยสนามแม่เหล็กจากภายนอก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีแม่เหล็กพื้นฐานตั้งแต่สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้อย่างไร โมเมนต์แม่เหล็กและแมกนีไทเซชันคืออะไร และสถานะแม่เหล็กและวัสดุแม่เหล็กมีอะไรบ้าง จนถึงรอบฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็ก โดยอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

สนามแม่เหล็ก คือ บริเวณที่มีอิทธิพลของแม่เหล็กเนื่องจากสนามไฟฟ้าและวัสดุแม่เหล็ก ดังนั้นเราจึงขอเริ่มต้น โดยการกำหนดสนามแม่เหล็กมีสัญลักษณ์แทนด้วย \vec{H} ในแง่ของขั้วแม่เหล็ก (magnetic poles) สมมติว่าเรามีขั้วแม่เหล็กอยู่ 2 ขั้ว ที่มีกำลังของขั้วแม่เหล็ก (pole strength) เป็น m_1 และ m_2 และมีระยะห่าง r ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แรงระหว่างขั้วแม่เหล็กชนิดเดียวกัน

ในหน่วย SI ขนาดของแรง (\vec{F}) ของแต่ละขั้วจะถูกกำหนดโดยกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) [12] คือ ขนาดของแรงแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง ดังสมการที่ (2.1)

$$\vec{F} = \mu_0 \left(\frac{m_1 m_2}{4\pi r^2} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (permeability) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ r คือ ระยะห่าง มีหน่วยเป็นเมตร (m) และแรง \vec{F} เป็นแรงกระทำระหว่างขั้วแม่เหล็กสองขั้วอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างขั้วแม่เหล็กทั้งสอง มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

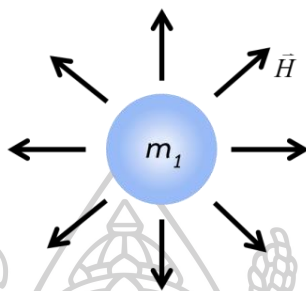
เราสามารถวัดและคาดเดาแรงระหว่างขั้ว โดยการอธิบายจากสนามแม่เหล็ก เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์อธิบายแรงที่กระทำต่อวัตถุโดยส่งผลของแรงจากระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก สมมติมีสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ และลองจินตนาการว่าเรามีการทดสอบขั้วแม่เหล็กในบริเวณสุญญากาศที่มีกำลังของขั้วแม่เหล็ก (pole strength) เป็น m_{test} จากนั้นสนามแม่เหล็ก \vec{H} ถูกกำหนดให้เป็นแรงของขั้วแม่เหล็กหารด้วยกำลังของขั้วแม่เหล็ก (หน่วย SI และหารด้วย μ_0) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\vec{F}}{m_{test}} \right) \quad (2.2)$$

สนามแม่เหล็ก \vec{H} มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) มีข้อแม้ว่าขั้วแม่เหล็กทดสอบนี้จะต้องใส่เข้าไปในบริเวณสุญญากาศ โดยที่ไม่รบกวนสนามแม่เหล็ก \vec{H} ที่ต้องการวัด ตัวอย่างเช่น ถ้าเราสนใจสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็ก แต่เราไม่ต้องย้ายขั้วแม่เหล็กโดยการใส่ขั้วแม่เหล็กทดสอบให้อยู่ใกล้ ๆ และขณะนี้เราอาจคำนวณสนามแม่เหล็ก \vec{H} ที่สร้างขึ้นโดยขั้วแม่เหล็กขั้วเดียว (m_1) ถ้าเราให้ขั้วแม่เหล็กทดสอบ m_{test} มีระยะห่าง r จาก m_1 จะทำให้แรง \vec{F} ในสมการที่ (2.1) มี m_2 เท่ากับ m_{test} จากนั้นแทนลงในสมการที่ (2.2) แล้วจะได้ขนาดของสนามดังสมการ (2.3)

$$\vec{H} = \frac{m_1}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

และทิศทางของสนามรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กขั้วบวกดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยลูกศรแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามแม่เหล็กหมายถึงจากขั้วเหนือไปขั้วใต้

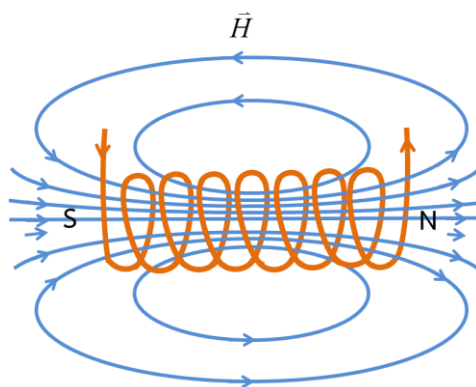


รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กขั้วเดียว

นอกเหนือจากขั้วแม่เหล็กแล้ว กระแสไฟฟ้า (electric current) ยังสร้างสนามแม่เหล็ก เราอาจจะพิจารณาสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดของเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า ขดลวดโซลินอยด์ (solenoid) แสดงดังในรูปที่ 2.3 และในทางปฏิบัติมักใช้โซลินอยด์เป็นแหล่งสร้างสนามแม่เหล็กขนาดสม่ำเสมอบริเวณแกนกลางของโซลินอยด์ ลักษณะของขดลวดโซลินอยด์จะมี n_l คือจำนวนรอบต่อความยาวของขดลวด และขนาดของกระแสไฟฟ้า (i) ดังนั้นขนาดของสนามแม่เหล็กบริเวณแกนกลางของโซลินอยด์จะได้ดังสมการ

$$\vec{H} = n_l i \quad (2.4)$$

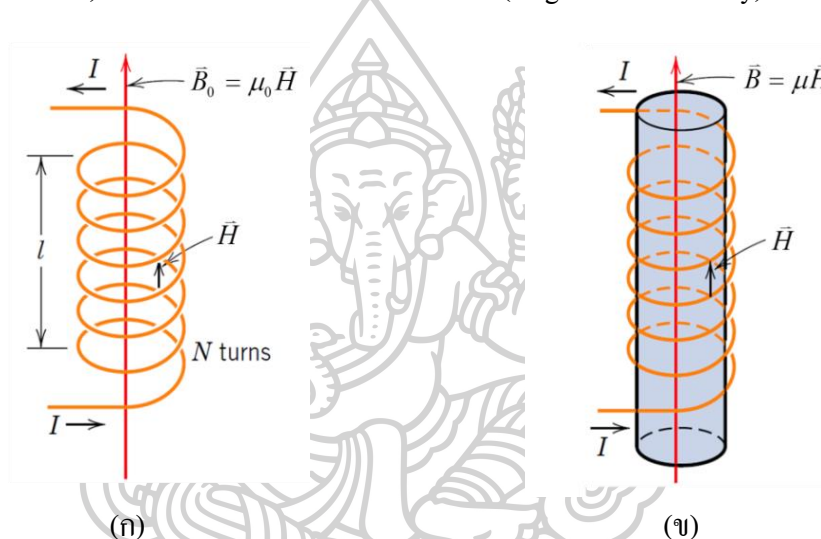
กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A) n_l คือ รอบต่อเมตร และสนามแม่เหล็ก \vec{H} มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)



รูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดโซลินอยด์

2.1.2 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction)

การเหนี่ยวนำแม่เหล็กนั้น สามารถเกิดขึ้นได้จากการนำแท่งเหล็กธรรมดาใส่ลงในขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากนั้นเราจะพบว่าที่บริเวณภายนอกของขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากแท่งเหล็กถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวด ดังนั้นขนาดความเข้มใหม่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดโซลินอยด์ และเกิดจากแท่งเหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดนั้น โดยที่ความเข้มใหม่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเราจะเรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetic induction) หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density)



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็ก (\vec{H}) ถูกสร้างขึ้นโดยขดลวดทรงกระบอก (ก) ในสุญญากาศ และ (ข) ในวัสดุที่เป็นของแข็ง

ที่มา : Callister, William D. (2007). *Materials science and engineering : an introduction*. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

การเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเขียนแทนโดย \vec{B} ซึ่งหมายถึงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่อยู่ภายในสารภายใต้สนามแม่เหล็ก \vec{H} โดยที่ \vec{B} มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (web/m^2) หรือเทสลา (tesla, T) ทั้ง \vec{B} และ \vec{H} เป็นสนามเวกเตอร์ (vector field) ที่มีทั้งขนาดและทิศทาง

โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์แสดงดังสมการ

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.5)$$

พารามิเตอร์ μ คือ ค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารที่ผ่านสนามแม่เหล็ก \vec{H} และเราสามารถวัด \vec{B} ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) เมื่อ μ มีหน่วยเป็น $\text{T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ และ \vec{H} มีหน่วยเป็น A/m

ในสุญญากาศเราสามารถคำนวณ \vec{B} ได้ดังในรูปที่ 2.4 (ก) และดังสมการที่ (2.6)

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (2.6)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (permeability of vacuum) โดยมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ และพารามิเตอร์ \vec{B}_0 หมายถึงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในสุญญากาศ

มีหลายพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายคุณสมบัติทางแม่เหล็กของของแข็ง และหนึ่งในนั้นคืออัตราส่วนของค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุต่อค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็กในสุญญากาศแสดงดังสมการที่ (2.7)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ μ_r ถูกเรียกว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) ซึ่งไม่มีหน่วย ค่าความสามารถซึมซาบแม่เหล็กหรือค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุจะเป็นค่าชี้วัดระดับความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ หรือง่ายต่อการเห็นยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก \vec{B} เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก \vec{H}

นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแม่เหล็ก คือ แมกนีไทเซชัน (magnetization) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ \vec{M} โดยมีค่าเท่ากับ โมเมนต์แม่เหล็ก (m) ต่อหน่วยปริมาตร (v) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) และแมกนีไทเซชันนี้จะถูกเหนี่ยวนำขึ้นเนื่องจากแท่งเหล็กที่ทำให้เกิดสถานะแม่เหล็กภายในขดลวดคั้งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นดังในรูปที่ 2.4 (ข)

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.8)$$

เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก \vec{H} โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ภายในวัสดุจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก และเสริมในเทอมของ $\mu_0 \vec{M}$ ดังสมการที่ (2.8)

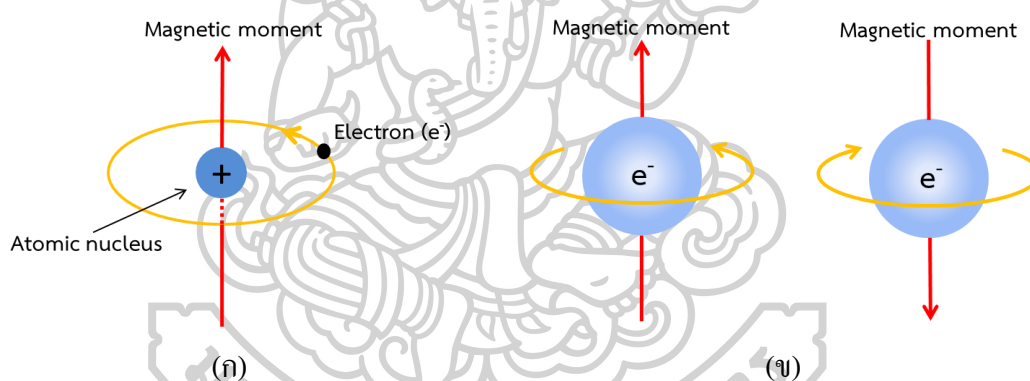
ขนาดของแมกนีไทเซชันจะเป็นแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังสมการที่ (2.9)

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.9)$$

โดยที่ χ_m คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ซึ่งไม่มีหน่วย และเป็นตัวบ่งชี้ชนิดของสารแม่เหล็กอีกด้วย คือ ถ้ามีค่าเป็นบวกสารนั้นเป็นสารแม่เหล็กพารา และถ้ามีค่าเป็นลบสารนั้นเป็นสารแม่เหล็กไดอา

2.1.3 แมกเนติกไดโพลโมเมนต์ (magnetic dipoles moment)

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารเป็นผลมาจากโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moments) ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะมีโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งหลัก ๆ คือ เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียส (orbital motion) แสดงดังรูปที่ 2.5 (ก) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสจะคล้ายคลึงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตัวนำ นอกจากนี้ยังเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าอิเล็กตรอนสปิน (electron spin) โดยมีทิศทางได้เพียง 2 ชนิดคือทิศขึ้น (up) และทิศลง (down) ซึ่งเป็นทิศที่ขนานกันแต่ทิศตรงข้ามกันแสดงดังรูปที่ 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจาก (ก) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียส และ (ข) การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

2.1.4 สถานะแม่เหล็กของวัสดุ

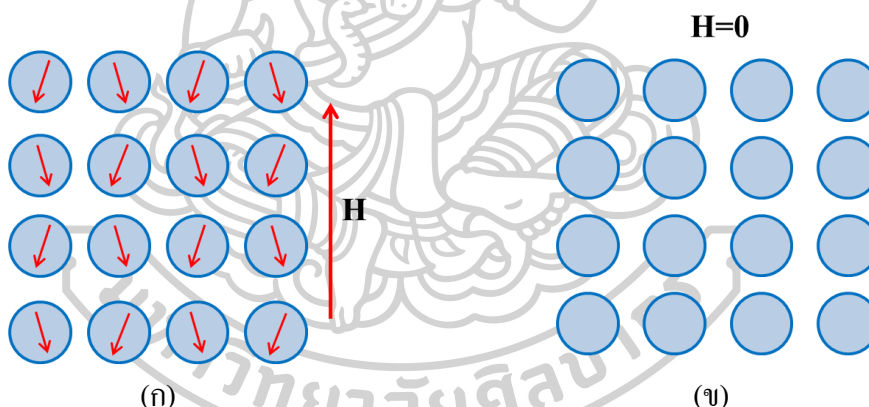
วิธีที่ดีที่สุดที่ใช้แบ่งประเภทของสารแม่เหล็กที่แตกต่างกัน คือ การอธิบายถึงการตอบสนองของวัสดุต่อสนามแม่เหล็กภายนอก โดยที่วัสดุทั้งหมดจะมีพฤติกรรมแตกต่างกันเมื่อมีการสัมผัสกับสนามแม่เหล็กภายนอก และเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกความแตกต่างนี้มากขึ้นจึงใช้วิธีการอธิบายด้วยภาพระดับอะตอม กล่าวคือเมื่อวัสดุมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจะเปลี่ยนไป โดยจะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในสารได้ดังต่อไปนี้

1. ไดอาแมกเนติก (diamagnetism)
2. พาราแมกเนติก (paramagnetism)

3. เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetism)
4. แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetism)
5. เฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetism)

2.1.4.1 ไดอแมกเนติก

ไดอแมกเนติกเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสารทั้งหมด แม้ว่าจะเป็นคุณสมบัติของแม่เหล็กที่อ่อนแอที่สุดและอาจจะอยู่ในรูปแบบที่ไม่ถาวร (nonpermanent) และยังคงความเป็นแม่เหล็กในขณะที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่ออะตอมภายในวัสดุจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ โดยการเหนี่ยวนำนี้จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียส ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กขนาดเล็ก ๆ ขึ้นในอะตอมของวัสดุและมีทิศตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ดังนั้นค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์จึงมีค่าน้อยกว่าหนึ่งแต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และขนาดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กในเชิงลบ ($\chi_m \approx -10^{-5}$) และถ้าหากวัสดุไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก จะทำให้วัสดุนั้นไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กเลยดังรูปที่ 2.6 (ข)

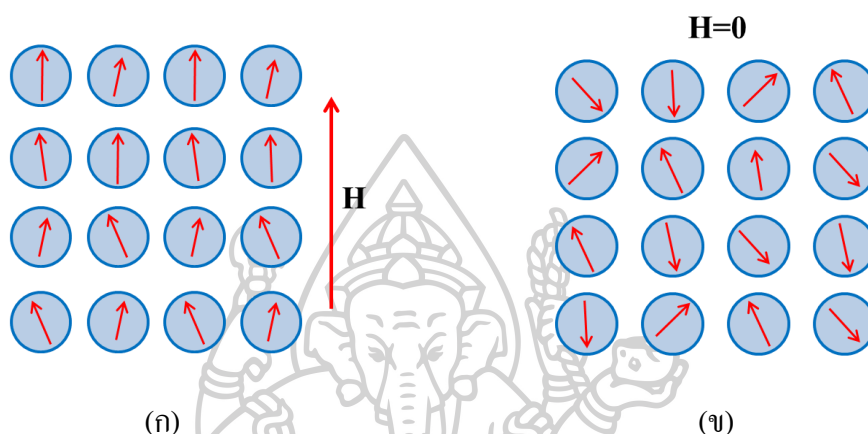


รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับ ไดอแมกเนติก โดยที่ (ก) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

2.1.4.2 พาราแมกเนติก

สถานะแม่เหล็กแบบพารา เป็นสถานะที่มีโมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวร โดยเป็นผลมาจากการหักล้างกันที่ไม่สมบูรณ์ของโมเมนต์แม่เหล็ก ที่เกิดจากอิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ในกรณีที่ไม่มีความเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมเหล่านี้จะเป็นแบบสุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ดังนั้นจึงทำให้โดยรวมของวัสดุไม่มีแม่เหล็กสุทธิและไม่มีความเป็นแม่เหล็ก โมเมนต์ของอะตอมเหล่านี้จะหมุนได้อย่างอิสระและจะทำให้เกิดแม่เหล็กแบบพาราได้ก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ จึงทำให้โมเมนต์ของ

อะตอมพยายามจัดเรียงตัวไปอยู่ในแนวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกดังในรูปที่ 2.7 (ก) และโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมเหล่านี้จะไม่มีปฏิกิริยาซึ่งกันและกันระหว่างอะตอมที่อยู่ติดกัน ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ของอะตอมมีทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก มันจะไปช่วยเพิ่มสนามแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์มีค่ามากกว่าหนึ่ง และทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเป็นบวกอยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-2}



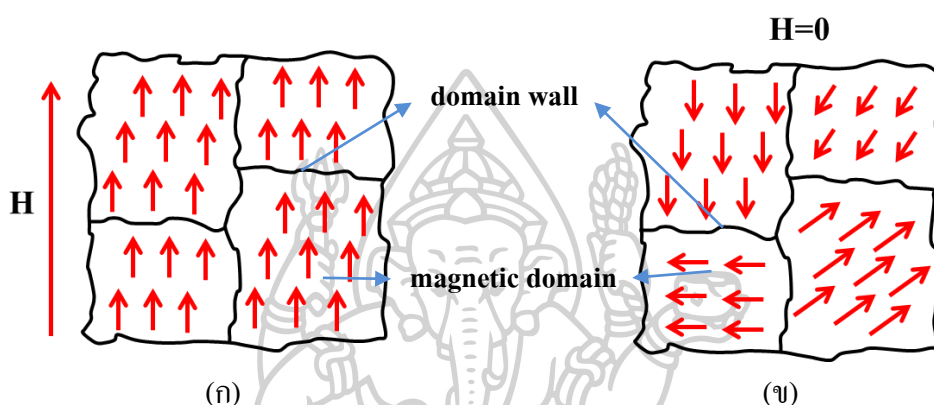
รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับพาราแมกเนติก โดยที่ (ก) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

ทั้งวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบไดอะและสภาวะแม่เหล็กแบบพาราจะถือว่าเป็นแม่เหล็กแบบไม่ถาวร เพราะว่ามันจะแสดงความเป็นแม่เหล็กก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ นอกจากนี้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กทั้งสอง แทบจะเหมือนกันกับที่เกิดขึ้นในสุญญากาศ

2.1.4.3 เฟอร์โรแมกเนติก

สภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร เป็นสภาวะแม่เหล็กชนิดหนึ่งที่สามารถคงความเป็นแม่เหล็กอยู่ได้ แม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำก็ตาม หรือจะทำให้หมดสภาพไปได้ตามต้องการ สำหรับวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรนั้น ทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กจะจัดเรียงตามโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่อยู่ข้างเคียง โดยจะไม่เปลี่ยนแปลงตามกันทั่วทั้งวัสดุ แต่จะมีผลเฉพาะบริเวณเล็ก ๆ ที่เรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain) ภายในโดเมนแต่ละโดเมนจะมีโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศเดียวกันและระหว่างโดเมนแต่ละโดเมนจะถูกกั้น ซึ่งเราจะเรียกส่วนนี้ว่า ผนังโดเมน (domain wall) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยสภาพทั่วไปแล้วโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนจะเป็นการจัดเรียงแบบสุ่มและมีค่าแมกนีไทเซชันสุทธิเป็นศูนย์ แต่ถ้าวัสดุมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ จะส่งผลทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุในแต่ละโดเมนค่อย ๆ เปลี่ยนทิศทางให้มีทิศ

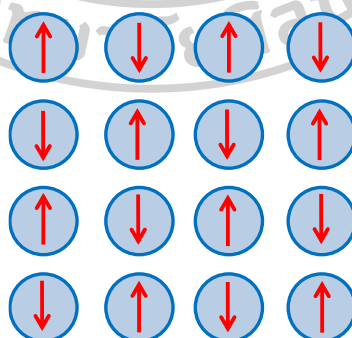
เดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังในรูปที่ 2.8 (ก) แมกนีไทเซชันที่จุดนี้จะเรียกว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) เขียนแทนด้วย M_s และถ้าหากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกจากวัสดุ โมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละโดเมนจะมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปดังในรูปที่ 2.8 (ข) แต่ค่าแมกนีไทเซชันสุทธิจะไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นวัสดุจึงยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กอยู่ได้ และเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารแม่เหล็กเฟอร์โรมากพอจนถึงจุดที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (curie temperature) สารแม่เหล็กเฟอร์โรจะสามารถเปลี่ยนจากสภาวะแม่เหล็กเฟอร์โรเป็นสภาวะแม่เหล็กพาราได้



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็กสำหรับเฟอร์โรแมกเนติก โดยที่ (ก) กรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก และ (ข) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

2.1.4.4 แอนติเฟอร์โรแมกเนติก

วัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่อยู่ภายในจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกับ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมข้างเคียงดังแสดงในรูปที่ 2.9



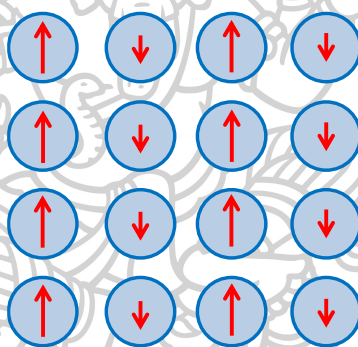
รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็กสำหรับแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

จากรูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของ โมเมนต์แม่เหล็กในลักษณะนี้จะส่งผลให้เกิดการหักล้างกัน แต่ถ้ามีสานามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำกับวัสดุจะทำให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมมีค่ามากขึ้น เมื่อโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมมีทิศเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วน โมเมนต์

แม่เหล็กของอะตอมที่มีทิศตรงข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีค่าลดลง และด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ค่าแมกนีไทเซชันสุทธิไม่เป็นศูนย์ ถ้าหากวัสดุที่มีสภาวะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรมี อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่เรียกว่า อุณหภูมิเนล (neel temperature) จะทำให้สารแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรกลายเป็นสารแม่เหล็กแบบพารา

2.1.4.5 เฟอร์ริแมกเนติก

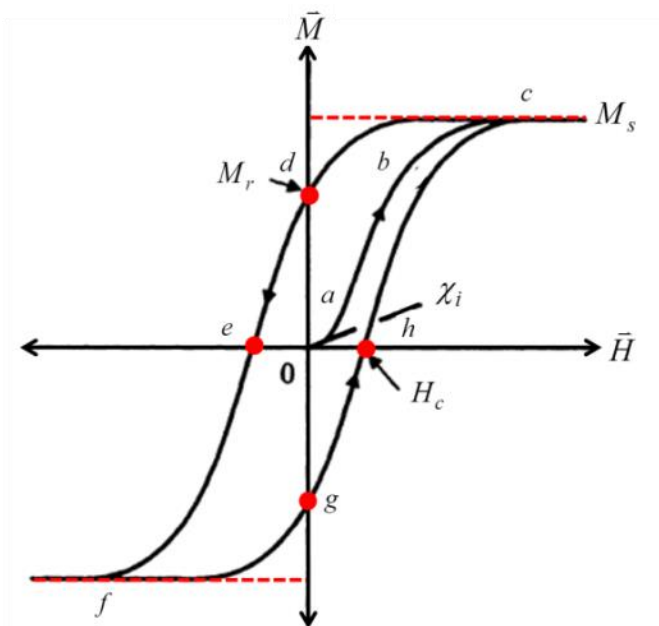
สภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์ริ เป็นสภาวะแม่เหล็กที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมมีการจัดเรียงตัวในลักษณะทิศทางตรงข้ามกันและมีขนาดไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.10 จึงส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมไม่สามารถหักล้างกันหมด จึงทำให้ยังคงมีค่าแมกนีไทเซชันสุทธิในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จึงสามารถแสดงสภาวะความเป็นแม่เหล็กได้ โดยจะเรียกวัสดุเหล่านี้ว่า เฟอร์ไรท์ (ferrites) เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) โดยส่วนใหญ่จะพบในวัสดุเซรามิกซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กสำหรับสารแม่เหล็กเฟอร์ริ

2.1.5 ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop)

การศึกษาความเป็นแม่เหล็กของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกนั้น เราจะศึกษาในเรื่องการตอบสนองของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกต่อสนามแม่เหล็กภายนอก โดยเราจะพล็อตขนาดของแมกนีไทเซชัน (M) หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอก (H) ที่เรียกว่าฮิสเทอรีซิสลูป โดยทั่วไปแล้วฮิสเทอรีซิสลูปจะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.11 และในกรณีนี้สนามแม่เหล็กจะถูกป้อนให้กับวัสดุแม่เหล็กตัวอย่างและทำการพล็อตการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชัน

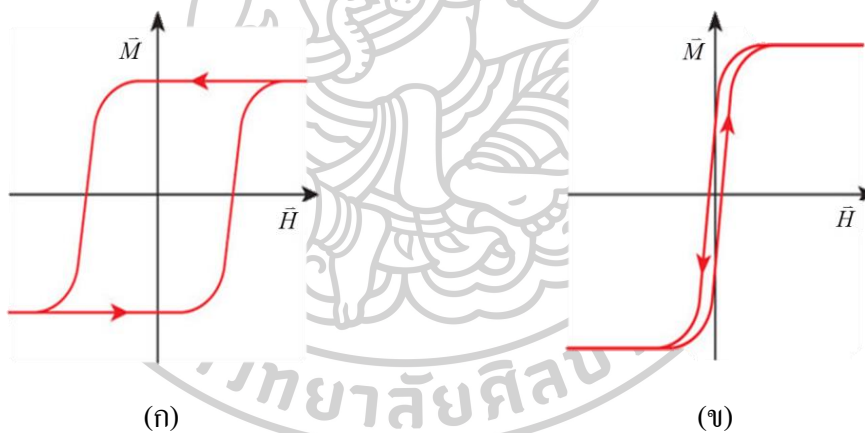


รูปที่ 2.11 ฮิสเทอรีซิสลูปของเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อแกนนอนคือสนามแม่เหล็กภายนอก และแกนตั้งคือแมกนีไทเซชัน

จากกราฟในรูปที่ 2.11 จะเริ่มต้นที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ($\bar{H} = 0$) หรือยังไม่ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก และแมกนีไทเซชันจะเท่ากับศูนย์ ($\bar{M} = 0$) แล้วป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในทิศทาง $+\bar{H}$ เส้นทางของแมกนีไทเซชันในช่วงแรกคือเส้นโค้ง $0-a-b-c$ โดยที่ความชันของกราฟในช่วงเริ่มต้นจะเรียกว่า ความไวต่อการตอบสนองเริ่มต้น (χ_i) ถ้าเราจะพล็อต \bar{B} เทียบกับ \bar{H} แทนกราฟ \bar{M} เทียบกับ \bar{H} ความชันของกราฟในช่วงเริ่มต้นจะเรียกว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กเริ่มต้น (μ_i) เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแมกนีไทเซชันเข้าสู่สมดุลหรือถึงจุดอิ่มตัวที่จุด c ณ จุดนี้แมกนีไทเซชันจะมีค่าสูงสุดและมีทิศเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก เรียกจุดนี้ว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_s) จากนั้นเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกลงจนมีค่าเป็นศูนย์ เส้นทางของแมกนีไทเซชันจะไม่กลับมาในแนวเส้นเดิมแต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นกราฟ c ถึง d และสังเกตเห็นว่าวัสดุแม่เหล็กยังคงแสดงความเป็นแม่เหล็กอยู่แม้ว่าไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแล้วก็ตาม ดังนั้นค่าของแมกนีไทเซชันที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์นี้ จะเรียกว่า แมกนีไทเซชันคงค้าง (remanent magnetization) เขียนแทนด้วย M_r ต่อไปค่าของแมกนีไทเซชันของวัสดุจะลดลงเป็นศูนย์หรือไม่มีสถานะแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กเดิมที่มีขนาดเท่ากับ $-H_c$ ที่จุด e ซึ่งเรียกว่า ค่าโคเออร์ซิวิตี (coercivity) หรือค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก และถ้าป้อนสนามแม่เหล็กติดลบมากขึ้นจะทำให้ค่าของแมกนีไทเซชันเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

ตามกราฟ $e-f$ จนกระทั่งถึงจุดอิมตัวอีกครั้งที่จุด f แต่จะมีทิศตรงกันข้ามสามารถเขียนแทนด้วย $-M_s$ ต่อมาจากจุด f จะป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามจากเดิมจนถึงจุดอิมตัวอีกครั้งทำให้ได้วงรอบที่สมบูรณ์ 1 รอบที่เรียกว่า ฮิสเทอรีซิสลูป นอกจากนี้ยังมีค่าค่าโคเอซิวิตีในเชิงบวกที่จุด h

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกนี้จะถูกแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic) และวัสดุแม่เหล็กอย่างแข็ง (hard magnetic) แสดงดังรูปที่ 2.12 จากกราฟฮิสเทอรีซิสลูปในรูปที่ 2.12 (ก) จะเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างแข็ง โดยมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเริ่มต้นที่ต่ำหรือมีค่าความไวในการตอบสนองน้อยมีค่า H_c สูง และสูญเสียความเป็นแม่เหล็กได้ยาก วัสดุแม่เหล็กอย่างแข็งนี้อาจจะถูกนำไปใช้สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นบันทึกข้อมูลหรือนำไปประยุกต์ใช้เป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนวัสดุแม่เหล็กอ่อนจะแสดงค่าความซึมซาบแม่เหล็กเริ่มต้นสูงหรือความไวในการตอบสนองสูงมีค่า H_c ค่า M_r ต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) จากกราฟจะเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับวัสดุแม่เหล็กอ่อน ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับหม้อแปลงหรือประยุกต์ใช้กับหัวเขียนแม่เหล็ก



รูปที่ 2.12 ฮิสเทอรีซิสลูปของเฟอร์โรแมกเนติก โดย (ก) สำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างแข็ง และ (ข) สำหรับวัสดุแม่เหล็กอย่างอ่อน

2.1.6 แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก (anisotropy of the magnetic material)

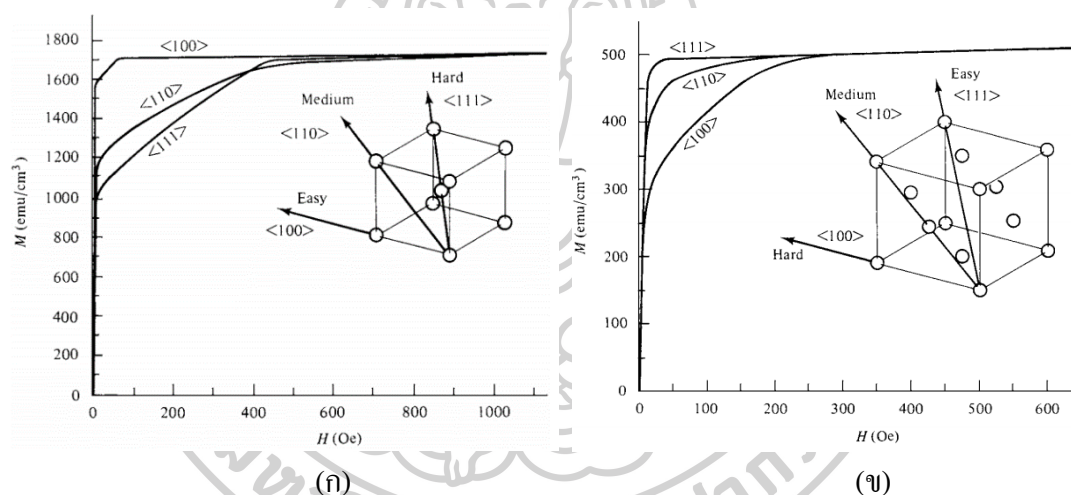
เมื่อคุณสมบัติของแม่เหล็กแสดงคุณลักษณะตามทิศทางผลึกซึ่งสามารถวัดได้ แสดงว่าวัสดุที่กล่าวถึงมีแอนไอโซโทรปี (anisotropy) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมกนีไทเซชันของวัสดุจะแสดงคุณลักษณะของทิศทางที่แน่นอนสำหรับบางกรณี นอกจากนี้แอนไอโซโทรปียังมีอยู่หลายประเภท อาทิเช่น แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับโครงสร้างผลึก (crystal anisotropy) และแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรง (shape anisotropy) เป็นต้น โดยอธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.1.6.1 แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับโครงสร้างผลึก

แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับโครงสร้างผลึกหรือเรียกอีกอย่างว่า แมกนีโตคริสตัลไลน์แอนไอโซโทรปี (magnetocrystalline anisotropy) โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามโครงสร้างผลึก คือ แอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (anisotropy in cubic crystal) และแอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (anisotropy in hexagonal crystal)

2.1.6.1.1 แอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กที่เป็นผลึกจะแตกต่างกันก็ขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก (crystallographic direction) ที่โมเมนต์แม่เหล็กจะจัดเรียงตัวในทิศทางนั้น รูปที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชัน ซึ่งบ่งบอกความเป็นแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนเข้าไปในวัสดุแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับผลึกเดี่ยว (single crystal) ของเหล็ก (ก) และ นิกเกิล (ข)

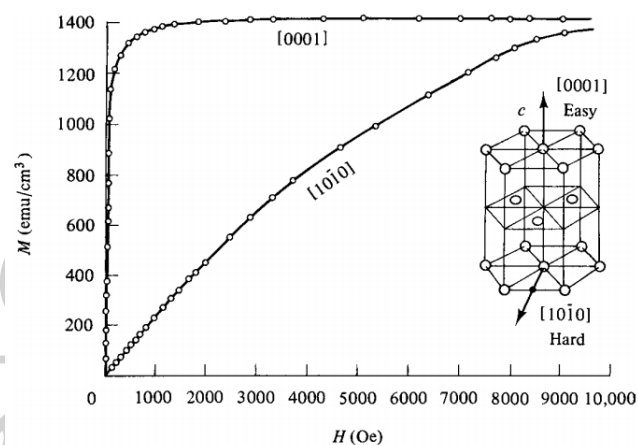
ที่มา : B. D. Cullity, and C. D. Graham. (2009). INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS. 2th ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

จากรูปที่ 2.13 (ก) สำหรับการเกิดสภาวะแม่เหล็กของเหล็ก (Fe) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ body centered cubic (BCC) ซึ่งเราจะสังเกตเห็นว่าแมกนีไทเซชันจะจัดเรียงตัวได้ง่ายที่สุดในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ กล่าวคือเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปในวัสดุแม่เหล็กเล็กน้อยก็สามารถทำให้แมกนีไทเซชันอิ่มตัวได้เร็วเมื่อเทียบกับทิศทาง $\langle 111 \rangle$ หรือเรียกทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ว่าทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กหรือ easy axis และเรียกทิศทาง $\langle 111 \rangle$ ว่าทิศทางที่ยากต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กหรือ hard axis สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบ face centered cubic (FCC) โดยเรา

จะยกตัวอย่างนิเกิล (Ni) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) ซึ่งมีทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กคือ $\langle 111 \rangle$ และทิศทางที่ยากต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กคือ $\langle 100 \rangle$ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเหล็กกับนิเกิลแล้ว เราจะเห็นว่าเหล็กซึ่งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC จะมีทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กตรงข้ามกันกับนิเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC [13]

2.1.6.1.2 แอนไอโซโทรปีในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

ในรูปที่ 2.14 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับผลึกเดี่ยวของโคบอลต์ (Co) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal close-packed (HCP) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของโคบอลต์จะมีทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กคือ $[10\bar{1}0]$ (ตามแนวแกน c) แต่ทิศทางที่ยากต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็กคือ $[10\bar{1}0]$ ซึ่งอยู่ในระนาบฐานและทำมุม 90° กับแกนง่าย [13]



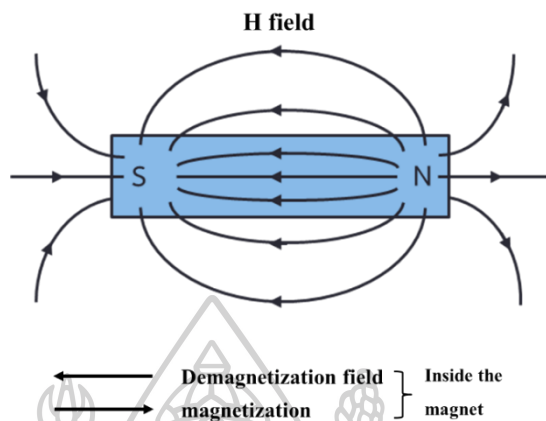
รูปที่ 2.14 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกสำหรับผลึกเดี่ยวของโคบอลต์

ที่มา : B. D. Cullity, and C. D. Graham. (2009). INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS. 2th ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

2.1.6.2 แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรง

แอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงเกิดขึ้นจากรูปทรงของวัสดุแม่เหล็กและมีความเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างขั้ว (dipole interactions) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 หนึ่งในลักษณะสำคัญของวัสดุแม่เหล็กคือ มันจะมีสนามแม่เหล็กทั้งภายนอกและภายในของแท่งแม่เหล็กตัวอย่าง โดยภายในแท่งแม่เหล็กจะสร้างสนามแม่เหล็กเนื่องจากขั้วแม่เหล็กที่พื้นผิวของวัสดุเรียกว่า สนามแม่เหล็กกลับด้าน

สภาพแม่เหล็กหรือสนามดีแมกนีไทเซชัน (demagnetizing field, H_{demag}) ซึ่งมีทิศตรงข้ามกับแมกนีไทเซชัน



รูปที่ 2.15 เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก

เมื่อพิจารณาตัวอย่างวัสดุพหุผลึก (polycrystalline material) แต่ไม่มีคริสตัลไลน์ แอนไอโซโทรปี (crystalline anisotropy) หรือไม่มีแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับโครงสร้างผลึก ถ้าหากวัสดุแม่เหล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมแมกนีไทเซชันภายในวัสดุมันจะพยายามจัดเรียงตัวไปตามขอบของวัสดุ โดยมีทิศทางใด ๆ [14] ดังในรูปที่ 2.16 (ก) แต่ถ้าวัสดุแม่เหล็กมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมแมกนีไทเซชันมันภายในวัสดุมันจะพยายามจัดเรียงตัวไปตามแกนยาวมากกว่าแกนสั้นดังในรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กเมื่อวัสดุแม่เหล็กเป็น (ก) ทรงกลม และ (ข) ทรงสี่เหลี่ยม
ที่มา : A. Hubert, and R. Schäfer. (2009). Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures. 3th ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

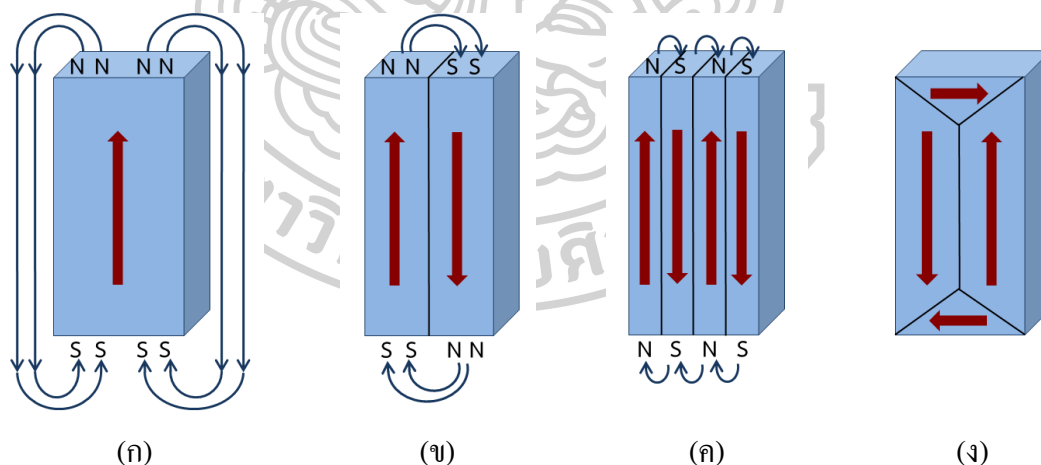
2.1.7 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain and magnetic domain walls)

วัสดุใด ๆ ที่มีสถานะแม่เหล็กเฟอร์โร จะประกอบด้วยบริเวณที่มีปริมาตรขนาดเล็ก โดยมีการวางแนวของโมเมนต์แม่เหล็กในทิศเดียวกันทั้งหมด บริเวณดังกล่าวเรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก โดเมนที่อยู่ติดกันถูกแยกจากกันด้วยรอยต่อที่เรียกว่า ผนังโดเมน บริเวณผนังโดเมนนี้แมกนีไทเซชันจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงทิศทาง

2.1.7.1 ทฤษฎีโดเมนแม่เหล็ก

ทฤษฎีโดเมนแม่เหล็ก สำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีข้อเท็จจริงที่ว่า วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะแสดงแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นเองในสถานะลบล้างสภาพแม่เหล็ก (demagnetized state) และภายในโดเมนจะมีโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจำนวนมากจัดเรียงตัวขนานกันอยู่ นอกจากนี้ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแมกนีไทเซชันจะมีการอึดตัวและอยู่ในแนวแกนง่ายของผลึก (easy axis)

การเกิดโดเมนแม่เหล็กนี้มีผลเนื่องจากการลดพลังงานรวมของระบบ (total energy) โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นจากการแข่งขันระหว่างการลดพลังงานแมกนีโตสแตติก (magnetostatic energy) และพลังงานผนังโดเมน (domain wall energy) หรือการสร้างผนังโดเมนไปพร้อมๆ กันดังแสดงในรูปที่ 2.17



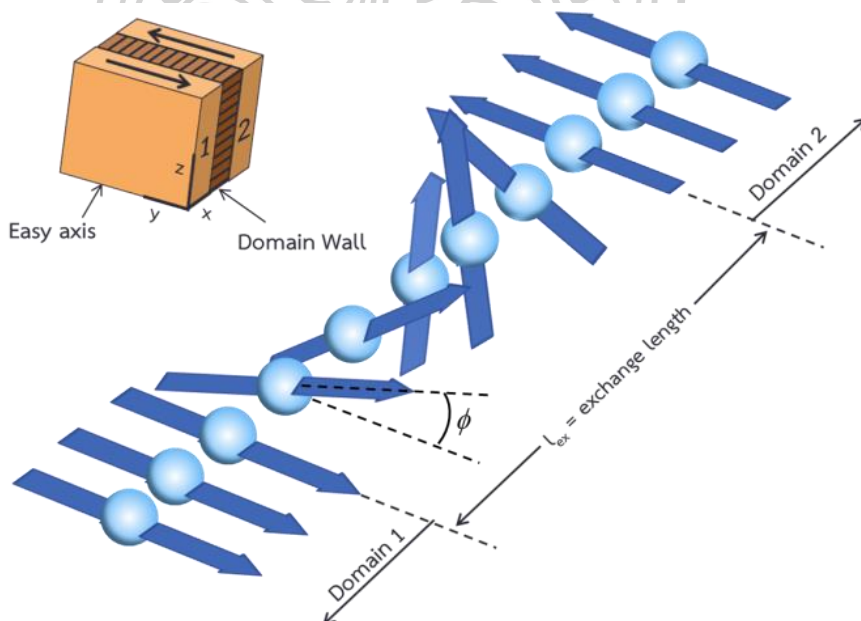
รูปที่ 2.17 การลดพลังงานแมกนีโตสแตติกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เมื่อโดเมนแม่เหล็กมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น (ก) 1 โดเมน (ข) 2 โดเมน (ค) 4 โดเมน และ (ง) โดเมนปิด ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.17 เริ่มด้วยวัสดุที่มีแมกนีไทเซชันสม่ำเสมอ ขั้วแม่เหล็กที่พื้นผิวของวัสดุจะสร้างสนามดีแมกนีไทเซชันภายในให้มีทิศตรงข้ามกับทิศของแมกนีไทเซชัน ในกรณีที่วัสดุมีโครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กแค่เพียง 1 โดเมน จะทำให้มีพลังงานแมกนีโตสแตติกสูงที่สุดดังแสดงใน

รูปที่ 2.17 (ก) พลังงานนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนโดเมนแม่เหล็กจากการแบ่งโดเมนออกเป็น 2 โดเมนหรือเป็นจำนวนคู่ ดังนั้นยิ่งโดเมนแม่เหล็กมีจำนวนมากก็ยิ่งลดค่าพลังงานแมกนีโตสแตติกของวัสดุลงดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) และรูปที่ 2.17 (ค) ในขณะที่แมกนีไทเซชันระหว่าง 2 โดเมนที่อยู่ติดกันจะมีทิศตรงกันข้ามกัน โดยในสองกรณีนี้จะมีพลังงานเกี่ยวกับผนังระหว่างโดเมนที่มีแมกนีไทเซชันเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง (ที่เรียกว่า ผนังโดเมน) และมีอีกหนึ่งกลไกที่สามารถลดค่าพลังงานแมกนีโตสแตติกคือการสร้างโดเมนแบบโดเมนปิด (closure domain) แสดงดังในรูปที่ 2.17 (ง) ในกรณีโดเมนปิดนี้แมกนีไทเซชันมักจะขนานกับพื้นผิวของวัสดุ จึงทำให้ไม่มีประจุที่พื้นผิว ไม่มีสนามดีแมกนีไทเซชันและไม่มีพลังงานแมกนีโตสแตติก ในการสร้างโดเมนในลักษณะนี้ยังเป็นที่ยึด คือ Landau ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างโดยทั่วไปของวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic materials) [15]

2.1.7.2 โครงสร้างผนังโดเมนแม่เหล็ก

ผนังโดเมนเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างบริเวณที่มีแมกนีไทเซชันเกิดขึ้นในทิศทางที่แตกต่างกัน หรือภายในผนังโดเมนแมกนีไทเซชันจะเปลี่ยนทิศทางจากแกนง่ายของผลึกไปยังทิศทางอื่น ๆ ซึ่งเราอาจจินตนาการว่าการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และเกิดจากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมถัดไปดังแสดงในรูปที่ 2.18 เมื่อมุมคือ ϕ มุมระหว่างโมเมนต์ของอะตอมที่อยู่ติดกัน



รูปที่ 2.18 โครงสร้างภายในของผนังโดเมนแม่เหล็ก

แก้ไขจาก : B. D. Cullity, and C. D. Graham. (2009). INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS. 2th ed. U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

ในรูปที่ 2.18 แถวของอะตอมจะขนานไปในแนวแกน x ผนังโดเมนอยู่ในระนาบ yz และแกนง่ายอยู่ในแนวแกน y โดยที่ความกว้างของผนังโดเมนนี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานอยู่ 2 ชนิด คือ พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy) เป็นพลังงานจากการหมุนโมเมนต์ของอะตอมออกจากทิศทางแกนง่ายของผลึก และพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy) เป็นพลังงานที่เกิดจากมุมที่แตกต่างกันระหว่างโมเมนต์ของอะตอมที่อยู่ติดกัน และค่าความกว้างของผนังโดเมนได้ดังสมการที่ (2.10) [16]

$$l_{ex} = \sqrt{\frac{A}{K_u}} \quad (2.10)$$

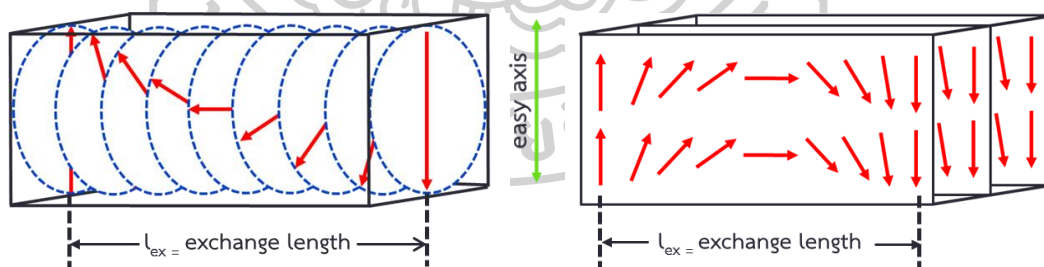
เมื่อ l_{ex} คือ ความกว้างของผนังโดเมน หรือความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (exchange length) A คือ ค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ (exchange constant) และ K_u คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant)

2.1.7.3 ผนังโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain walls)

ผนังโดเมนสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมภายในผนังโดเมน ดังนี้

2.1.7.3.1 ผนังโดเมนแบบบลอชและผนังโดเมนแบบนีล

ผนังโดเมนแบบบลอช (bloch wall) และผนังโดเมนแบบนีล (neel wall) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 [14]



(ก)

(ข)

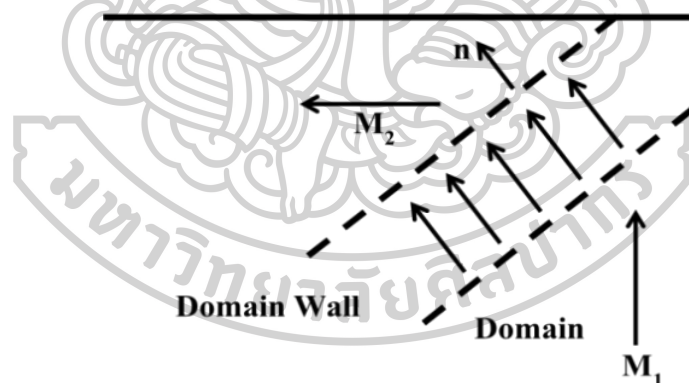
รูปที่ 2.19 การหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมภายในผนังโดเมน โดย (ก) ผนังโดเมนแบบบลอช และ (ข) ผนังโดเมนแบบนีล

แก้ไขจาก : A. Hubert, and R. Schäfer. (2009). *Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures*. 3th ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ในรูปที่ 2.19 (ก) แสดงผนังโดเมนแบบบล็อช โดยมักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความหนาโมเมนต์ของอะตอมภายในผนังโดเมนจะพยายามหมุนออกจากทิศทางแกนง่ายของผลึก ดังนั้นพลังงานแอนไอโซโทรปีของผลึกภายในผนังโดเมนจะสูงกว่าโดเมนที่อยู่ติดกัน ในขณะที่พลังงานเอ็กซ์เชนจ์พยายามที่จะทำให้ผนังโดเมนกว้างที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ขนาดมุม ϕ ระหว่างโมเมนต์ของอะตอมที่อยู่ติดกันมีขนาดเล็กลงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนพลังงานแอนไอโซโทรปีพยายามที่จะทำให้ผนังโดเมนบาง ๆ เพื่อที่จะลดจำนวนโมเมนต์ของอะตอมที่เข้าไปในทิศทางที่ไม่ใช่แนวแกนง่าย แต่สำหรับวัสดุที่บาง ๆ จะเกิดผนังโดเมนแบบนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข) โดยที่โมเมนต์ของอะตอมภายในผนังโดเมนจะหมุนอยู่ในแนวระนาบของวัสดุเพื่อลดพลังงานแมกนีโตสแตติก

2.1.7.3.2 ผนังโดเมน 90° และ 180° และโครงสร้าง cross-tie [17]

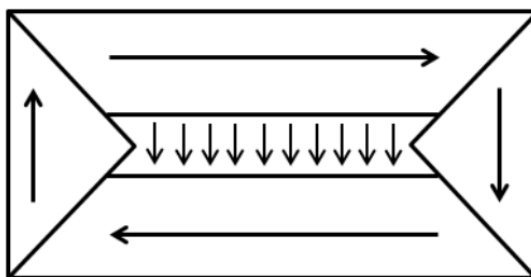
ลักษณะการหมุนของผนังโดเมนมีอยู่ 2 แบบ คือ ผนังโดเมน 90° และผนังโดเมน 180° ซึ่งเกิดจากความสอดคล้องของการสร้างผนังโดเมนที่เกิดขึ้นในผนังโดเมนแบบบล็อชและผนังโดเมนแบบนี้ล สำหรับผนังโดเมน 90° จะถูกแบ่งออกเป็น 2 โดเมนที่มีแมกนีไทเซชันตั้งฉากซึ่งกันและกันดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยแมกนีไทเซชันที่อยู่กึ่งกลางจะทำมุม 45° ระหว่างโดเมนทั้งสองและถูกสร้างขึ้นในผนังโดเมน 90°



รูปที่ 2.20 แผนภาพของผนังโดเมน 90°

ที่มา : Jin Seock Ma. (2011). “Investigation of magnetic domain configuration and vortex-antivortex creation and annihilation on CoFeB patterns.” Master of Science, University of Maryland, College Park.

ในกรณีของผนังโดเมน 180° แมกนีไทเซชันของโดเมนที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.21 ผนังโดเมน 180° มีบทบาทในการแบ่งโดเมนและผนังโดเมนที่มีแมกนีไทเซชันอยู่กึ่งกลางจะตั้งฉากกับโดเมนแต่ละโดเมน

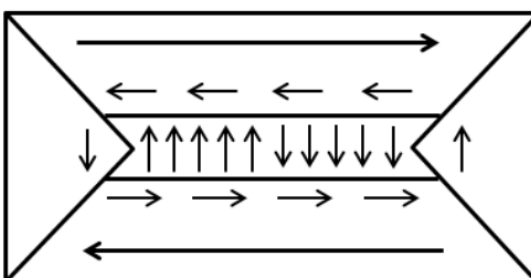


รูปที่ 2.21 แผนภาพของผนังโดเมน 180°

ที่มา : Jin Seock Ma. (2011). “Investigation of magnetic domain configuration and vortex-antivortex creation and annihilation on CoFeB patterns.” Master of Science, University of Maryland, College Park.

ส่วนผนังโดเมนแบบ cross-tie หรือ cross-tie wall เราจะสามารถสังเกตได้ในฟิล์มที่มีลักษณะค่อนข้างหนา ดังนั้นจึงเป็นเสมือน periodic microstructure ของผนังโดเมนแบบบลอซและผนังโดเมนแบบนีส และในกรณีของผนังโดเมน 180° ที่ยาวจะมีพลังงานเอ็กเซนจ์สูงมาก

ดังนั้นพลังงานเอ็กเซนจ์ที่ต่ำกว่าจะพบได้จากโครงสร้างผนังโดเมนที่เรียกว่าผนังโดเมนแบบ cross-tie ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งจะถูกสร้างขึ้นในผนังโดเมน 180° ขณะที่แมกนีไทเซชันทุกตัวในผนังโดเมน 180° พลิกกลับอย่างรวดเร็วแล้วทำให้กลุ่มของแมกนีไทเซชันหันมาอยู่ในทิศเดียวกัน และการเปลี่ยนแปลงทิศทางมักจะเปลี่ยนด้วยมุม 180° นอกจากนี้ โครงสร้าง vortex และ anti-vortex จะสร้างขึ้นที่จุดในทิศทางของแมกนีไทเซชันของผนังโดเมน 180° ย้อนกลับเนื่องจากการสร้างวงปิดของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นพลังงานแมกนีโตสแตติกจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะวงปิดของแมกนีไทเซชันจะทำให้เกิดโครงสร้าง vortex และ anti-vortex

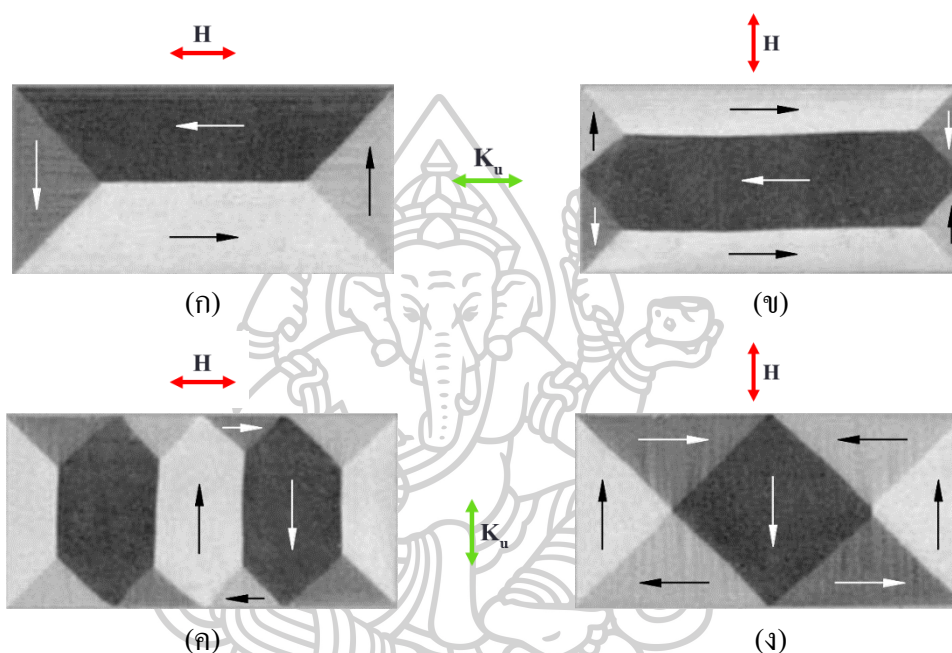


รูปที่ 2.22 แผนภาพของผนังโดเมน cross-tie

ที่มา : Jin Seock Ma. (2011). “Investigation of magnetic domain configuration and vortex-antivortex creation and annihilation on CoFeB patterns.” Master of Science, University of Maryland, College Park.

2.1.7.4 รูปแบบโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กในฟิล์มบาง

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเล็ก ๆ ของโครงสร้างโดเมนแม่เหล็ก มีเหตุผลอยู่สองประการ คือ 1) การเคลื่อนไหวของแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบขนาดเล็ก สามารถทำความเข้าใจได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ เพราะว่าสามารถสังเกตเห็นรูปแบบโดเมนที่สมบูรณ์ได้ชัดเจนกว่า และ 2) ในการประยุกต์ใช้งานสำหรับตัวอย่างที่มีรูปทรงต่างๆ จะมีการใช้บ่อยกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24



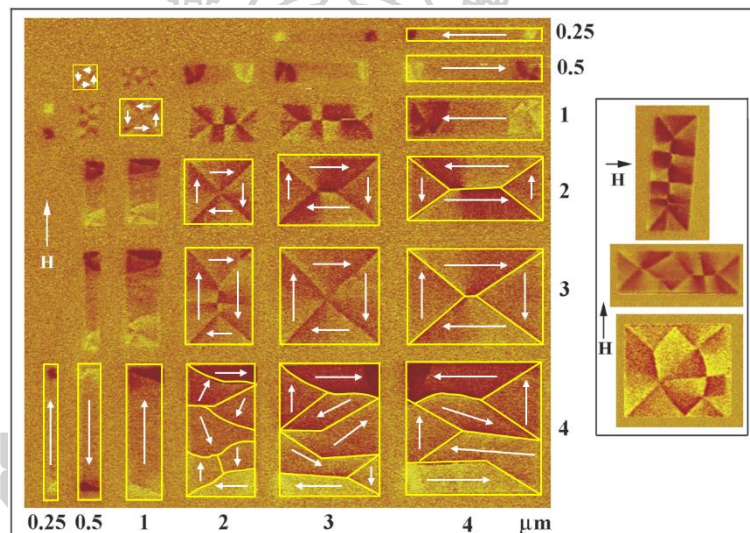
รูปที่ 2.23 โดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง เมื่อกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกนนอน โดย (ก) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกนนอน (ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกนตั้ง และเมื่อกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกนตั้ง โดย (ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกนนอน (ง) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในแนวแกนตั้ง

ที่มา : A. Hubert, and R. Schäfer. (2009). *Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures*. 3th ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

และการเคลื่อนไหวของแมกนีไทเซชันในองค์ประกอบฟิล์ม เริ่มแรกจะถูกกำหนดด้วยรูปทรงของมัน นอกจากนี้โครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะแตกต่างกันยังขึ้นอยู่กับทิศของ easy axis (K_u) และทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก (H) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 [14] โดยในรูปที่ 2.23 แสดงการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันบนองค์ประกอบของฟิล์มบางในสถานะแม่เหล็กคงค้าง (ฟิล์มบางเป็น โลหะผสม $Ni_{81}Fe_{19}$) เมื่อฟิล์มบางมีทิศทางของ easy axis และทิศทางการป้อนของสนามแม่เหล็กภายนอกแตกต่างกัน

โดยปกติแล้วในสภาวะสมดุลแมกนีไทเซชันมันพยายามที่จะหันหรือจัดเรียงตัวไปอยู่ในแนวเดียวกันกับ easy axis อยู่แล้ว แต่ว่าถ้าทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในคนละทิศทาง การเกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างก็จะไม่เหมือนเดิม แต่ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนกันและค่าของพลังงานอาจจะไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าความเป็นแม่เหล็กคงค้าง (M_r) อาจไม่เท่ากันอีกด้วย

นอกจากนี้ Gomez และคณะ [18, 19] ยังได้ทำการทดลองการกำหนดโครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กที่ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดวัสดุตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.24 ตัวอย่างถูกจัดเตรียมโดยวิธี electron beam lithography และ lifted-off และวัสดุตัวอย่างเป็นโลหะผสม $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ มีความหนา 26 nm ทำการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางแบบไอระเหยด้วยความร้อน (thermal evaporation)



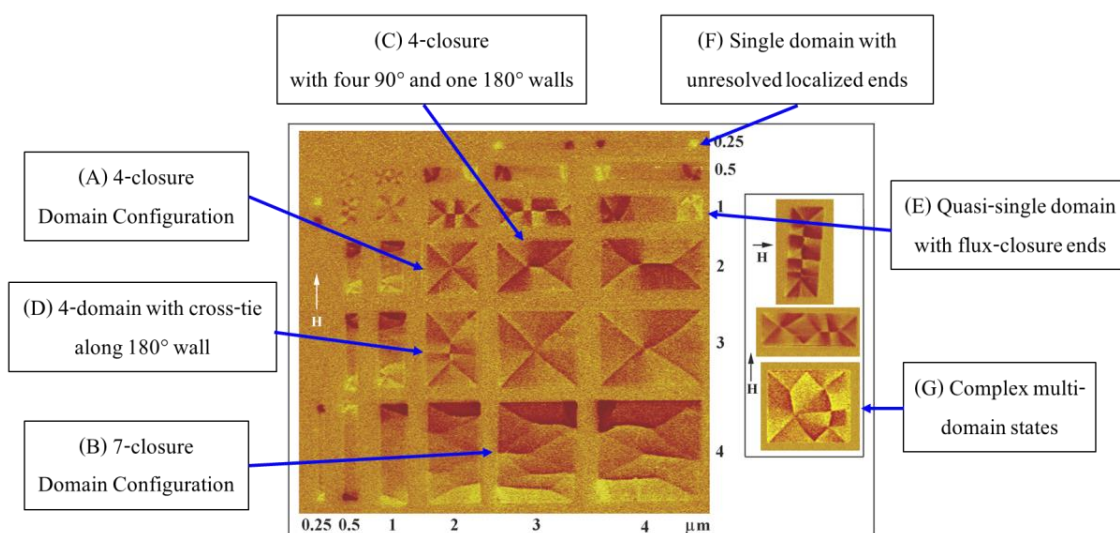
รูปที่ 2.24 โครงสร้างโดเมนแม่เหล็กของโลหะผสม $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ เมื่อมีขนาดของฟิล์มแม่เหล็กแตกต่างกัน

แก้ไขจาก : R. D. Gomez, et al. (1999) "Domain configurations of nanostructured Permalloy elements." *Journal of Applied Physics* 85, 8 (April 15): 6163-6165.

จากรูปที่ 2.24 แสดงรูปแบบโดเมนแม่เหล็กของฟิล์มบางแม่เหล็ก $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ เมื่อมีขนาดของฟิล์มแตกต่างกัน โดยเราจะสังเกตเห็นว่าถ้าขนาดของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้โครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กเปลี่ยนตามไปด้วย กล่าวคือเมื่อขนาดของฟิล์มด้านใดด้านหนึ่งลดลงจนฟิล์มมีรูปร่างลักษณะเรียวยาว ส่งผลทำให้เกิดเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (single magnetic domain) ซึ่งเป็นผลมาจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงของฟิล์มแม่เหล็กแบบอ่อนดั่งที่ได้กล่าวไว้แล้ว ฟิล์มบางแม่เหล็ก $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ นี้มีค่าความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (l_{ex}) เท่ากับ 289 nm เมื่อค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์

(exchange constant, A) เท่ากับ 1×10^{-11} J/m และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_u) เท่ากับ 119.4 J/m³

และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขององค์ประกอบฟิล์มบางแบบสี่เหลี่ยมนี้ ทำให้เกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างที่มีโครงสร้างต่างกันเพียงไม่กี่ประเภทและไม่ซ้ำกันดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ชนิดของโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง

แก้ไขจาก : R. D. Gomez, et al. (1999) "Domain configurations of nanostructured Permalloy elements." *Journal of Applied Physics* 85, 8 (April 15): 6163-6165.

เมื่อตำแหน่ง (A) โดเมนแม่เหล็ก 4 โดเมนในรูปแบบโดเมนปิดที่มีผนังโดเมน 90°

(B) โดเมนแม่เหล็ก 7 โดเมนในรูปแบบโดเมนปิด

(C) โดเมนแม่เหล็ก 4 โดเมนในรูปแบบโดเมนปิดที่มีผนังโดเมน 90° และ 180°

(D) โดเมนแม่เหล็ก 4 โดเมน ที่มีรูปแบบผนังโดเมนแบบ cross-tie และ bloch พร้อมด้วยผนังโดเมน 180°

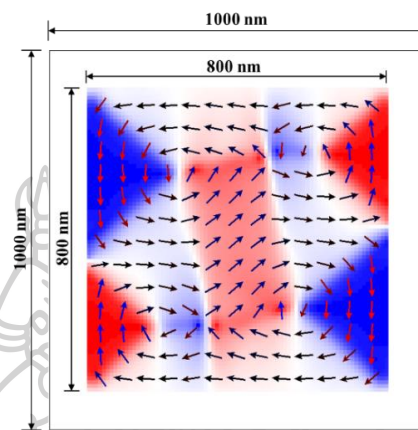
(E) โดเมนแม่เหล็กกึ่งโดเมนเดี่ยว (quasi-single domain) ที่มีฟลักซ์ปิด (flux closure) บริเวณส่วนปลายของฟิล์มบาง

(F) โดเมนแม่เหล็กโดเมนเดี่ยว (single domain) ซึ่งมีโครงสร้างบริเวณส่วนปลายที่ไม่แน่นอน

(G) โดเมนแม่เหล็กหลายโดเมน (multi domain) ในสถานะคงค้างที่มีความซับซ้อน

2.1.7.5 การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กเบื้องต้น

จากทฤษฎีข้างต้น ได้บอกแล้วว่า การเกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างจะขึ้นอยู่กับทิศของ easy axis และทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก รวมถึงขนาดของวัสดุตัวอย่าง (คุณสมบัติของแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นอยู่กับรูปทรง) ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กเบื้องต้น โดยสร้างแบบจำลองไมโครแมกเนติกและทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองเพื่อดูลักษณะการเกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง ดังต่อไปนี้



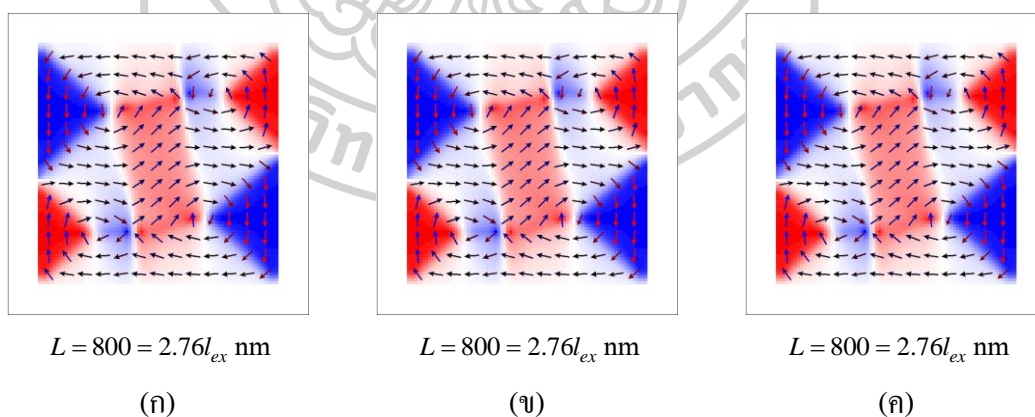
$$L = 800 = 2.76l_{ex} \text{ nm}$$

รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลอง (ความยาว L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (l_{ex}) สำหรับแบบจำลองแบบง่าย

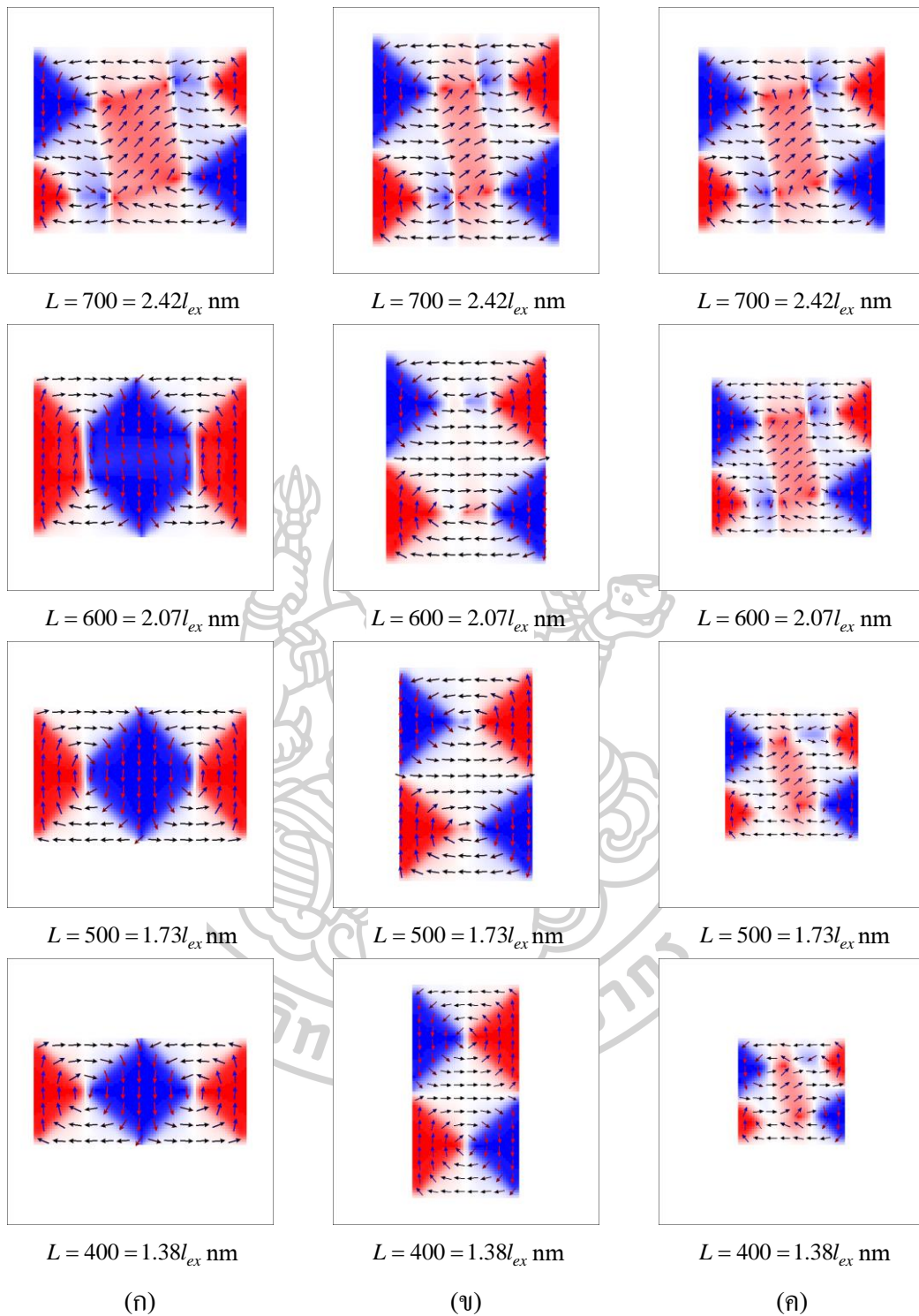
เริ่มแรกสร้างภาพจำลองโดยกำหนดให้มีพื้นที่ทั้งหมดขนาด $1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm}$ และพื้นที่ที่ใช้ศึกษามีขนาด $800 \text{ nm} \times 800 \text{ nm}$ จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยกำหนดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ $1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$ ตามลำดับ แบบจำลองจะถูกแบ่งเป็น 80,000 เซลล์ แต่ละเซลล์มีความยาวด้านเท่ากับ 10 nm และใช้วัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสม $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ [20] ซึ่งมีค่าคงที่เอ็กเซนจ์ (A) เท่ากับ $1 \times 10^{-11} \text{ J/m}$ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u) เท่ากับ 119.4 J/m^3 และค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) เท่ากับ $796 \times 10^3 \text{ A/m}$ โดยมีค่า l_{ex} เท่ากับ 289 nm และสามารถคำนวณหาความกว้างของผนังโดเมนหรือความยาวเอ็กซ์เซนจ์ (l_{ex}) ได้จากสมการที่ (2.10) นอกจากนี้ในแบบจำลองยังกำหนดให้ทิศของ easy axis และทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกอยู่ในแนวแกนนอนทั้งสอง และยังกำหนดให้แมกนีไทเซชันเริ่มต้นอยู่ในแนวแกนตั้ง ได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งสังเกตเห็นว่าโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กหลาย ๆ โดเมน (multi domain) และมีความซับซ้อนคล้าย ๆ กับการเกิดโดเมนแม่เหล็กในฟิล์มบาง เมื่อรูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลอง (ความยาว L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (l_{ex}) สำหรับโลหะผสม $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลอง โดยทำการลดขนาดของแบบจำลองทีละด้านด้วยการลดขนาดเฉพาะด้านยาวและลดขนาดเฉพาะด้านกว้างดังในรูปที่ 2.27 (ก) และรูปที่ 2.27 (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการลดขนาดของแบบจำลองทั้งด้านกว้างและด้านยาวในอัตราส่วนที่เท่ากันดังในรูปที่ 2.27 (ค)

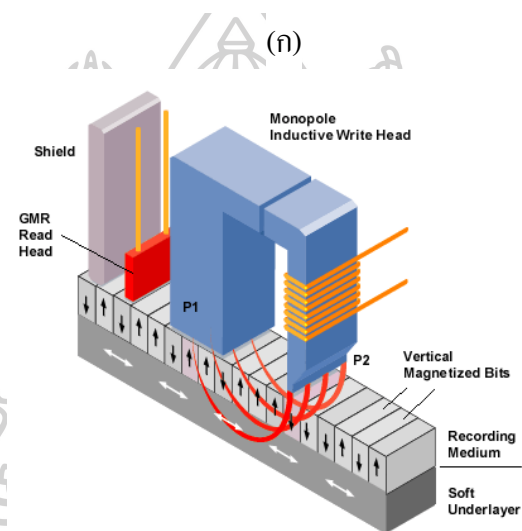
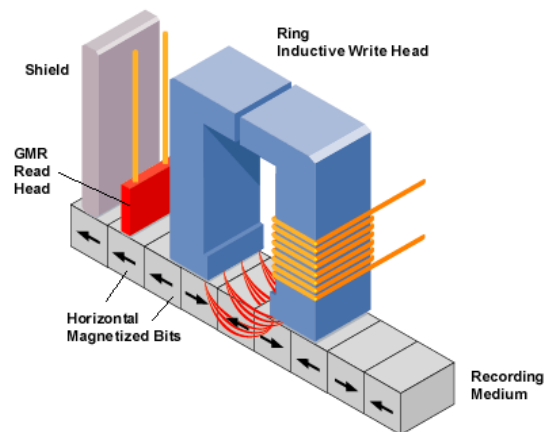
ผลการจำลองในรูปที่ 2.27 พบว่าเมื่อทำการลดขนาดของแบบจำลองรูปสี่เหลี่ยมในแต่ละกรณี ส่งผลทำให้โดเมนแม่เหล็กพยายามจัดเรียงตัวใหม่แต่ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนเดิม โดยเราสามารถสังเกตเห็นว่าเมื่อความยาวลดลงจนมีขนาดพอเหมาะหรือเป็นจำนวนเท่าของความยาวความยาวเอ็กเซนจ์ ส่งผลทำให้เกิดผนังโดเมนแบบปิดที่สมบูรณ์ขึ้น ในกรณีการลดขนาดเฉพาะด้านยาวและเฉพาะด้านกว้างดังในรูปที่ 2.27 (ก) และ 2.27 (ข) จะเกิดขึ้นเมื่อความยาว $L = 600 = 2.07l_{ex}$ nm และ $L = 500 = 1.73l_{ex}$ nm ตามลำดับ ส่วนในกรณีการลดขนาดแบบจำลองทั้งสองด้านในอัตราส่วนที่เท่ากันดังในรูปที่ 2.27 (ค) จะเกิดผนังโดเมนแบบปิดที่สมบูรณ์ขึ้นเมื่อความยาว $L = 300 = 1.14l_{ex}$ nm จากนั้นทำการลดขนาดของแบบจำลองจนกระทั่งความยาวลดลงถึงจุด ๆ หนึ่ง โดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโดเมนแม่เหล็กแบบปิดกลายเป็นโดเมนเดี่ยว เมื่อแบบจำลองมีความยาว $L = 200 = 0.69l_{ex}$ nm และ $L = 100 = 0.45l_{ex}$ nm สำหรับกรณีการลดเฉพาะด้านยาวและเฉพาะด้านกว้างตามลำดับ และในกรณีที่ลดขนาดของแบบจำลองทั้งด้านกว้างและด้านยาวในอัตราส่วนที่เท่ากัน หากความยาวลดลงจนมีขนาดพอเหมาะจะเกิดโดเมนแม่เหล็ก 4 โดเมนในรูปแบบโดเมนปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ค) ที่ความยาว $L = 300 = 1.04l_{ex}$ nm



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลอง (ความยาว L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (l_{ex}) เมื่อ (ก) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองเฉพาะด้านยาว (ข) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองเฉพาะด้านกว้าง และ (ค) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองทั้งด้านกว้างและด้านยาวในอัตราส่วนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.27 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแบบจำลอง (ความยาว L) กับความยาวเอ็กซิตชัน (l_{ex}) เมื่อ (ก) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองเฉพาะด้านยาว (ข) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองเฉพาะด้านกว้าง และ (ค) เปลี่ยนแปลงขนาดของแบบจำลองทั้งด้านกว้างและด้านยาว ในอัตราส่วนที่เท่ากัน



รูปที่ 2.28 เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดย (ก) การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวอน และ (ข) การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ที่มา : Computer Desktop Encyclopedia. (1981). Accessed July. 13, 2016. Available from <http://www.yourdictionary.com/perpendicular-recording#JEDotBlvOmRtjtIT3.99>

สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบแนวอน ขั้วแม่เหล็กของบิตข้อมูลจะถูกจัดวางเรียงกันในแนวราบกับแผ่นบันทึกข้อมูล (media) โดยที่ขั้วแม่เหล็กของบิตข้อมูลจะมีทิศเดียวกันหรือตรงกันข้ามดังในรูปที่ 2.28 (ก) ซึ่งต่างจากการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งที่มีการเรียงตัวของบิตข้อมูลในแนวตั้งกับพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยมีขั้วแม่เหล็กของบิตข้อมูลในทิศทางขึ้นหรือลงดังในรูปที่ 2.28 (ข) ซึ่งในปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งเพราะว่ามันสามารถเพิ่มความจุข้อมูลได้มากกว่าการบันทึกข้อมูลแบบแนวอนนั่นเอง

2.2.2 องค์ประกอบพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

Oberlin Smith [15] เป็นคนแรกที่ได้รับยกย่องว่าเป็นผู้คิดค้นหลักการการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในปี 1878 แต่ในปี 1898 Valdmarr Poulsen นักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์กเป็นคนสร้างอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กคนแรกๆ ที่เรียกว่า “เทเลกราฟโฟน” (telegraphophone) และเมื่อปี 1956 บริษัท IBM เป็นที่แรกที่สร้างฮาร์ดดิสก์ไครฟ์หรือเรียกว่า random access method of accounting and control (RAMAC) ซึ่งประกอบด้วยจานแม่เหล็ก (magnetic disks) 50 แผ่น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 24 นิ้ว หมุนที่ 1200 รอบต่อนาที RAMAC และมีความจุของหน่วยความจำขนาด 4.4 MB และเมื่อเปรียบเทียบกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในปัจจุบัน ก็คือฮาร์ดดิสก์ไครฟ์สำหรับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (desktop hard drives) โดยจานแม่เหล็กจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.5 นิ้ว มีความเร็วในการหมุน 5400 ถึง 7200 รอบต่อนาที และสามารถเก็บข้อมูลได้ตั้งแต่ 120 GB ถึง 2 TB ภายในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.29

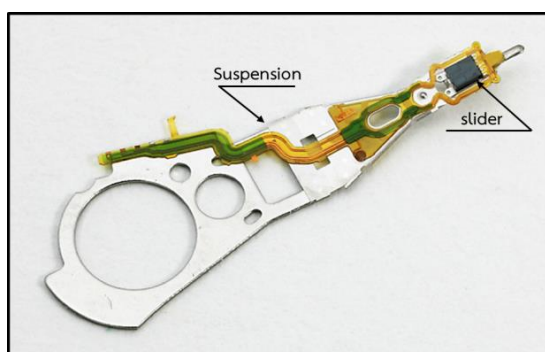


รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

แก้ไขจาก : Boot HDD. (2015). Accessed July. 13, 2016. Available from <https://pcworld.hu/hardver/merevlemez-kaosz-170659.html>

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะใช้แผ่นบันทึกข้อมูล (media) ในการเก็บข้อมูล ซึ่งมีลักษณะเป็นจานกลมและแบน แผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกเคลือบด้วยชั้นแม่เหล็กทั้งสองด้านและจะยกขึ้นโดยการเจาะรูตรงกลางและเรียงซ้อนกันลงไปบนแกนหมุน (spindle) หมุนด้วยความเร็วสูงหลายพันรอบต่อนาที โดยสปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) แผ่นบันทึกข้อมูลทุกแผ่นประกอบด้วยหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กหรือสไลเดอร์ (slider) หนึ่งหัวจะลอยอยู่ข้างบนของแต่ละด้าน โดยภายในสไลเดอร์จะมีทั้งหัวเขียนและหัวอ่าน (write and read head) อยู่ร่วมกัน สไลเดอร์นี้จะวางติดอยู่ที่บริเวณปลายแขน

จับยึด (suspension) ซึ่งถูกเรียกรวมกันว่า ชั้นส่วน head gimbal assembly หรือ HGA แสดงดังรูปที่ 2.30 (ก) และเมื่อนำชั้นส่วน HGA มาซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แล้วเชื่อมต่อกันเป็นชุดเดียวเข้ากับแขนหัวเขียนและหัวอ่าน (actuator arm) ส่วนประกอบนี้จะถูกเรียกรวมกันว่าชั้นส่วน head stack assembly หรือ HSA ดังแสดงดังรูปที่ 2.30 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.30 ชุดประกอบ head gimbal assembly (ก) และ ชุดประกอบ head stack assembly (ข)

ที่มา : (ก) Seagate ST1.1 harddisk. (n.d.). Accessed July. 13, 2016. Available from

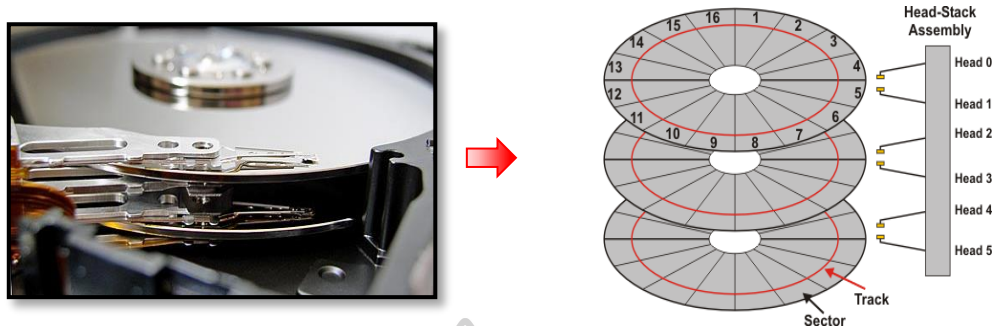
<http://www.hjreggel.net/hdtechdat/hd-anatomy.html>

(ข) El cabezal o HSA (Head Stack Assembly). (2014). Accessed July. 13, 2016.

Available from <http://recuperaciondedatos.com.mx/el-cabezal-o-hsa-head-stack-assembly/>

ส่วนประกอบ HSA นี้เป็นส่วนที่ทำให้หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กสามารถเขียนและอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลหลายๆ แผ่น ได้พร้อมกัน และยังสามารถบันทึกข้อมูลได้สองด้านอีกด้วย ดังนั้นในการอ่านและเขียนบนแผ่นบันทึกข้อมูล 1 แผ่นจะต้องใช้ชั้นส่วน HGA จำนวน 2 ชั้น โดยวางหัวบันทึกข้อมูลเหนือแทร็ค (track) ในตำแหน่งของที่ต้องการ ด้วยการควบคุมของมอเตอร์ที่เรียกว่า แคนหมุน (actuator) แผ่นบันทึกข้อมูลในแต่ละแผ่นจะมีข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในตรงกลาง

แทร็คหรือร่องบันทึกข้อมูล แต่ละแทร็คจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่เรียกว่าเซกเตอร์ (sector) ดังแสดงดังรูปที่ 2.31

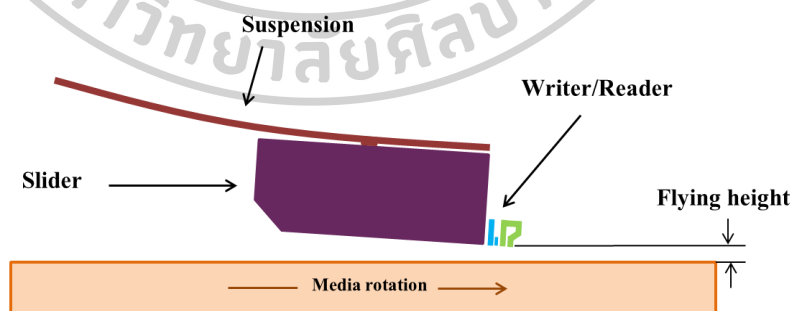


รูปที่ 2.31 ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทางกายภาพและการจัดแบ่งแผ่นบันทึกข้อมูล

ที่มา : Hard Disk Drive. (n.d.). Accessed July. 13, 2016. Available from <http://www.kepcil.com/kepcilin/harddisk.htm>

M. S. Patwari, "Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads," Doctor of Philosophy, University of Minnesota, 149, 2010.

หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะใช้หลักหลักแอโรไดนามิก (aerodynamic) ลอยอยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูล และยกขึ้นระยะใกล้ๆ ในระดับนาโนเมตรที่เรียกว่าระยะการบิน (flying height, FH) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เมื่อแผ่นบันทึกข้อมูลหมุนจนกระทั่งมีความเร็วที่สูงพอ จะทำให้เกิดอากาศไหลเวียนอยู่ภายใต้สไลเดอร์ และยกหัวบันทึกข้อมูลหรือสไลเดอร์ขึ้นจากพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูล



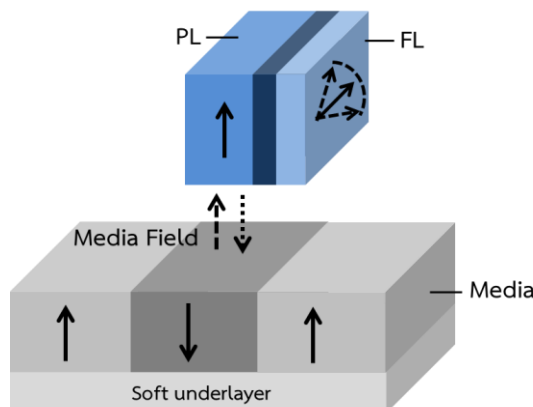
รูปที่ 2.32 ชุดประกอบหัวบันทึกข้อมูลที่ลอยอยู่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูล

2.3 หลักการดำเนินงานของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานหลักของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก คือ กระบวนการอ่านข้อมูล (writing process) และกระบวนการเขียนข้อมูล (writing process) [12, 15]

2.3.1 กระบวนการอ่านข้อมูล (reading process)

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดใช้เซ็นเซอร์แม่เหล็ก GMR (magnetic sensors) หรือที่เรียกกันว่า spin valve และ tunneling giant magneto-resistive (TGMR) ซึ่งเซ็นเซอร์แม่เหล็กนี้ประกอบไปด้วยชั้นของสารแม่เหล็กจำนวน 2 ชั้นประกบกัน โดยมีฉนวนแม่เหล็กกั้นระหว่างกลางดังแสดงในรูปที่ 2.33

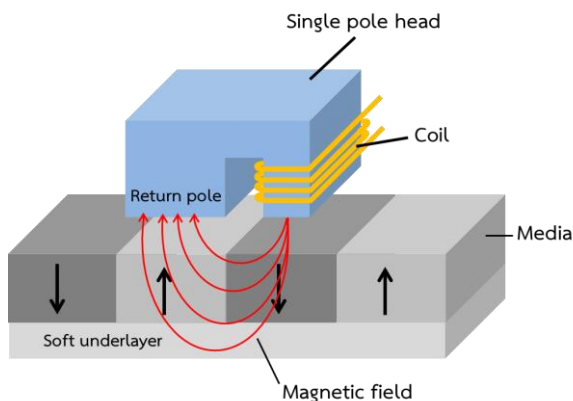


รูปที่ 2.33 แบบจำลองกระบวนการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล

กระบวนการอ่านข้อมูลนี้ แมกนีไทเซชันของชั้นอ้างอิง (pinned layer, PL) จะถูกตรึงไว้ด้วยแรงแม่เหล็กให้มีทิศทางคงที่ และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้หากมีสนามแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล (Media field) เข้ามากระทำ ส่วนชั้นที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลคือชั้นฟรี (free layer, FL) โดยแมกนีเซชันจะถูกตรึงไว้ให้มีทิศตามแนวอนและตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันของชั้นฟรี เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลเข้ามากระทำกับหัวอ่าน ชั้นฟรีจะมีหน้าที่ในการอ่านบิตข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล โดยแมกนีไทเซชันที่ชั้นฟรีจะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศขึ้นหรือลงตามบิตข้อมูล ทั้งนี้ทำให้เกิดมุมของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นฟรีและชั้นอ้างอิงที่แตกต่างกัน และมุมที่แตกต่างของแมกนีไทเซชันนี้จะสร้างสัญญาณ 1 หรือ 0 โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (pre-amp และ channel) ซึ่งหมายความว่าหากแมกนีไทเซชันของชั้นฟรีกับชั้นอ้างอิงมีทิศเดียวกันจะเป็นสถานะ 0 แต่ถ้าแมกนีไทเซชันของทั้งสองที่มีทิศสวนกันจะเป็นสถานะ 1

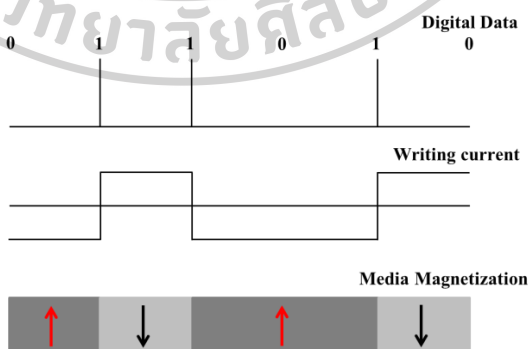
2.3.2 กระบวนการเขียนข้อมูล (writing process)

หัวเขียนแม่เหล็ก มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือ โพลหลัก (single pole head) ขดลวด (coil) และโพลย้อนกลับ (return pole) ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แบบจำลองกระบวนการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล

กระบวนการเขียนข้อมูล โดยในตอนแรกคอมพิวเตอร์จะสร้างกระแสข้อมูลบิต (bit stream) แบบดิจิทัลที่จะเขียน จากนั้นฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะได้รับข้อมูลในรูปแบบไบนารี (binary data) จากเครื่องคอมพิวเตอร์และทำการแปลงข้อมูลบิตให้อยู่ในรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่ากระแสไฟฟ้าเขียน (write current) ดังแสดงในรูปที่ 2.35 กระแสไฟฟ้าเขียนจะถูกป้อนไปยังขดลวดของหัวเขียนเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetic field) บริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นบันทึกข้อมูลกับหัวเขียนเพื่อทำการเขียนข้อมูลลงในแผ่นบันทึกข้อมูล ข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะถูกเก็บในรูปแบบบิตขนาดเล็กของแมกนีไทเซชันที่มีขั้วบวกและขั้วลบหรือมีทิศพุ่งขึ้นและพุ่งลงภายใต้การเข้ารหัสแบบ nonreturn to zero inverted (NRZI) กล่าวคือข้อมูลจะถูกเก็บโดยการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชัน และแมกนีไทเซชันจะถูกเขียนโดยการเปลี่ยนขั้วของกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดของหัวเขียน โดยที่บิตข้อมูล 1 จะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็ก และบิตข้อมูล 0 เป็นบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็ก

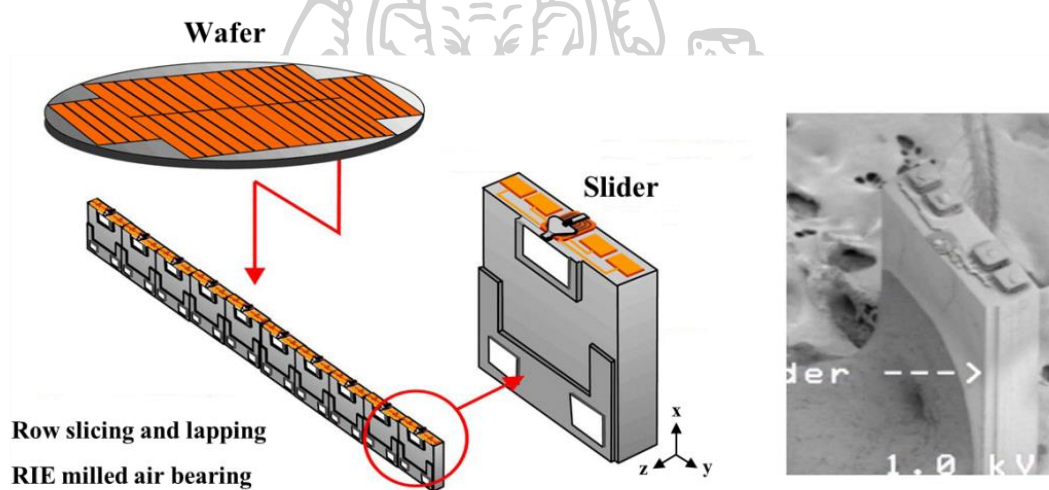


รูปที่ 2.35 แผนภาพจำลองกระบวนการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูล

ที่มา : M. S. Patwari, "Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads," Doctor of Philosophy, University of Minnesota, 149, 2010.

2.4 กระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

กระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กหรือสไลเดอร์คือการนำแผ่นเวเฟอร์ (wafer) จากกระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์มาทำการตัดโดยเครื่อง SHG ให้เป็นสไลเดอร์บาร์ดังในรูปที่ 2.36 จากนั้นสไลเดอร์บาร์จะถูกทำการแปรรูป ด้วยการขัดหน้า การกัดเซาะ เพื่อให้ได้รูปร่างหน้าตาตามการออกแบบของหัวอ่านหรือหัวเขียนในแต่ละรุ่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน (lapping process) สไลเดอร์บาร์ที่ผ่านกระบวนการขัดมาแล้ว จะถูกนำมาตัดเป็นชิ้น ๆ ได้สไลเดอร์ 1 อัน ที่ประกอบไปด้วยหัวอ่านและหัวเขียน 1 หัว และจากนั้นสไลเดอร์ที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ อาทิเช่น ขั้นตอนการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปในสไลเดอร์เพื่อกำหนดแอมกนีไทเซชันเริ่มต้นให้กับหัวอ่านและกระบวนการล้าง เป็นต้น



รูปที่ 2.36 แผนภาพแสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

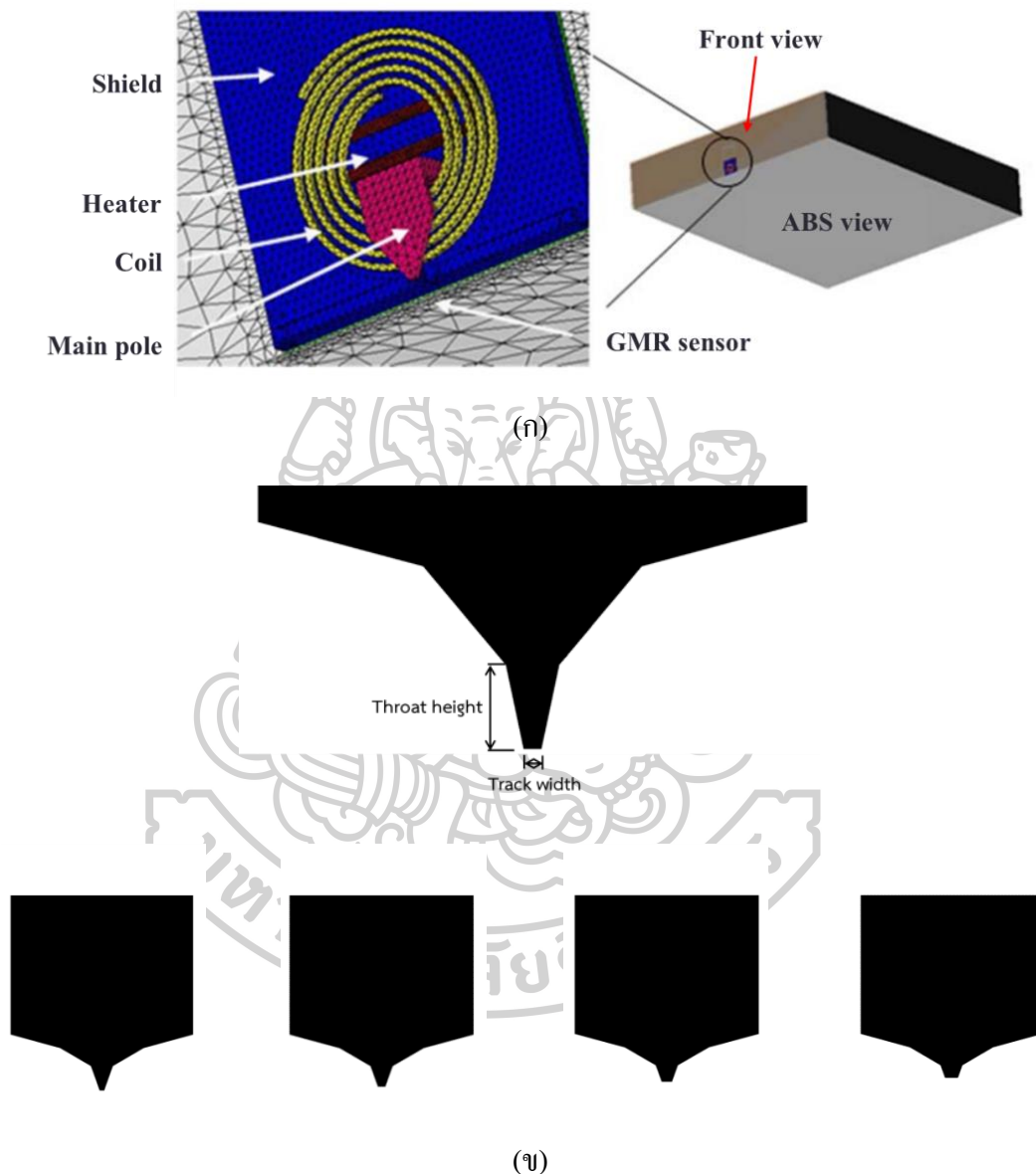
ที่มา : E. A. Dobisz. (2008). "Patterned Media : Nanofabrication Challenges of Future Disk Drives." IEEE Transactions on magnetic 96, 11 (November): 1836-1846

โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจขั้นตอนการผลิตอยู่ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน และขั้นตอนการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับสไลเดอร์ ซึ่งทั้งสองขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

2.4.1 กระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน

กระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน เป็นการออกแบบหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเพื่อกำหนดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลของหัวเขียนว่ามีความแคบเท่าไร สามารถทำได้

โดยทำการขัดหัวเขียนด้าน air bearing surface (ABS) ด้วยความถี่ที่มากขึ้น [21] ดังนั้นจึงส่งผลขนาดของปลายโพลเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ขนาดความยาวปลายโพล (throat height) ค่อย ๆ สั้นลง นอกจากนี้ยังทำให้ความกว้างของปลายโพล (track width) กว้างขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.37



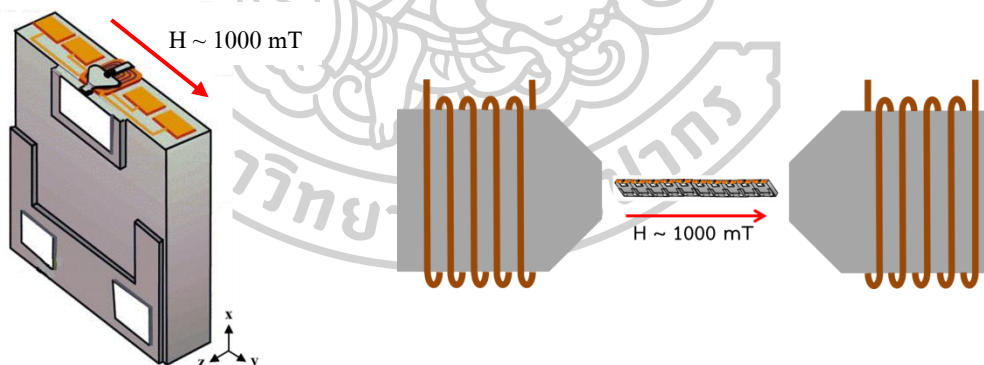
รูปที่ 2.37 ขนาดของปลายโพลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการขัดเปิดผิวหน้า โดย (ก) เป็นภาพแสดงองค์ประกอบของหัวเขียน และ (ข) เป็นภาพจำลองของหัวเขียนเมื่อผ่านการขัดเปิดผิวหน้า

ที่มา : (ก) J. Y. Juang, and D. B. Bogy. (2007). "Air-Bearing Effects on Actuated Thermal Pole Tip Protrusion for Hard Disk Drives." Transactions of the ASME 129, JULY: 570-578

นอกจากการกำหนดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลเพื่อต้องการให้สนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลมีความเข้มสูง ๆ และมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กน้อยลงหรือมากขึ้น แต่ว่ายังมีปัญหาที่ตามมาคือ การเกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน ซึ่งเป็นเหตุทำให้หัวเขียนเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก

2.4.2 กระบวนการ magnetic field initialization

ส่วนขั้นตอนการผลิตที่สำคัญอีกหนึ่งขั้นตอน คือขั้นตอนที่ต้องป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ magnetic field initialization หรือเรียกโดยย่อว่า กระบวนการ MFI การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกนี้จะทำโดยเครื่อง MFI ดังแสดงในรูปที่ 2.38 สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT จะถูกป้อนให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในทิศทางครอสแตร็คหรือแกน y [22] เพื่อไปจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพีริของหัวอ่าน GMR ให้มีทิศทางตามต้องการ อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้อาจส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กค้ำที่ปลายโพลของหัวเขียนได้ เนื่องจากหากนำหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไปใช้ในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่อไป เช่น ผ่านกระบวนการล้าง มันจะส่งผลทำให้มีอนุภาคแม่เหล็กขนาดเล็กจำพวกเหล็กหรือนิกเกิลที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือในอากาศไปเกาะติดบริเวณปลายโพลของหัวเขียน เพราะว่ามีบริเวณนี้มีความเป็นแม่เหล็กค้ำอยู่ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถนำหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไปใช้งานในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่อไปได้เลย



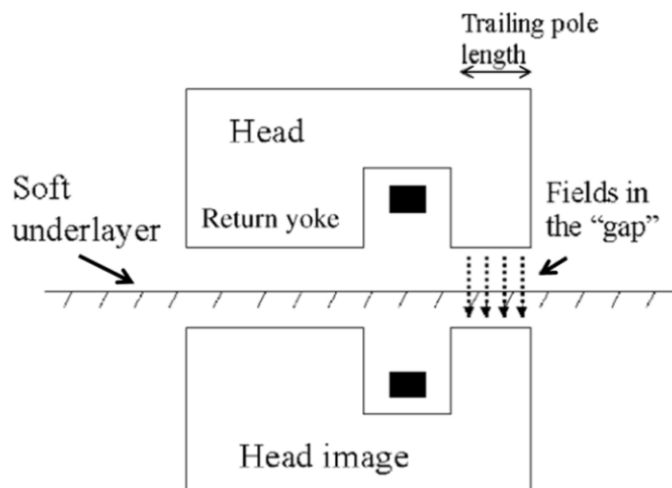
รูปที่ 2.38 แผนภาพแสดงการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กของเครื่อง MFI

2.5 หลักเกณฑ์ที่สำคัญสำหรับหัวเขียนแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

2.5.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง

หัวเขียนแม่เหล็กจะต้องสร้างสนามแม่เหล็กให้มีความเข้มสูงพอ เพื่อที่จะเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูง โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนแม่เหล็กจะแปรผันตรง

กับแมกนีไทเซชันอ้อมตัวของวัสดุแม่เหล็กที่สร้างหัวเขียน ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หัวเขียนสามารถสร้างได้จะถูกจำกัดโดยแมกนีไทเซชันอ้อมตัวของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียน การมีชั้นของสารแม่เหล็กที่เป็น soft underlayer (SUL) หรือชั้นแม่เหล็กอ่อนที่อยู่ถัดลงไปจากชั้นบันทึกข้อมูล เพื่อให้หัวเขียนสามารถเขียนข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลในแนวตั้งได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.39 เนื่องจากผลของภาพหัวเขียน (head image) โดยทั่วไปแล้วหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบ single pole จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ที่มี SUL ชั้น SUL นี้จะสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 60% ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอ้อมตัว (B_s) [23] ดังนั้นข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ข้อจำกัดของค่าโคเออร์ซิวิตีในแผ่นบันทึกข้อมูลสามารถเขียนข้อมูลได้ การปรับปรุงโดยการออกแบบหัวเขียนแม่เหล็กเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการสร้างความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่มากกว่าค่าการจำกัดที่กล่าวข้างต้น



รูปที่ 2.39 แผนภาพของหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งเนื่องจากมี SUL

ที่มา : S. Khizroev, et al. (2002). “Physics of perpendicular magnetic recording: writing process.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 246 (April 20): 335-344.

2.5.2 ความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตรย์ฟิลด์ (robustness to stray fields)

นี่คือปัญหาที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ ประโยชน์ของ SUL จะช่วยเพิ่มสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียนผ่านภาพ แต่มันก็จะมีข้อบกพร่องของตัวเอง และ SUL จะเป็นวัสดุที่มีความสามารถซึมซาบแม่เหล็กที่สูง ดังนั้นแม้ว่าขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกจะค่อนข้างอ่อน (มีขนาดไม่กี่ร้อย Oe) ก็สามารถไหลผ่านชั้น SUL ที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำได้อย่างง่ายดาย และจากนั้นไปรวมที่ปลายโพลของหัวเขียน ซึ่งอาจจะนำไปสู่การเขียนข้อมูลที่ไม่พึงประสงค์หรือการลบข้อมูลที่เขียนก่อนหน้านี้ได้ จำลองทำโดย Victora et.al. [24] แสดงให้เห็นว่าความซึมซาบแม่เหล็กของ SUL สามารถลดลงโดยไม่มีผลต่อ

สนามแม่เหล็กที่ใช้เขียนข้อมูล มีการออกแบบการแก้ปัญหาอื่น ๆ เช่น การใช้สารสังเคราะห์แอนติ-เฟอร์โรแมกเนติกในชั้น SUL เพื่อลดการก่อดัวที่ไม่พึงประสงค์ของโดเมนแม่เหล็กในชั้น SUL

2.5.3 สนามแม่เหล็กคงค้างต่ำหรือลบข้อมูลหลังจากเขียน (low remnant head field or erase after write)

ในกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก (จากหัวข้อ 2.3.2) เมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดหรือหัวเขียนหยุดทำงาน หัวเขียนมันต้องใช้เวลาคลายแมกนีไทเซชันที่อยู่ภายในเข้าสู่สถานะแม่เหล็กคงค้าง ในระหว่างกระบวนการคลายแมกนีไทเซชันนี้บางครั้งหัวเขียนอาจอยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (meta-stable state) ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กจากโพลของหัวเขียนสูงพอที่จะลบข้อมูลที่เขียนก่อนหน้าไปบางส่วนหรือลบทั้งหมด ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การลบข้อมูลหลังจากเขียน (erase after write) หรือ EAW และเรียกอีกอย่างว่า Pole erasure [7, 8] โดยมีความหมายเหมือนกันทั้งสองแบบคือหมายถึงการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพล (pole tip remanence) นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับว่า การลบข้อมูลบนแทร็ค (on track erasure, OTE) เนื่องจากว่าหัวเขียนจะลบข้อมูลบนแทร็คข้อมูลเดียวกันแม้ว่าหัวเขียนจะหยุดทำงาน ซึ่งปัญหาดังกล่าวไม่สามารถเลี่ยงได้ว่าหัวเขียนจะไม่เกิด EAW ในระหว่างช่วงอายุการใช้งานของฮาร์ดไดรฟ์ และส่งผลให้ฮาร์ดไดรฟ์เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก

2.6 ไมโครแมกเนติก

ไมโครแมกเนติกเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจำลองคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร ซึ่งเหมาะแก่การใช้ศึกษาโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก ไมโครแมกเนติกนี้มันไม่ใช่แค่เพียงแสดงให้เห็นการตอบสนองของแม่เหล็กโดยรวม แต่ศึกษาได้ถึงพฤติกรรมของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายสำหรับการออกแบบหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็กอย่างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

และไมโครแมกเนติกถูกนำมาใช้ในปี 1963 เมื่อ William Fuller Brown Jr. ตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับทฤษฎีโดเมน โครงสร้างผนังโดเมน [25] การคำนวณไมโครแมกเนติกเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี [26, 27] คือ 1) วิธีคำนวณแบบสถิต (Static Method) จะกระทำโดยการลดพลังงานแม่เหล็กให้น้อยที่สุดแต่ไม่ขึ้นกับเวลา และ 2) วิธีคำนวณแบบไดนามิก (dynamic method) โดยการแก้สมการแบบไดนามิกที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent dynamical equation)

2.6.1 วิธีคำนวณแบบสแตติก (static method)

วิธีคำนวณแบบสแตติกเป็นที่รู้จักกันดีคือ Brown's Static Equation ดังแสดงในสมการที่ (2.16) สำหรับวิธีการนี้การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะค่อย ๆ หมุนให้สัมพันธ์กับทิศทางของสนามแม่เหล็กยังผล (\vec{H}_{eff}) ในแต่ละตำแหน่งที่สถานะสมดุล

Brown's equations จะใช้คำนวณพลังงานแม่เหล็กของระบบให้น้อยที่สุด ดังนั้นสามารถเขียนสมการพลังงานรวมของระบบ (gibbs free energy) ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\delta E_{tot} = -\int_V (E_{ex} + E_{ani} + E_{ms} + E_z) dV \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \delta E_{tot} = & -\int_V (2\nabla \cdot (A\nabla \vec{m}) + \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}} - \mu_0 M_s \vec{H}_{ms} - \mu_0 M_s \vec{H}_z) \delta \vec{m} dV \\ & + \int_{\partial V} \left[2A \frac{\partial \vec{m}}{\partial \hat{n}} \delta \vec{m} \right] dS = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

โดยที่ E_{ex} คือ พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ E_{ani} คือ พลังงานแอนไอโซโทรปี E_{ms} คือ พลังงานแมกนีโตสแตติก และ E_z คือ พลังงานซีแมน

เมื่อ $\delta \vec{m} = \vec{m} \times \delta \vec{\theta}$ จากนั้นแทน $\delta \vec{m}$ ลงในสมการที่ (2.12) โดยที่ $\vec{v} \cdot (\vec{w} \times \vec{u}) = \vec{u} \cdot (\vec{v} \times \vec{w}) = -\vec{u} \cdot (\vec{w} \times \vec{v})$ ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned} \delta E_{tot} = & \int_V \vec{m} \times \left[2\nabla \cdot (A\nabla \vec{m}) - \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}} + \mu_0 M_s \vec{H}_{ms} + \mu_0 M_s \vec{H}_z \right] \delta \vec{\theta} dV \\ & + \int_{\partial V} \left[2A \frac{\partial \vec{m}}{\partial \hat{n}} \times \vec{m} \right] \delta \vec{\theta} dS \\ = & 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

ดังนั้น $\delta \vec{\theta}$ คือมุมหมุนเริ่มต้น (elementary rotation) ที่เป็น arbitrary และจากสมการที่ (2.13) สามารถเป็นศูนย์ได้ เมื่อเทอมแรกและเทอมที่สองมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (2.14)

$$\begin{cases} \vec{m} \times \left[2\nabla \cdot (A\nabla \vec{m}) - \frac{\partial E_{ani}}{\partial \vec{m}} + \mu_0 M_s \vec{H}_{ms} + \mu_0 M_s \vec{H}_z \right] = 0 \\ \left[2A \frac{\partial \vec{m}}{\partial \hat{n}} \times \vec{m} \right]_{\partial V} = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) ในสมการด้านล่าง $\frac{\partial \vec{m}}{\partial n} \times \vec{m} = 0$ หมายความว่า $\frac{\partial \vec{m}}{\partial n} = 0$ ดังนั้นเวกเตอร์ \vec{m} และ $\frac{\partial \vec{m}}{\partial n}$ จะทำมุม 90° เสมอ ในความเป็นจริงมีวิธีเดียวที่จะทำให้เวกเตอร์เหล่านี้มีค่าเป็นศูนย์ได้ คือให้ $\frac{\partial \vec{m}}{\partial n}$ เป็น 0 ดังนั้นจะได้สนามแม่เหล็กยังผลดังสมการที่ (2.15)

$$\vec{H}_{eff} = \frac{2A}{\mu_0 M_s} \nabla^2 \vec{m} - \frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{\partial E_{ami}}{\partial \vec{m}} + \vec{H}_{ms} + \vec{H}_z \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\left. \begin{aligned} \vec{M} \times \vec{H}_{eff} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \Big|_{\partial v} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Brown's Equations} \quad (2.16)$$

Brown's equations เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถรู้ได้ถึงการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กที่สภาวะสมดุล ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราของพลังงานภายในวัสดุแม่เหล็กในหน่วยที่น้อยที่สุด

2.6.2 วิธีคำนวณแบบไดนามิก (dynamic method)

แม้ว่าเราได้นำเสนอวิธีการคำนวณที่ขึ้นอยู่กับอัตราพลังงานในหน่วยที่น้อยที่สุดของ free energy สำหรับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งวิธีนี้จะไม่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับเวลาในสภาวะสมดุล และในปัจจุบันนี้มีความต้องการที่ท้าทายในเรื่องของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือต้องการความเร็วและความหนาแน่นในการจัดเก็บข้อมูลที่สูง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันที่ขึ้นกับเวลา (magnetization dynamics) ส่วนใหญ่การวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับแบบจำลองไดนามิก (dynamic model) ที่มีการนำเสนอโดย Landau และ Lifshitz [28] และได้รับการปรับปรุงแก้ไขโดย Gilbert [29]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทั้งสมการ Landau-Lifshitz และ Gilbert เป็นแบบจำลองสำหรับการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน โดยจะเน้นความแตกต่างระหว่างทั้งสองสมการและคุณสมบัติของ magnetization dynamics ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.6.2.1 การหมุนรอบแกนกลาง (gyromagnetic precession)

จากกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนกันระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กและโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum, L) ของอิเล็กตรอน เป็นดังสมการ

$$\vec{m} = -\gamma \vec{L} \quad (2.17)$$

เมื่อ γ คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) และในกรณีของไมโครแมกเนติกใช้ค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติกของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น $2.211 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

และสามารถใช้ทฤษฎีโมเมนตัมหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเชิงมุมกับทอร์ก (torque) ที่กระทำต่ออนุภาคโดยสนามแม่เหล็ก ดังสมการ

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{m} \times \vec{H} \quad (2.18)$$

นำสมการ (2.17) แทนลงในสมการ (2.18) จะได้สมการที่ (2.19) ซึ่งอธิบายการหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กรอบสนามแม่เหล็ก

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = -\gamma \vec{m} \times \vec{H} \quad (2.19)$$

และความถี่ของการหมุนจะถูกเรียกว่า ความถี่ลามอร์ (larmor frequency, f_L) [27] สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$f_L = \frac{\gamma H}{2\pi} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.19) สามารถเขียนโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยในหนึ่งหน่วยปริมาตรดังสมการ

$$\frac{1}{dV} \frac{d \sum \vec{m}}{dt} = -\gamma \frac{\sum \vec{m}}{dV} \times \vec{H} \quad (2.21)$$

และจากนิยามแมกนีไทเซชัน \vec{M} คือโมเมนต์แม่เหล็กในหนึ่งหน่วยปริมาตร จะได้สมการรูปแบบการหมุนรอบแกนกลางต่อเนื่อง (continuum gyromagnetic precession model)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} \quad (2.22)$$

2.6.2.2 สมการแลนดา - ลิฟชิตซ์ (Landau – Lifshitz equation)

แบบจำลองไดนามิกสำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนควงของแมกนีไทเซชันรอบสนามแม่เหล็กยังผล \vec{H}_{eff} ครั้งแรกถูกนำเสนอโดย Landau และ Lifshitz ในปี 1935 พื้นฐานของแบบจำลองนี้ได้มาจากสมการที่ (2.22) สมการรูปแบบการหมุนรอบแกนกลางต่อเนื่อง จะได้ดังสมการ

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) บ่งบอกถึงการโคจรของแมกนีไทเซชันรอบสนามแม่เหล็กยังผล โดยไม่มีการเบี่ยงเบนของแมกนีไทเซชันให้มีทิศทางตามสนามแม่เหล็กยังผล ต่อมาได้เพิ่มพจน์ของทอร์คเข้าไป เพื่อให้แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กยังผล จากนั้นจะได้สมการ Landau – Lifshitz ดังนี้

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{\lambda}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.24)$$

เมื่อ $\lambda > 0$ เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุ (phenomenological constant characteristic of material) และ M_s คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว

2.6.2.3 สมการแลนเดา-ลิฟชิตซ์กิลเบิร์ต (Landau - Lifshitz Gilbert equation)

ในปี ค.ศ. 1955 Gilbert ได้พบว่าสมการ Landau-Lifshitz สามารถพิสูจน์ได้อีกแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากสมการ Lagrangian โดยใช้องค์ประกอบของแมกนีไทเซชันในแกนต่าง ๆ และ Gilbert ได้เสนอให้เพิ่มเทอมทอร์คเข้าไปจะได้สมการที่ (2.25)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma_0 \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (2.25)$$

เมื่อ $\alpha > 0$ เป็นค่าคงที่การหน่วงของกิลเบิร์ต (Gilbert's damping constant) ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ส่วนใหญ่ α จะน้อยกว่า 0.1 หรืออาจจะต่ำกว่า 0.01 \vec{M} คือแมกนีไทเซชัน dt คือช่วงเวลาที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน \vec{H}_{eff} คือสนามแม่เหล็กยังผล M_s คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว และ γ_0 คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างสมการ Landau-Lifshitz และสมการ Landau-Lifshitz Gilbert คือถึงแม้ว่าทั้งสองสมการจะมีความคล้ายกันมากในทางคณิตศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่นสมการ Landau-Lifshitz สมการที่ (2.24) สามารถได้มาอย่างง่ายจากสมการ Gilbert ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสามารถพิสูจน์โดยการคูณ \vec{M} ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.25) จะได้

$$\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma_0 \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) + \vec{M} \times \left(\frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right) \quad (2.26)$$

จากนั้นใช้เวกเตอร์เอกลักษณ์ $a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)$ และเนื่องจาก $\vec{M} \cdot \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = 0$ จะได้

$$\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma_0 \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \alpha M_s \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \quad (2.27)$$

แทนสมการที่ (2.27) ลงในเทอมหลังของสมการที่ (2.25) ได้ดังสมการ

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma_0 \vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma_0 \alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \alpha^2 \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \quad (2.28)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma_0}{1+\alpha^2} \vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma_0 \alpha}{(1+\alpha^2) M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.29)$$

กำหนดให้ $\gamma = \frac{\gamma_0}{1+\alpha^2}$ จากนั้นนำไปแทนในสมการที่ (2.29) ได้สมการ Landau-Lifshitz Gilbert หรือเรียกย่อๆ ว่าสมการ LLG แสดงดังสมการที่ (2.30)

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma \alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (2.30)$$

สมการ Landau-Lifshitz Gilbert จะประกอบไปด้วยสองพจน์ ได้แก่ พจน์การหมุน (precession term) และ พจน์การหน่วง (damping term) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 [30]



รูปที่ 2.40 การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กยังผล (ก) การหมุนแบบไม่มีการหน่วง และ (ข) การหมุนแบบมีการหน่วง

จากรูปที่ 2.40 (ก) คือพจน์การหมุน $T_1 = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff}$ ทอร์คจะตั้งฉากกับระนาบของแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กยังผล จึงทำให้แมกนีไทเซชันหมุนรอบสนามแม่เหล็กยังผล โดยมีทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นผลมาจากอัตราส่วน $\frac{\gamma}{M_s}$ โรแมกเนติกที่ติดลบในสมการที่ (2.30) ส่วนพจน์ที่สองคือพจน์การหน่วง $T_2 = \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff})$ ทอร์คจะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันกลับสู่สถานะที่มีพลังงานต่ำสุด ดังนั้นแมกนีไทเซชันจึงต้องหมุนด้วยความถี่เชิงมุมคงที่ตามนิยามของพจน์การหมุน

แมกนีไทเซชันต้องปรับระนาบการหมุนเพื่อให้มีความเร็วลดลงแต่ความถี่เชิงมุมคงที่ แมกนีไทเซชันจึงเคลื่อนตัวเข้าสู่ทิศของสนามแม่เหล็กยังผลดังแสดงในรูปที่ 2.40 (ข)

2.6.3 สนามแม่เหล็กยังผล

แบบจำลองไดนามิกของโมเมนต์แม่เหล็กในแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถคำนวณได้จากสมการ Landau - Lifshitz Gilbert (สมการ (2.30)) ทั้งพจน์การหมุนและพจน์การหน่วงจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กยังผล \vec{H}_{eff} ดังนั้นจึงต้องคำนวณการเคลื่อนที่ในช่วงขณะของแมกนีไทเซชันโดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กยังผลเป็นตัวอธิบายถึงแรงที่กระทำต่อโมเมนต์แม่เหล็ก โดยสามารถสรุปได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันดังสมการที่ (2.31)

$$\vec{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E}{\partial \vec{M}} \quad (2.31)$$

พลังงานทั้งหมดของระบบแม่เหล็ก (total energy, E_{tot}) ประกอบด้วยพลังงาน 4 ชนิดดังสมการที่ (2.31) ได้แก่ พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (E_{ex}) เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ติดกัน พลังงานแอนไอโซโทรปี (E_{ani}) เป็นพลังงานที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของวัสดุแม่เหล็ก พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (E_{demag}) เป็นพลังงานที่เกิดจากสนามดีแมกนีไทเซชันที่เกิดภายในวัสดุ และพลังงานซีแมน (E_{zee}) เป็นพลังงานที่มาจากสนามแม่เหล็กภายนอก โดยแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป [26, 27, 30, 31]

$$E_{tot} = E_{ex} + E_{ani} + E_{demag} + E_{zee} \quad (2.32)$$

2.6.3.1 พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ (exchange energy)

พลังงานเอ็กซ์เชนจ์เป็นอันตรกิริยาในระยะสั้นๆ ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ติดกันและมีหน้าที่ในการจัดเรียงแมกนีไทเซชันที่อยู่ติดกันให้ขนานกัน พลังงานของไฮเซนเบิร์ก (heisenberg hamiltonian) จะอธิบายถึงอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน (exchange interaction) แสดงดังสมการ

$$H_{ex} = -\sum_{i,j}^{fN} 2J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j \quad (2.33)$$

ผลรวมเป็น among first neighbors (fN) เมื่อ \hat{S}_i และ \hat{S}_j คือโมเมนต์เชิงมุมของสปิน และ J_{ij} คือ อินทิกรัลเอ็กซ์เชนจ์ของสปินที่ใกล้ที่สุด มันจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วด้วยระยะห่างระหว่างสปิน ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าเป็นเพียง among first neighbors ซึ่งหมายความว่าสามารถเขียน J แทน J_{ij}

เพื่อที่จะประยุกต์พลังงานของไฮเซนเบิร์กใช้ในการอธิบายที่ต่อเนื่อง โมเมนต์เชิงมุมของสปินจะถูกแทนด้วยเวกเตอร์ $\vec{S}_{i,j} = S_{i,j}\vec{s}_{i,j}$ โดย $S_i = S_j = S$ และจากสมการที่ (2.33) สามารถเขียนผลคูณเชิงสเกลลาร์ (dot product) เพื่อให้ได้พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ดังนี้

$$E_{ex} = -2JS^2 \sum_{i,j} \cos \theta_{ij} \quad (2.34)$$

เมื่อ θ_{ij} คือมุมระหว่างสปิน \vec{s}_i และ \vec{s}_j และ j หมายถึงสปินที่อยู่ติดกันกับ i สมมติว่ามุมระหว่างสปิน θ_{ij} มีขนาดเล็กมาก จากสมการที่ (2.34) จึงสามารถใช้คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ $\cos \theta_{ij} \approx 1 - \frac{\theta_{ij}^2}{2}$ รวมทั้งพิจารณาผลรวมสำหรับสปินที่อยู่ติดกันแต่ละคู่ ได้ดังสมการ

$$E_{ex} = JS^2 \sum_i \sum_j \theta_{ij}^2 \quad (2.35)$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ของไมโครแมกเนติก สำหรับทิศทางของสปิน \vec{s}_i ของแต่ละไดโพล $\vec{\mu}_i$ ในแลตทิซ (lattice) สามารถเขียนแทนด้วย $\vec{m}_i = \vec{M}_i / M_s$ และทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละองค์ประกอบของปริมาตรเท่ากับ $\vec{M}_i = \sum_i \vec{\mu}_i / dV$ โดยใช้ตัวแปรไม่มีหน่วย (dimensionless variable) และตัวแปรต่อเนื่อง (continuous variable) ของแมกนีไทเซชัน \vec{m} ดังนั้นสามารถเขียนมุมเล็ก ๆ ได้ดังสมการ

$$|\theta_{ij}| \approx |\vec{m}_i - \vec{m}_j| \approx |(\vec{r}_{ij} \cdot \nabla) \vec{m}| \quad (2.36)$$

เมื่อ \vec{r}_{ij} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของสปิน i กับ j ดังนั้นพลังงานเอ็กซ์เชนจ์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{ex} = JS^2 \sum_i \sum_j [(\vec{r}_{ij} \cdot \nabla) \vec{m}]^2 \quad (2.37)$$

การหาผลรวมแบบต่อเนื่องใน i จะถูกแทนด้วยอินทิกรัลตามปริมาตร (V) ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์อย่างที่กำลังศึกษา ดังนั้นพลังงานเอ็กซ์เชนจ์จึงอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\begin{aligned} E_{ex} &= \int_V e_{ex} dV \\ &= \int_V A (\nabla \vec{m})^2 dV \\ &= \int_V A [(\nabla m_x)^2 + (\nabla m_y)^2 + (\nabla m_z)^2] d^3r \end{aligned} \quad (2.38)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ มีหน่วยเป็น J/m ถูกกำหนดโดย

$$A = \frac{JS^2z}{a} \quad (2.39)$$

และเมื่อ a คือระยะห่างระหว่างสปินที่อยู่ติดกัน และ z จะมีค่าเท่ากับ 1 2 หรือ 4 ขึ้นอยู่กับถ้าแลตทิซเป็น simple cubic face-centered cubic หรือ body-centered cubic ตามลำดับ จากสมการที่ (2.38) พลังงานเอ็กซ์เชนจ์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้กันทำมุมกัน 180° และมีค่าน้อยสุดเมื่อโมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใกล้กันขนานกัน (ทำมุม 0°)

จากนั้นนำสมการพลังงานเอ็กซ์เชนจ์ในสมการที่ (2.38) แทนค่าลงในสมการที่ (2.31) จะได้สมการในการคำนวณสนามเอ็กซ์เชนจ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{H}_{ex}(\mathbf{r}) &= \frac{2A}{\mu_0} (\nabla^2 \vec{m}(\mathbf{r})) \\ &= \frac{2A}{\mu_0} \frac{(\vec{m}_i - \vec{m}_j)}{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2} \end{aligned} \quad (2.40)$$

เมื่อ \vec{H}_{ex} คือสนามเอ็กซ์เชนจ์ \vec{r}_i และ \vec{r}_j คือตำแหน่งของเซลล์ตัวที่ i และเซลล์ตัวที่ j ที่อยู่ติดกัน

พลังงานเอ็กซ์เชนจ์เป็นอันตรกิริยาในระยะสั้น ๆ ระหว่างแมกนีไทเซชันที่อยู่ติดกัน ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยแรกที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการกำหนดขนาดเซลล์ในการคำนวณ คือความยาวแต่ละด้านของเซลล์จะต้องไม่เกินความยาวเอ็กซ์เชนจ์ เพื่อให้โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ในเซลล์ติดกันไม่สามารถส่งอันตรกิริยาเอ็กซ์เชนจ์ต่อกันได้ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่เซลล์ติดกันไม่ชี้หรือหันไปในทิศเดียวกัน ดังนั้นขนาดของเซลล์ที่เหมาะสมต้องมีขนาดอยู่ในช่วงของอันตรกิริยาควอนตัม โดยระยะดังกล่าวถูกเรียกอีกอย่างว่า ความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (exchange length) และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

2.6.3.2 พลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy)

พลังงานแอนไอโซโทรปีจะขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแมกนีไทเซชันที่เกี่ยวกับแกนของผลึก (crystallographic axes) ในวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด และสนามแอนไอโซโทรปีจะเป็นผลมาจากอันตรกิริยาของสปินกับออร์บิต (spin-orbit interaction) ซึ่งอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งระหว่างสปินและโมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจร (orbital angular momentum) ในระดับอะตอม เพราะออร์บิทัลอะตอม (atomic orbital) มักจะไม่เป็นทรงกลมแต่เป็นวงรีมากกว่า การเกิดอันตรกิริยาสปินกับออร์บิตนี้

จะทำให้สปริงหมุนไปตามทิศทางแกนของผลึก และทิศทางนี้จะถูกเรียกว่า easy axis สำหรับแมกนีไทเซชัน การหมุนของแมกนีไทเซชันที่ออกจาก easy axis จะอธิบายได้จากพลังงานแอนไอโซโทรปีและสนามแอนไอโซโทรปี

นอกจากนี้จำนวนของ easy axis ในโครงสร้างผลึกของสารแต่ละชนิดสามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างของผลึก แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว (uniaxial anisotropy) สำหรับผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) โดยจะมี easy axis เพียงแกนเดียวที่ตั้งฉากกับหน้าหกเหลี่ยมของโครงสร้างผลึก และแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ (cubic anisotropy) สำหรับผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และ BCC จะมี easy axis ถึงสามแกนตั้งฉากซึ่งกันและกัน

2.6.3.2.1 แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว

แมกนีไทเซชันทั้งหมดต้องการจัดเรียงตัวไปอยู่ในทิศเดียวกันกับ easy axis เพื่อให้มีพลังงานน้อยที่สุด ดังนั้นพลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวจะขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับ easy axis โดยที่สมการทั่วไปสำหรับความหนาแน่นของพลังงานสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_{ani,uni} = \sum_i K_i \sin^2 \theta \quad (2.41)$$

$$\cong K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta$$

เมื่อ $E_{ani,uni}$ คือพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว K_i คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสำหรับอนุกรมลำดับที่ i และ θ คือมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับ easy axis

$$E_{ani,uni} = \sum_i K_i \sin^2 \theta \quad (2.42)$$

$$\cong K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta$$

จากสมการที่ (2.42) ในเทอมของ $\sin^2 \theta$ ใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ $\sin^2 \theta = 1 - \cos^2 \theta$ และนิยามการคูณเวกเตอร์แบบสเกลาร์ $\vec{m} \cdot \vec{a} = |\vec{m}| |\vec{a}| \cos \theta$ ได้ดังสมการที่ (2.43)

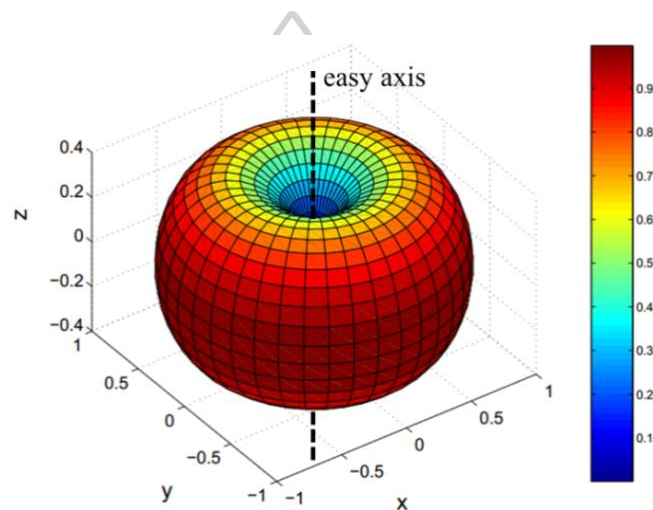
$$E_{ani,uni} = K_0 + K_1 [1 - (\vec{m} \cdot \vec{a})^2] + K_2 [1 - (\vec{m} \cdot \vec{a})^2]^2 \quad (2.43)$$

เทอมของ $\sin \theta$ จะเป็นเลขคู่เสมอเพราะพื้นผิวของพลังงานต้องสมมาตร นอกจากนี้ $K_0 = 0$ เพื่อให้แมกนีไทเซชันทั้งหมดจัดเรียงตัวไปอยู่ในทิศเดียวกันกับ easy axis ของผลึก ดังนั้น K_0 ต้องไม่ติดลบ เมื่อ K_1 เป็นบวก พลังงานจะมีค่าต่ำสุดเมื่อแมกนีไทเซชันขนานกับ easy axis และจะมีพลังงานสูงสุดเมื่อแมกนีไทเซชันตั้งฉากกับ easy axis สำหรับค่าคงที่ K_2 จะมีขนาดเล็ก

กว่า K_1 จึงสามารถตัดพจน์ของ K_2 ได้ จึงได้สมการสำหรับคำนวณพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวดังสมการที่ (2.44) เมื่อ K_u คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว (uniaxial anisotropy constant)

$$E_{ani,uni} = \int_V K_u [1 - (\vec{m} \cdot \vec{a})^2] dV \quad (2.44)$$

เมื่อ \vec{m} คือ เวกเตอร์ทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ \vec{a} คือเวกเตอร์ทิศทางของ easy axis และกราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.41 เส้นประสีดำแสดง easy axis หรือแกนที่แมกนีไทเซชันชี้แล้วมีพลังงานน้อยที่สุด



รูปที่ 2.41 พื้นผิวพลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบแกนเดียว เส้นประแสดง easy axis ที่อยู่ในแนวแกน z

แก้ไขจาก : Massimiliano d'Aquino. (2004). "Nonlinear Magnetization Dynamics in Thin-films and Nanoparticles." Doctorate Thesis in Electrical Engineering. University of Napoli.

สนามแอนไอโซโทรปีสามารถคำนวณได้โดยใช้พลังงานแอนไอโซโทรปีในสมการที่ (2.44) แทนลงในสมการที่ (2.31) ได้ดังสมการที่ (2.45)

$$\vec{H}_{ani} = \frac{2K_u}{\mu_0} (\vec{m} \cdot \vec{a}) \vec{a} \quad (2.45)$$

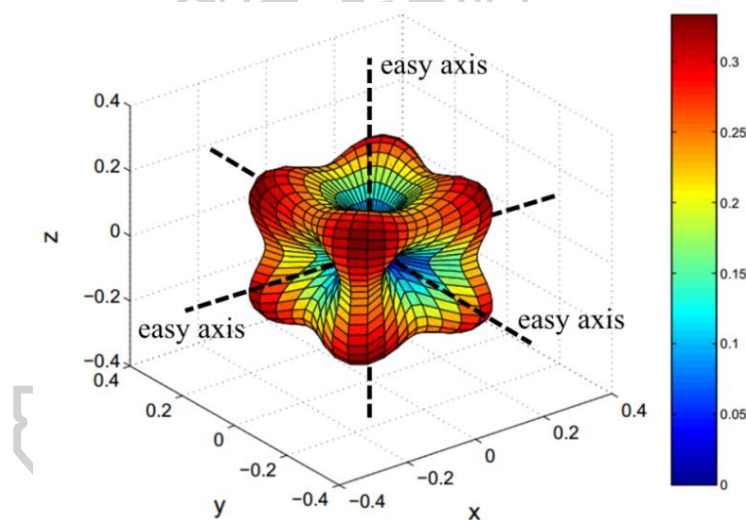
เมื่อ \vec{H}_{ani} คือสนามแอนไอโซโทรปี สนามแม่เหล็กแอนไอโซโทรปีมีขนาดมากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันขนานกับ easy axis และมีขนาดน้อยที่สุดเมื่อตั้งฉากกับ easy axis

2.6.3.2.2 แอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์

พลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบสามของแมกนีไทเซชันในทิศ easy axis ดังแสดงในสมการที่ (2.46) เมื่อ $\vec{m}_x, \vec{m}_y, \vec{m}_z$ เป็นแมกนีไทเซชันที่อยู่ในแนวองค์ประกอบแกน \vec{a}, \vec{b} และ \vec{c} ตามลำดับ โดยแกนทั้งสามตั้งฉากซึ่งกันและกัน

$$E_{ani,cubic} = K_1 \left[(\vec{m} \cdot \vec{a})^2 (\vec{m} \cdot \vec{b})^2 + (\vec{m} \cdot \vec{a})^2 (\vec{m} \cdot \vec{c})^2 + (\vec{m} \cdot \vec{b})^2 (\vec{m} \cdot \vec{c})^2 \right] + K_2 \left[(\vec{m} \cdot \vec{a})^2 (\vec{m} \cdot \vec{b})^2 (\vec{m} \cdot \vec{c})^2 \right] \quad (2.46)$$

กราฟพลังงานแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.42 เส้นประสีดำแสดง easy axis หรือเป็นบริเวณที่มีพลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่าน้อยสุด และบริเวณแนวทแยงมุมของลูกบาศก์พลังงานแอนไอโซโทรปีมีค่ามากที่สุดหรือ hard axis



รูปที่ 2.42 พื้นผิวพลังงานของแอนไอโซโทรปีแบบลูกบาศก์ เส้นประแสดง easy axis ที่อยู่ในแนวแกน x y และ z

แก้ไขจาก : Massimiliano d'Aquino. (2004). "Nonlinear Magnetization Dynamics in Thin-films and Nanoparticles." Doctorate Thesis in Electrical Engineering. University of Napoli.

สนามแอนไอโซโทรปีสามารถคำนวณได้โดยใช้พลังงานแอนไอโซโทรปีในสมการที่ (2.46) แทนลงในสมการที่ (2.31) ได้ดังสมการที่ (2.47)

$$\vec{H}_{ani,cubic} = 2K_1 \left\{ \left[\vec{a} (\vec{m} \cdot \vec{a}) (\vec{m} \cdot \vec{b})^2 + \vec{a} (\vec{m} \cdot \vec{a}) (\vec{m} \cdot \vec{c})^2 \right] + \left[\vec{b} (\vec{m} \cdot \vec{b}) (\vec{m} \cdot \vec{a})^2 + \vec{b} (\vec{m} \cdot \vec{b}) (\vec{m} \cdot \vec{c})^2 \right] \right\} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\bar{c}(\bar{m} \cdot \bar{c})(\bar{m} \cdot \bar{a})^2 + \bar{c}(\bar{m} \cdot \bar{c})(\bar{m} \cdot \bar{b})^2 \right] \Big\} \\
& + 2K_2 \left\{ \left[\bar{a}(\bar{m} \cdot \bar{a})(\bar{m} \cdot \bar{b})^2 (\bar{m} \cdot \bar{c})^2 \right] \right. \\
& \quad + \left[\bar{b}(\bar{m} \cdot \bar{b})(\bar{m} \cdot \bar{a})^2 (\bar{m} \cdot \bar{c})^2 \right] \\
& \quad \left. + \left[\bar{c}(\bar{m} \cdot \bar{c})(\bar{m} \cdot \bar{a})^2 (\bar{m} \cdot \bar{b})^2 \right] \right\}
\end{aligned}$$

2.6.3.3 พลังงานดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization energy)

แม่เหล็กพื้นฐานในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถอธิบายได้จากขั้วแม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กที่เรียกว่าสเตรย์ฟิลด์ (stray field) โดยภายในวัสดุแม่เหล็กจะสร้างสนามแม่เหล็กเนื่องจากขั้วแม่เหล็กที่พื้นผิวของวัสดุที่เรียกว่า สนามดีแมกนีไทเซชัน (\vec{H}_{demag}) และมีทิศตรงข้ามกับแมกนีไทเซชัน สนามแม่เหล็กชนิดนี้จะทำให้แมกนีไทเซชันพยายามเรียงตัวแบบหัวต่อหาง โดยเป็นการจัดเรียงที่มีแมกนีไทเซชันรวมน้อยที่สุด การเรียงตัวในลักษณะนี้จะก่อให้เกิดเป็นโดเมนแม่เหล็กในลักษณะโดเมนปิดหรือ demagnetized state

โดยเราสามารถเขียนสมการสนามดีแมกนีไทเซชันที่สอดคล้องกับสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์และสมการความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างแมกนีไทเซชัน ความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (\vec{B}) ดังสมการที่ (2.48)

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.48)$$

ใส่โอเปอเรเตอร์ไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ให้กับสมการที่ (2.53) ทั้งสองข้างของสมการ ได้ดังแสดงสมการ

$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 (\nabla \cdot \vec{H} + \nabla \cdot \vec{M}) \quad (2.49)$$

เมื่อกำหนดให้ $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ตามกฎสนามเหล็กของเกาส์ (Gauss' law) แทนลงในสมการที่ (2.49) ได้ดังสมการ

$$\nabla \cdot \vec{H} = -\nabla \cdot \vec{M} \quad (2.50)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) $\nabla \cdot \vec{H} = 0$ ดังนั้นเราสามารถกำหนดให้สนามแม่เหล็กในรูปของศักย์สเกลาร์ (scalar potential, ϕ_m) $\vec{H} = -\nabla \phi_m$ และแทนลงในสมการที่ (2.50) ได้ดังนี้

$$\nabla^2 \phi_m = \nabla \cdot \vec{M} \quad (2.51)$$

เมื่อ $\rho_m(\vec{r}') = -\mu_0 \nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')$ คือความหนาแน่นประจุแม่เหล็กที่จุดกำเนิด \vec{r}' สำหรับศักย์สเกลาร์ที่จุดสังเกต \vec{r} ดังนั้นสามารถเขียนสมการปัวซอง (Poisson's equation) ได้ดังสมการ

$$\nabla^2 \phi_m = -\frac{\rho_m}{\mu_0} \quad (2.52)$$

และคำตอบของสมการปัวซองเป็นดังนี้

$$\phi_M(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int \frac{\rho_m(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r \quad (2.53)$$

หรือ

$$\phi_M(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int \frac{\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r \quad (2.54)$$

จากนั้นทำการคำนวณศักย์แม่เหล็ก โดยใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์ ได้ดังสมการ

$$\phi_M(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\nabla' \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(r')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' \quad (2.55)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของวัสดุแม่เหล็กและ S คือพื้นผิวของวัสดุแม่เหล็ก นอกจากนี้ dS' หมายถึงองค์ประกอบของพื้นผิวนขนาดเล็กที่ไม่มีทิศทาง และ \hat{n} คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย (unit normal vector) ของพื้นผิวโดยมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุ

จากสมการที่ (2.55) ศักย์แม่เหล็ก ϕ_M (magnetic potential) ประกอบไปด้วยสองเทอม โดยในเทอมแรกคืออินทิกรัลปริมาตรเนื่องจากไดเวอร์เจนของแมกนีไทเซชัน ซึ่งถูกกำหนดด้วยประจุแม่เหล็กเชิงปริมาตร (magnetic volume charges) $\rho_m(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \cdot \vec{M}$ และเทอมที่สองคืออินทิกรัลพื้นผิวเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งถูกกำหนดด้วยประจุเชิงพื้นผิว (surface charges) $\sigma = \vec{M} \cdot \hat{n}$ จากสมการที่ (2.55) สามารถเขียนใหม่โดยใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจน $\vec{H} = -\nabla \phi_m$ ได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{demag}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int \nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' - \frac{1}{4\pi} \int \vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(r') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.56)$$

และในกรณีที่แมกนีไทเซชันมีค่าคงที่ พจน์แรกของสมการจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการสนามดีแมกนีไทเซชันดังสมการที่ (2.59)

$$\vec{H}_{demag}(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int \vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(r') \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (2.57)$$

เมื่อ \vec{H}_{demag} คือสนามแม่เหล็กนิโตะเซชัน \vec{r} คือเวกเตอร์ตำแหน่งของโมเมนต์แม่เหล็กที่ได้รับสนามแม่เหล็กเนื่องจากประจุไฟฟ้าในแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง \vec{r}'

ส่วนพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กและแมกนีโตะเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะเรียกว่า พลังงานดีแมกนีโตะเซชัน (demagnetization energy) หรือพลังงานแมกนีโตะสเตติก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.58)

$$E_{demag} = -\frac{1}{2} \mu_0 \int \vec{M}(\vec{r}) \cdot \vec{H}_{demag}(\vec{r}) d^3r \quad (2.58)$$

2.6.3.4 พลังงานซีแมน (zeeman energy)

นอกเหนือจากพลังงานที่อยู่ภายในเกี่ยวกับพลังงานรวมของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่กล่าวมาแล้ว ยังมีพลังงานที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเป็นผลมาจากภายนอก (external field) ก็คือพลังงานซีแมน ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กซีแมน (zeeman field) สนามแม่เหล็กซีแมนในไมโครแมกเนติกจะเป็นสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนเข้าไปในระบบ เพื่อกำหนดทิศทางของแมกนีโตะเซชันในทิศทางใด ๆ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีโตะเซชันภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยสามารถเขียนสมการของพลังงานซีแมนได้ดังสมการ

$$E_{zee} = -\mu_0 \int_V \vec{M} \cdot \vec{H}_{zee} dV \quad (2.59)$$

เมื่อ E_{zee} คือพลังงานซีแมน \vec{H}_{zee} คือสนามแม่เหล็กภายนอกหรือสนามแม่เหล็กซีแมน และผลที่ตามมาจากการ Landau-Lifshitz-Gilbert แมกนีโตะเซชันจะพยายามจะเรียงตัวให้ขนานและชี้ไปในทิศเดียวกันกับทิศสนามแม่เหล็กภายนอก เพื่อลดพลังงานของระบบให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของแมกนีโตะเซชันหรือผนังโดเมน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลของหัวเขียน

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการคางของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนเป็นปัญหาอย่างมากสำหรับการเขียนข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง ในปี ค.ศ. 2006 ผู้วิจัยชื่อ Daniel Z. Bai และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาสนามแม่เหล็กคางบริเวณปลายโพลของหัวเขียนจากระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง ด้วยการสร้างแบบจำลองไมโครแมกเนติก โดยในการจำลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณ โยคและความยาวปลายโพล พบว่าโยคที่มี

ด้านกว้างยาวกว่าด้านยาวและมีขนาดของมุมแฟลร์ที่แคบประมาณ 30 องศา ส่งผลทำให้หัวเขียนบริเวณ โยคเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวอนที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กไหลลงสู่ปลายโพล ซึ่งทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลต่ำ และยังพบว่าความยาวปลายโพลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของแอนไอโซโทรปีที่สูงขึ้นกับรูปทรง พบว่าเมื่อความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลสูงขึ้นด้วย

และในปี ค.ศ. 2010 ผู้วิจัยชื่อ M. S. Patwari and R. H. Victora [7] ได้พัฒนาแบบจำลองไมโครแมกเนติกเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การลบข้อมูลหลังจากเขียน (EAW) สำหรับหัวเขียนที่เป็นโลหะผสม FeCo 2.4 T โดยทำการจำลองสถานะแม่เหล็กคงค้างของหัวเขียนที่แสดงให้เห็นแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวแบบหมุนวนเป็นวงปิดที่บริเวณปลายโพลและบริเวณโยคของหัวเขียน และเมื่อทำการเปรียบเทียบในเชิงคุณภาพระหว่างผลการจำลองไมโครแมกเนติกและผลการทดลองจากภาพ MFM พบว่ามีโดเมนแม่เหล็กเกิดขึ้นที่บริเวณ โยคของหัวเขียนในเชิงคุณภาพที่คล้ายกัน นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าปลายโพลยังมีความยาวเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิด EAW มากขึ้น และเมื่อกำหนด easy axis ให้อยู่ในแนวอนหรือแนวครอสแทร์คพบว่าจะช่วยลดการเกิด EAW มากกว่าการกำหนด easy axis ให้อยู่ในแนวตั้ง

นอกจากผลของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลแล้ว ยังมีอีกปัจจัยที่สำคัญคือ วัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็ก โดยในปี ค.ศ. 2005 ผู้วิจัยชื่อ Kei Hirata [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กและโครงสร้างโดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคที่ก่อให้เกิด pole erasure โดยพบว่าถ้าวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนมีค่าสนามแอนไอโซโทรปีที่สูง (H_K) จะสามารถลดการเกิด pole erasure เพราะสามารถสร้างผนังโดเมน 180° ที่ขนานไปกับหัวเขียนในแนวอน นอกจากนี้ยังพบว่าอีกหนึ่งสาเหตุของการเกิด Pole erasure คือเนื่องจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กของแอนไอโซโทรปีที่บริเวณปลายโพลโดยอิทธิพลของแมกนีโตอีลาสติก (magnetoelastic effect)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่สร้างขึ้นจากขดลวดตัวนำในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยใช้แบบจำลองไมโครแมกเนติกเพื่อศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน สำหรับขั้นตอนการศึกษาจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

การจำลองไมโครแมกเนติก

จากที่ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา ปัญหาหนึ่งที่พบในกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ได้แก่ การมีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนแม่เหล็กซึ่งจะก่อให้เกิดการเขียนข้อมูลทับซ้อนกับข้อมูลเดิมที่ต้องการเก็บบันทึกในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก นอกจากนี้การคงค้างอยู่ของสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลของหัวเขียนยังสร้างปัญหาให้กับกระบวนการผลิตด้วย โดยสนามแม่เหล็กที่ค้างอยู่ที่ปลายโพลจะไปดึงคู่ออนุภาคบนแผ่นแม่เหล็กขนาดจิ๋วมาเกาะติดที่บริเวณหัวเขียน แรงดึงดูดดังกล่าวมีขนาดสูงและไม่สามารถกำจัดออกได้ง่าย ซึ่งอนุภาคบนแผ่นดังกล่าวจะส่งผลให้หัวเขียนไม่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้

ในทางปฏิบัติการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียนสามารถศึกษาได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก [6, 8] และ time resolved scanning kerr microscopy (TRSKM) [9] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเทคนิค TRSKM ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแมกนีไทเซชันและการเคลื่อนที่ของโดเมนแม่เหล็กในหัวเขียนได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวมีความยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงานและมีผลกระทบต่อความแม่นยำของหัวเขียนแม่เหล็กที่ต้องการศึกษา โดยในงานวิจัยนี้เราใช้การจำลองทางไมโครแมกเนติกเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขดลวดตัวนำ และสนามแม่เหล็กภายนอกในกระบวนการผลิต รวมไปถึงผลกระทบจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน

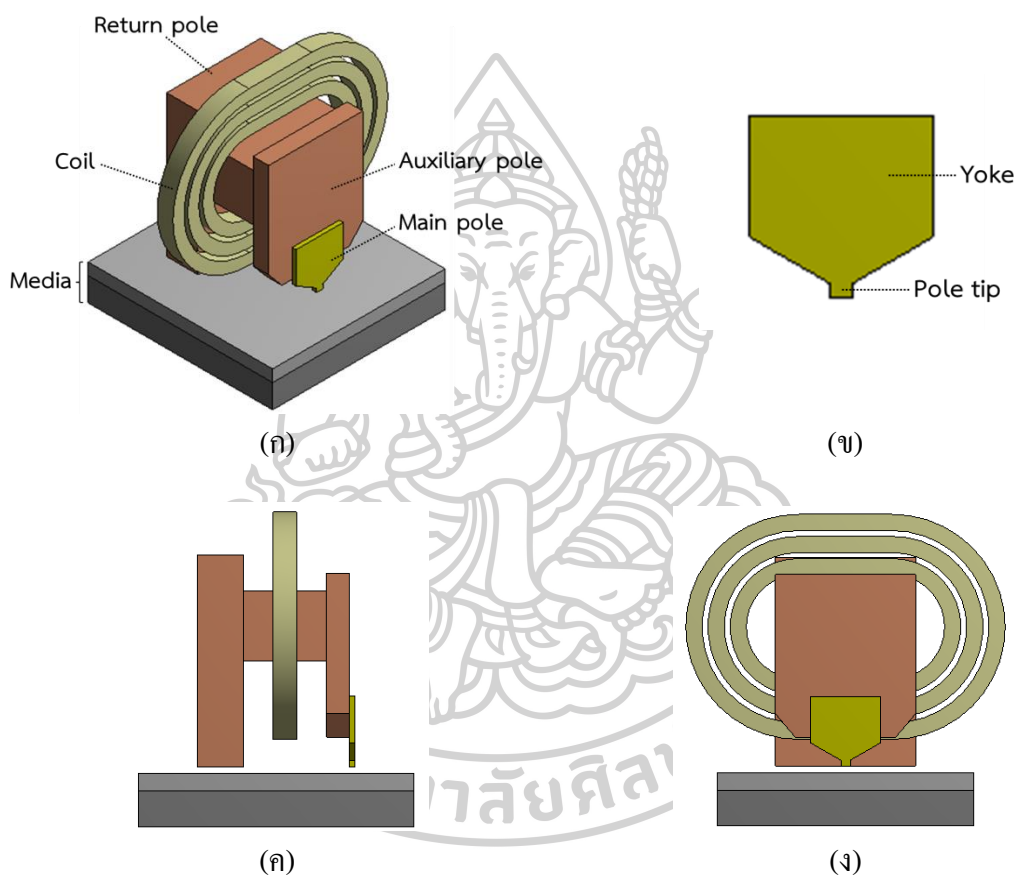
บทนี้จะอธิบายถึงวิธีการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนแม่เหล็กด้วยคอมพิวเตอร์ในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การสร้างแบบจำลองของหัวเขียน การจำลองด้วยโปรแกรม OOMMF จนถึงขั้นตอนการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลของหัวเขียน โดยในบทที่ 4 และ 5 จะกล่าวถึงผลการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากกระบวนการผลิตและผลจากสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด ตามลำดับ

3.1 การสร้างแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนแม่เหล็กด้วยโปรแกรม OOMMF

ส่วนหัวข้อนี้กล่าวถึงขั้นตอนการสร้างภาพจำลองของหัวเขียน และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF

3.1.1 ภาพจำลองของหัวเขียน

หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กจะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างสามมิติซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ (1) โพลย้อนกลับ (return pole) (2) ขดลวด (coil) (3) auxiliary pole และ (4) โพลหลัก (main pole) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) โดยในงานวิจัยนี้เราสนใจเฉพาะบริเวณ โพลหลักของหัวเขียนเพราะเป็นส่วนที่ส่งผลโดยตรงต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็ก รูปที่ 3.1 (ข) แสดงโครงสร้างของโพล หลัก ซึ่งประกอบไปด้วยโยค (yoke) และปลายโพล (pole tip)



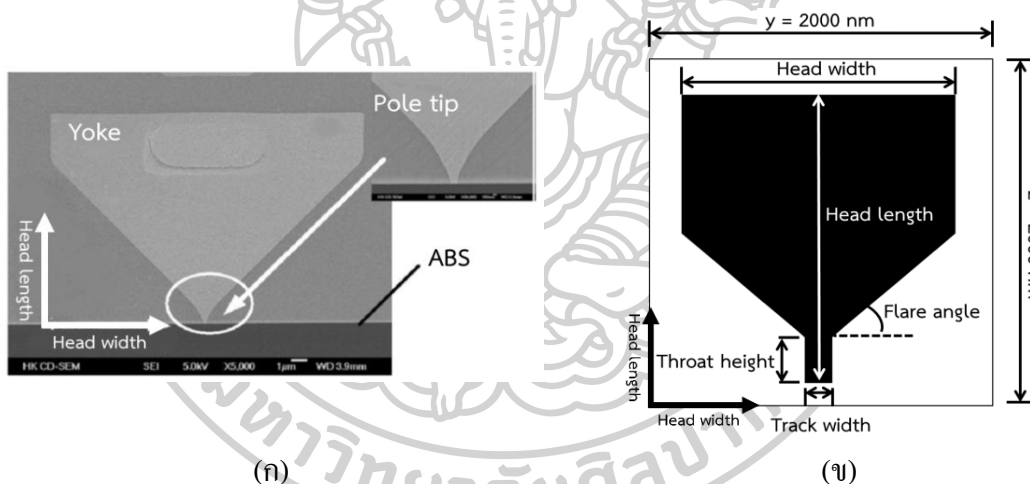
รูปที่ 3.1 หัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก (ก) ภาพหัวเขียนมุมมองสามมิติ (isometric; ISO) (ข) ภาพขยายบริเวณ โพลหลัก (ค) ภาพหัวเขียนมุมมองด้านข้าง (side view) และ (ง) ภาพหัวเขียนมุมมองด้านหน้า (front view) [11]

ดังนั้นในการจำลองทางคอมพิวเตอร์นี้ เราสนใจสร้างแบบจำลองเสมือนจริงของโพลหลักขึ้น เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน การเกิดโดเมนแม่เหล็ก และการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน รูปที่ 3.2 (ก) แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของโยคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยผู้วิจัยจะทำการลอกแบบโครงสร้างดังกล่าวด้วยโปรแกรมวาดภาพ

ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (จ) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง โดยมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ความยาวของหัวเขียนด้านกว้าง (head width) 1280 nm
- 2) ความยาวของหัวเขียนด้านยาว (head length) 1280 nm
- 3) ความยาวที่ปลายโพลของหัวเขียน (throat height) 100 nm
- 4) ความกว้างของปลายโพล (track width) 80 nm
- 5) ขนาดของมุมแฟลร์ (flare angle) 30 degree

แบบจำลองของหัวเขียนที่ออกแบบถูกบันทึกเป็นไฟล์ภาพ และระบุชื่อไฟล์ให้มีนามสกุลเป็น .ppm หรือ .bmp เช่น headfront.bmp เพื่อให้โปรแกรม OOMMF สามารถดึงไฟล์ภาพไปใช้ในการกำหนดโครงสร้างที่ต้องการจำลองด้วยไมโครแมกเนติกได้ โดยพื้นที่ในภาพจำลองจะแทนวัสดุแม่เหล็กต่างชนิดกัน

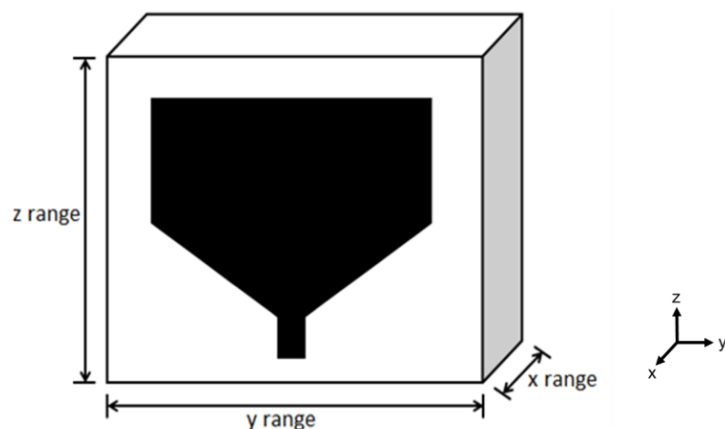


รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของหัวเขียนมุมมองด้านหน้าโดย (ก) ภาพของหัวเขียนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [6] และ (จ) ตัวอย่างภาพแบบจำลองของ โยคหัวเขียน

3.1.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียน

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ศึกษาถูกกำหนดให้มีขนาดความกว้าง (y range) ความยาว (z range) และความหนา (x range) เท่ากับ $2000 \text{ nm} \times 2000 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$ ตามลำดับ โดยให้แกน x เป็นทิศดาวน์แตรีก แกน y เป็นทิศรอสแตรีก และแกน z อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งตั้งฉากกับด้าน air-bearing surface (ABS) หรือตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กดังแสดง ในรูปที่ 3.3 ในการทดลองนี้ กำหนดให้พื้นที่สีขาวเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic) และสีดำเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material)

หัวเขียนจะถูกแบ่งพื้นที่ออกเป็นเซลล์ย่อย ๆ ขนาด $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ ดังนั้นหัวเขียนมีเซลล์ย่อยทั้งหมด $200 \times 200 \times 8 = 320,000$ เซลล์ ซึ่งความยาวแต่ละด้านของเซลล์จะต้องไม่เกินความยาวเอกซ์เซนจ์ (L_x) เพื่อให้ขนาดของแมกนีไทเซชันในแต่ละเซลล์มีค่าคงที่เท่ากับแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 รูปทรงของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [5]

| พารามิเตอร์ | ปริมาณ |
|-----------------------|--------|
| head length, (nm) | 1280 |
| head width, (nm) | 1280 |
| flare angle, (degree) | 30 |
| throat height, (nm) | 100 |
| track width, (nm) | 80 |
| head thickness, (nm) | 80 |

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [5]

| พารามิเตอร์ | ปริมาณ |
|--|---------------------|
| exchange constant (A), (J/m) | 1×10^{-11} |
| anisotropy constant (K_u), (J/m ³) | 95.5×10^3 |
| saturation magnetization (M_s), (A/m) | 1910×10^3 |

3.2 การจำลองไมโครแมกเนติกสำหรับหัวเขียนด้วยโปรแกรม OOMMF

ในขั้นตอนนี้ เราทำการจำลองไมโครแมกเนติกสำหรับหัวเขียนด้วยโปรแกรม OOMMF เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแมกนีไทเซชันที่อยู่ภายในแต่ละเซลล์ของหัวเขียน โดยใช้สมการลันเดอ-ลิฟชิตซ์ กิลเบิร์ต มีรูปสมการดังสมการที่ (3.1)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{\lambda\alpha}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (3.1)$$

สมการดังกล่าวจะอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเทียบกับเวลา ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กยังผล (\vec{H}_{eff}) เมื่อ γ คืออัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic - ratio) และ α คืออัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชัน มีอยู่ 4 ชนิด ดังนี้ สนามเอ็กซ์เชนจ์ (exchange field) สนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field) สนามดีแมกนีไทเซชัน (demagnetization field) และสนามซีแมน (zeemann field) หรือสนามแม่เหล็กภายนอก

ผู้วิจัยทำการเขียนโปรแกรมคำสั่งเพื่อใช้จำลองไมโครแมกเนติกสำหรับศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหัวเขียน โดยจำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กจากกระบวนการผลิตที่ป้อนให้กับหัวเขียน หรือเกิดจากการเหนี่ยวนำโดยขดลวดของหัวเขียน โดยตัวอย่างโปรแกรมด้านล่างแสดงตัวอย่างของชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT ในทิศทางตามแนวแกน y ให้กับหัวเขียน และหยุดการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับหัวเขียนแบบทันทีทันใดเพื่อจำลองการคงค้างของสนามแม่เหล็กเมื่อแมกนีไทเซชันเคลื่อนภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุล โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลของแมกนีไทเซชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหัวเขียนในรูปแบบไฟล์ .omf และพลังงานต่าง ๆ ในรูปแบบไฟล์ .odt

โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมดังนี้ ส่วนที่ 1 ใช้กำหนดพื้นที่ของหัวเขียนและกำหนดพื้นที่ของสี่ฉากไฟล์ภาพ ส่วนที่ 2 ใช้กำหนดขนาดของเซลล์ เพื่อแบ่งพื้นที่ของหัวเขียนออกเป็นเซลล์ย่อย ส่วนที่ 3 ใช้กำหนดพารามิเตอร์ของค่าคงที่เอ็กซ์เชนจ์ (A) ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u) และกำหนดทิศของ easy axis ส่วนที่ 4 ใช้กำหนดสนามแม่เหล็กภายนอก และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 5 ใช้คำนวณไมโครแมกเนติกด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยกำหนดให้แมกนีไทเซชันเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อ $\frac{dm}{dt} \leq 1 \text{ deg/ns}$ รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ของแมกนีไทเซชันอ้อมตัว (M_s) และทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้น (กำหนดชื่อไฟล์ของโปรแกรมให้มีนามสกุลเป็น .mif เช่น head.mif) ซึ่งแสดงรายละเอียดของโปรแกรมตามตัวอย่างด้านล่าง

```
set pi [expr 4*atan(1.0)]
```

```
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
```

```
Specify Oxs_ImageAtlas:atlas {
  xrange {0 80e-9}
  yrange {0 2000e-9}
  zrange {0 2000e-9}
  viewplane yz
  image headfront.bmp
  colormap {
    black magnetic
    white vacuum
  }
}
```

ส่วนที่ 1

ใช้กำหนดพื้นที่ของหัวเขียนที่ใช้พิจารณา

xrange คือความยาวในแนวแกน x

yrange คือความยาวในแนวแกน y

zrange คือความยาวในแนวแกน z

กำหนดระนาบของแบบจำลองหัวเขียน

กำหนดไฟล์ภาพจากที่กล่าวมาข้างต้น

กำหนดพื้นที่ของสีจากไฟล์ภาพ

โดยกำหนดให้ black สำหรับวัสดุแม่เหล็ก
และ white สำหรับวัสดุที่ไม่มี
ความเป็นแม่เหล็ก

```
Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
  cellsize {10e-9 10e-9 10e-9}
  atlas :atlas
}
```

ส่วนที่ 2

cellsize เป็นส่วนที่ใช้กำหนดขนาดของเซลล์
ย่อยที่เราทำการแบ่ง โดยมีขนาด $x \times y \times z$

```
Specify Oxs_UniformExchange {
  A 1e-11
}
```

ส่วนที่ 3

ใช้กำหนดค่าคงที่เอกซ์เชนจ์ (A)
ในหน่วย J/m

```
Specify Oxs_UniaxialAnisotropy {
  K1 { Oxs_AtlasScalarField {
    atlas :atlas
    default_value 0
    values {
      magnetic 95.5e3
      vacuum 0
    }
  }
}
```

ใช้กำหนดค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u)
ในหน่วย J/m³ และ easy axis ของแอนไอโซ-
โทรปีสำหรับวัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด

กำหนดค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสำหรับ
วัสดุแม่เหล็ก

กำหนดค่าคงที่แอนไอโซโทรปีสำหรับ
วัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก

```

}}
axis { Oxs_AtlasVectorField {
  atlas :atlas
  values {
    magnetic {0 1 0}
    vacuum {0 0 0}
  }
  norm 1.0
}}
}

```

→ กำหนดทิศทาง easy axis สำหรับวัสดุแม่เหล็ก

→ กำหนดทิศทาง easy axis สำหรับวัสดุที่ไม่มี
ความเป็นแม่เหล็ก

```

Specify Oxs_UZeeman [subst {
  multiplier [expr 0.001/$mu0]
  Hrange {
    {0 0 0 0 1000 0 1}
    {0 1000 0 0 0 0 1}
  }
}
}

```

ส่วนที่ 4

ส่วนนี้ใช้กำหนดขนาดของสนามแม่เหล็ก
ภายนอกในหน่วย mT และกำหนดทิศทาง
ของสนามแม่เหล็กภายนอก (แกน x แกน y
และแกน z) พร้อมทั้งแบ่ง stage ของสนาม
แม่เหล็กเป็นช่วงย่อย ๆ

```

}}

```

```

Specify Oxs_Demag {}

```

→ เป็นเทอมมาตรฐานของพลังงานดีแมกนี-
ไทเซชัน โดยที่ เริ่มต้นควรจะระบุสตริง
ว่าง ซึ่งทั่วไปเขียนแทนด้วย {}

```

Specify Oxs_RungeKuttaEvolve:evolve {
  alpha 1
}

```

→ เข้าสู่ภาวะสมดุลเร็วหรือช้า โดยมีค่าอยู่
ระหว่าง 0 - 1

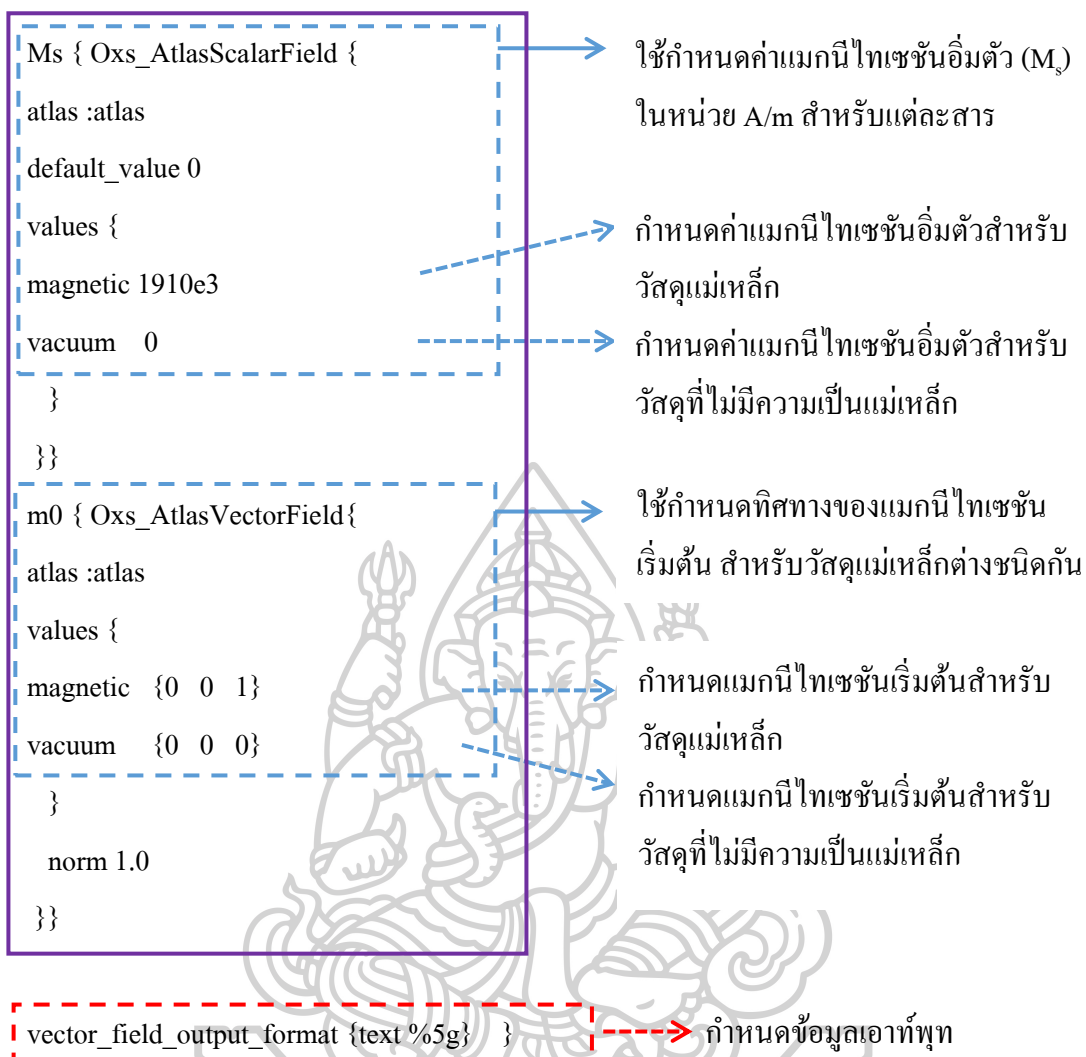
```

Specify Oxs_TimeDriver {
  basename imageatlas
  evolver :evolve
  stopping_dm_dt 1
  mesh :mesh
}

```

ส่วนที่ 5

→ กำหนดค่าที่ใช้พิจารณาว่าระบบจะเข้าสู่
สมดุลเมื่อ $\frac{dm}{dt} \leq 1 \text{ deg/ns}$

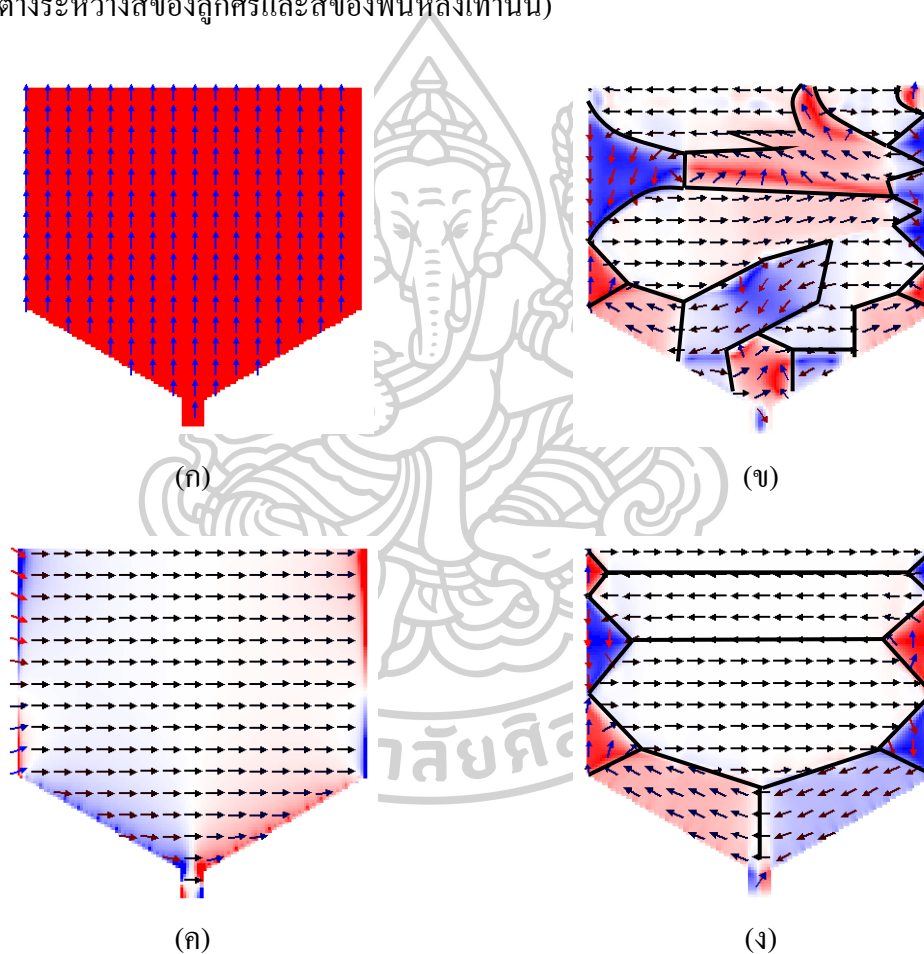


3.3 การวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม OOMMF

ผลที่ได้จากการจำลองไมโครแมกเนติกประกอบไปด้วยข้อมูลของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนในแนวแกน x y และ z โดยเราจะเอาข้อมูลของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่ง (M_x , M_y , M_z) มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากนั้นตัดเอาข้อมูลที่เป็นเวกเตอร์เฉพาะบริเวณปลายโพลเพื่อศึกษาว่าแมกนีไทเซชันที่บริเวณปลายโพลมีทิศทางอย่างไร นอกจากนี้ยังมีข้อมูลของพลังงานต่าง ๆ ได้แก่ พลังงานรวม พลังงานเอ็กซ์เชนจ์ พลังงานแอนไอโซโทรปี พลังงานซีแมน และพลังงานดีแมกนีไทเซชัน เป็นต้น พลังงานที่เราสนใจคือ พลังงานดีแมกนีไทเซชันซึ่งบ่งบอกถึงฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากการรั่วไหลของพลังงานภายในหัวเขียน

3.3.1 ผลที่ได้จากโปรแกรม OOMMF

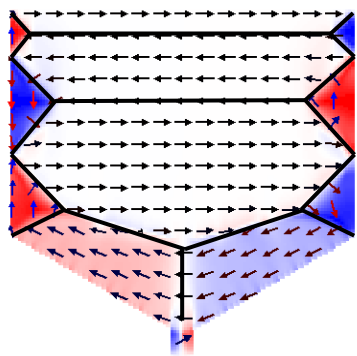
ผลจากการจำลองไมโครแมกเนติกสำหรับหัวเขียนแสดงดังรูปที่ 3.4 เมื่อลูกศรแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนบนระนาบ yz ที่ความหนา $x = 40 \text{ nm}$ โดยที่ลูกศรสีแดงคือแมกนีไทเซชันในทิศ $-z$ ลูกศรสีน้ำเงินคือแมกนีไทเซชันในทิศ $+z$ และลูกศรสีดำคือแมกนีไทเซชันในทิศอื่น ๆ ตามลำดับ ในส่วนของพื้นหลังก็แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันเช่นเดียวกับลูกศร โดยกำหนดให้พื้นที่สีแดงหมายถึงแมกนีไทเซชันมีทิศ $+z$ พื้นที่สีน้ำเงินหมายถึงแมกนีไทเซชันในทิศ $-z$ และพื้นที่สีขาวหมายถึงแมกนีไทเซชันในทิศอื่น ๆ (ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเปรียบต่างระหว่างสีของลูกศรและสีของพื้นหลังเท่านั้น)



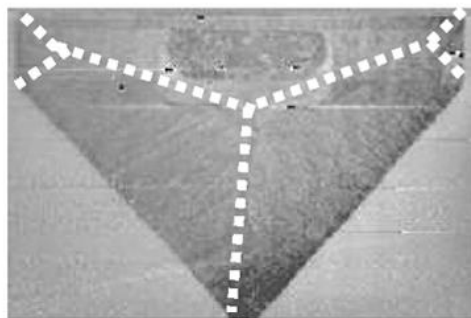
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนด้วยโปรแกรม OOMMF โดย (ก) สภาวะเริ่มต้นยังไม่มีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียน (ข) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียน (ค) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล และ (ง) แมกนีไทเซชันของระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหลังหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียน

จากรูปที่ 3.4 (ก) เป็นช่วงเริ่มต้นที่ยังไม่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอก โดยกำหนดแมกนีไทเซชันมีทิศเริ่มต้นอยู่ในแนวแกน +z เพื่อให้แมกนีไทเซชันเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้นหรือเพื่อลดเวลาในการจำลอง จากนั้นเริ่มมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) สังเกตได้ว่าแมกนีไทเซชันเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง โดยพยายามเบนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา $12.8 \mu\text{s}$ เราจะเห็นว่าแมกนีไทเซชันจะมีทิศเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก (ทิศ y) แสดงดังรูปที่ 3.4 (ค) และเมื่อหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียน จากนั้นรอให้แมกนีไทเซชันเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่งที่เวลา $32.8 \mu\text{s}$ พบว่าแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโดเมนแม่เหล็กดังรูปที่ 3.4 (ง)

โดยเราสามารถพิจารณาโดเมนแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 3.5 (ก) สังเกตได้ว่าที่บริเวณโยคของหัวเขียนมีโดเมนแม่เหล็กลักษณะเป็นโดเมนปิดหลาย ๆ โดเมน โดเมนแม่เหล็กนี้จะส่งผลให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งออกจากบริเวณ โยคของหัวเขียน นั่นก็หมายความว่าภายในหัวเขียนมีการรั่วไหลของพลังงานเกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงสนใจ พลังงานดีแมกนีไทเซชันเพื่อใช้ศึกษาการรั่วไหลของพลังงานภายในหัวเขียน ซึ่งจากการทดลองเราพบว่าหัวเขียนในรูปที่ 3.5 (ก) มีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันเท่ากับ $5.91 \times 10^{-16} \text{ J}$ แสดงว่าที่บริเวณ โยคของหัวเขียนมีการรั่วไหลของพลังงานสูง ส่งผลทำให้มีการคงค้างของสนามแม่เหล็กสูงตามไปด้วย



(ก)

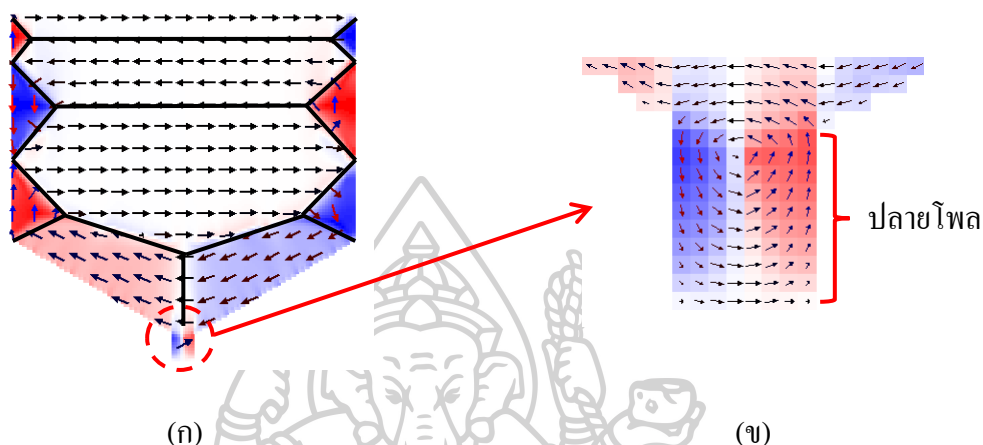


(ข)

รูปที่ 3.5 โดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับหัวเขียน โดย (ก) ภาพจากการจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF และ (ข) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

นอกจากนี้ เมื่อนำผลจากการจำลองไมโครแมกเนติกดังในรูปที่ 3.5 (ก) มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (MFM) [6] ดังในรูปที่ 3.5 (ข) พบว่ามีโดเมนแม่เหล็กเกิดขึ้นที่บริเวณ โยคของหัวเขียนในเชิงคุณภาพที่คล้ายกัน

จากนั้น เราจะตัดเอาข้อมูลที่เป็นเวกเตอร์เฉพาะบริเวณปลายโพลของหัวเขียนดังรูปที่ 3.6 (ข) เพื่อใช้ศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพล โดยนำเอาข้อมูลของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่ง (M_x M_y M_z) มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลจะไปรบกวนข้อมูลที่แผ่นบันทึกข้อมูลโดยตรง แสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.6 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน โดย (ก) บริเวณหัวเขียน (ข) บริเวณปลายโพลของหัวเขียน

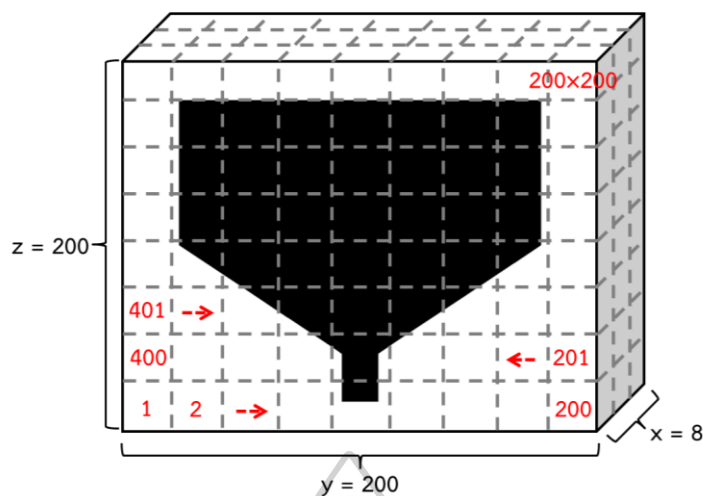
3.3.2 คำนวณหาสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนจากผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม OOMMF

การคำนวณหาสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน สามารถคำนวณได้จากค่าอ้อมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z (normalized average moment, M_z/M_0) เนื่องจากแมกนีไทเซชันในแนวแกน z จะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งไปรบกวนการเก็บข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ดังนั้นเราจึงเลือกพิจารณาเฉพาะแมกนีไทเซชันในแนวแกน z

ข้อมูลของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนจะอยู่ในรูปของ M_x M_y M_z โดยมีจำนวนเท่ากับจำนวนเซลล์ที่เราทำการแบ่งพื้นที่ที่หัวเขียน จากนั้นเราจะทำการดึงข้อมูลของแมกนีไทเซชัน M_z มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังตัวอย่างที่ 3.1

ตัวอย่าง 3.1 คำนวณค่าแมกนีไทเซชัน (M_z) เฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz

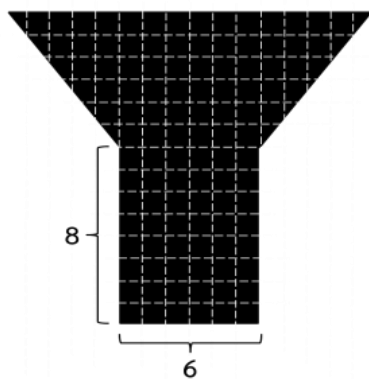
สมมติว่าในการจำลอง พื้นที่ของหัวเขียนที่ใช้ศึกษามีขนาด $L_x = 80$ nm $L_y = 2000$ nm และ $L_z = 2000$ nm จากนั้นแบ่งพื้นที่ของหัวเขียนออกเป็นเซลล์ย่อย ๆ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ nm³ ดังนั้นจะมีจำนวนเซลล์ในแนวแกน $x = 8$ เซลล์ แนวแกน $y = 200$ เซลล์ และแนวแกน $z = 200$ เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งเซลล์ในแบบจำลองหัวเขียน

จากนั้น เราจะทำการดึงข้อมูลของแมกนีไทเซชัน M_x, M_y, M_z เพื่อจัดระเบียบตำแหน่งให้ตรงกับตำแหน่งเซลล์ภายในหัวเขียน โดยข้อมูลของแมกนีไทเซชัน ข้อมูลที่ 1-8 ถูกจัดเรียงให้อยู่ตามแนวแกน x ในตำแหน่งเซลล์ที่ 1 ของระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 3.7 และข้อมูลที่ 9-16 จะอยู่ในตำแหน่งเซลล์ที่ 2 ของระนาบ yz ดังนั้นแสดงว่าตำแหน่งเซลล์ถัดไปในระนาบ yz คือ ข้อมูลแรกของเซลล์จะเป็นข้อมูลที่ถัดจากตัวสุดท้ายของตำแหน่งก่อนหน้า และข้อมูลตัวสุดท้ายจะเท่ากับตำแหน่งเซลล์ $\times 8$ จากนั้นทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าข้อมูลของแมกนีไทเซชันจะครบทุกตำแหน่งของหัวเขียน (200×200 เซลล์)

เมื่อจัดระเบียบตำแหน่งของข้อมูลแมกนีไทเซชันเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการคำนวณหาค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz จากนั้นเราเลือกเอาข้อมูลของแมกนีไทเซชันเฉพาะที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนมาคำนวณหาค่าแอมพลิจูดของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z (M_z/M_y) เพื่อใช้ศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน แสดงดังตัวอย่างที่ 3.2



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งเซลล์บริเวณปลายโพลของหัวเขียน

ตัวอย่าง 3.2 การเลือกข้อมูลของแมกนีไทเซชันที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน

สมมติว่าในการจำลอง พื้นที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน มีขนาดความกว้าง = 60 nm และความสูง = 80 nm พื้นที่ของหัวเขียนถูกออกเป็นเซลล์ย่อย ๆ ขนาดกว้าง 10 nm และยาว 10 nm ดังนั้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียนจะมีเซลล์ในแนวด้านกว้าง = 6 เซลล์ แนวด้านยาว = 8 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ดังนั้นจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่ต้องนำมาคำนวณหาแมกนีไทเซชันเฉลี่ย คือ 48 เซลล์

เนื่องจากข้อมูลของแมกนีไทเซชันที่ได้จากการจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF มีความซับซ้อนและมีจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรม MATLAB™ เพื่อช่วยในการคำนวณค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz และคำนวณค่านอมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z ที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ใช้กำหนดโครงสร้างของหัวเขียน ส่วนที่ 2 ใช้คำนวณค่าแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz และใช้คำนวณค่านอมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z ที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน ส่วนที่ 3 ใช้พล็อตแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในระนาบ yz ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตัวอย่างด้านล่าง

%open all file on this folder

clear all

```

Lx = 80;
Ly = 2000;
Lz = 2000;

cellsize = 10;

cellx_num = Lx/ cellsize
celly_num = Ly/ cellsize
cellz_num = Lz/ cellsize

```

ส่วนที่ 1

→ กำหนดขนาดพื้นที่ทั้งหมดของหัวเขียน

→ ขนาดของเซลล์ย่อย

→ จำนวนเซลล์ทั้งหมดที่ถูกแบ่งออกเป็นเซลล์ย่อย ๆ ในแนวแกน x y และ z

```

x = cellx_num;
y = celly_num;
z = cellz_num;

```

```
name=dir('imageatlas-Oxs_TimeDriver-Magnetization-02-0024842.omf');
```

```
fid = fopen('magnetization.txt','wt');
```

```
fprintf(fid,'mx my mz\n');
```

```
A = importdata(name.name, ',3
```

ชื่อไฟล์ข้อมูลที่ต้องการนำมาคำนวณ
แมกนีไทเซชันเฉลี่ย (ไฟล์ .omf)

ส่วนที่ 2

ใช้คำนวณหาค่าเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z ของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz โดยแสดงรายละเอียดในหน้าถัดไป

```
for i=1:y*z
```

```
    mtot_x(i) = 0;
```

```
    mtot_y(i) = 0;
```

```
    mtot_z(i) = 0;
```

```
    for j=1:x
```

```
        m = A.data;
```

```
        mtot_x(i)= mtot_x(i)+m(j+((i-1)*x),1);
```

```
        mtot_y(i)= mtot_y(i)+m(j+((i-1)*x),2);
```

```
        mtot_z(i)= mtot_z(i)+m(j+((i-1)*x),3);
```

```
    end
```

```
    mx_mean = (mtot_x(i)/x);
```

```
    my_mean = (mtot_y(i)/x);
```

```
    mz_mean = (mtot_z(i)/x);
```

```
    mx_n(i) = mx_mean ;
```

```
    my_n(i) = my_mean ;
```

```
    mz_n(i) = mz_mean ;
```

```
end
```

```
for i=1:200
```

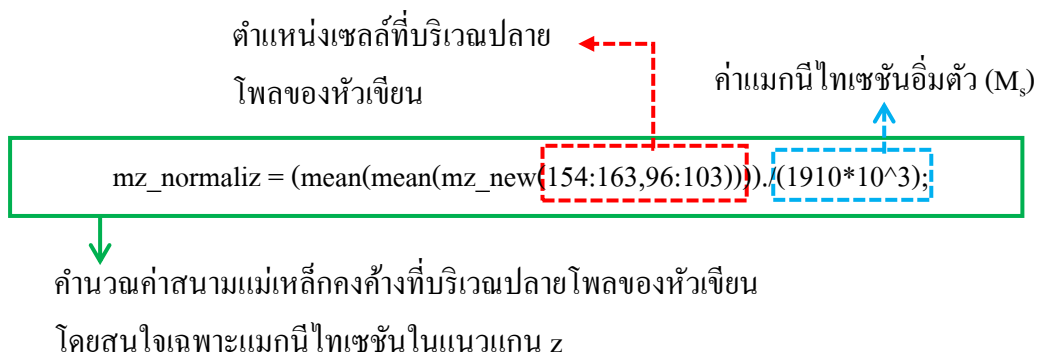
```
    mz_new(201-i,:)= mz_n(1+200*(i-1):200*i);
```

```
end
```

ระบุตำแหน่งข้อมูลของแมกนีไทเซชัน และทำการบวกข้อมูลของแมกนีไทเซชันในตำแหน่งที่ต้องการ

จากไฟล์ข้อมูลค่าของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x y และ z จะอยู่คอลัมน์ที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

แมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz



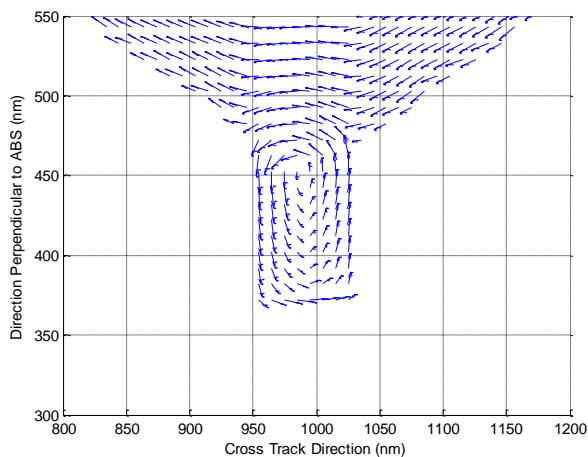
ส่วนที่ 3 พล็อตแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในระนาบ yz

```
for i=1:200
    mx_new(i,:)= mx_n(1+200*(i-1):200*i);
    my_new(i,:)= my_n(1+200*(i-1):200*i);
    mz_new(i,:)= mz_n(1+200*(i-1):200*i);
end
[Y Z] = meshgrid(0:2000/199:2000,0:2000/199:2000);
X = Z*0 ;
quiver3(X,Y,Z,mx_new,my_new,mz_new,1);
xlabel('Direction Perpendicular to ABS (nm)');
ylabel('Cross Track Direction (nm)');
hold on
view(90,0)
axis ([-40 40 300 1700 300 1700])
hold off
fclose(fid);
display('finish');
```

→ สร้างระบบแกนที่จะใช้พล็อต

→ คำสั่งพล็อตแมกนีไทเซชัน

เมื่อนำแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x มาพล็อตให้อยู่ในระนาบ yz ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเราจะพิจารณาแมกนีไทเซชันในรูปที่ 3.9 เพื่อคุณลักษณะและทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่งที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน สังเกตเห็นว่าแมกนีไทเซชันที่บริเวณปลายโพลมีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบวงปิดส่งผลให้แมกนีไทเซชันบริเวณนี้หักล้างกันหมด ซึ่งสามารถดูได้จากค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่เราคำนวณได้



รูปที่ 3.9 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน

ดังนั้น ค่าอมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z บริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน โดยค่าที่คำนวณได้จะแสดงเป็นค่า ๆ หนึ่ง สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งแสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในแนวแกน $+z$ และแกน $-z$ โดยในการทดลองนี้เรากำหนดค่าอมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z ที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนได้เท่ากับ -0.00364 นั่นก็หมายความว่าที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนยังคงมีการคงค้างของสนามแม่เหล็กอยู่และมีทิศพุ่งไปในแนวแกนลบ



บทที่ 4

การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากกระบวนการผลิต

การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกในระหว่างกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและจากกระบวนการขจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน ซึ่งแสดงผลเป็นค่าแอมพลิจูดของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z ที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวเขียน อาทิเช่น ความยาวของปลายโพล ขนาดของหัวเขียนบริเวณ โยค และขนาดของมุมแฟลร์ตามลำดับ นอกจากนี้การกำหนดทิศทาง easy axis และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็กยังส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กอีกด้วย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียนอันเนื่องมาจาก (1) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหัวเขียนบริเวณปลายโพล และบริเวณ โยค (2) อิทธิพลของทิศทาง easy axis (3) อิทธิพลของกระบวนการขจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน และ (4) วัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้ทำหัวเขียน เช่น NiFe และ CoFeNi เป็นต้น

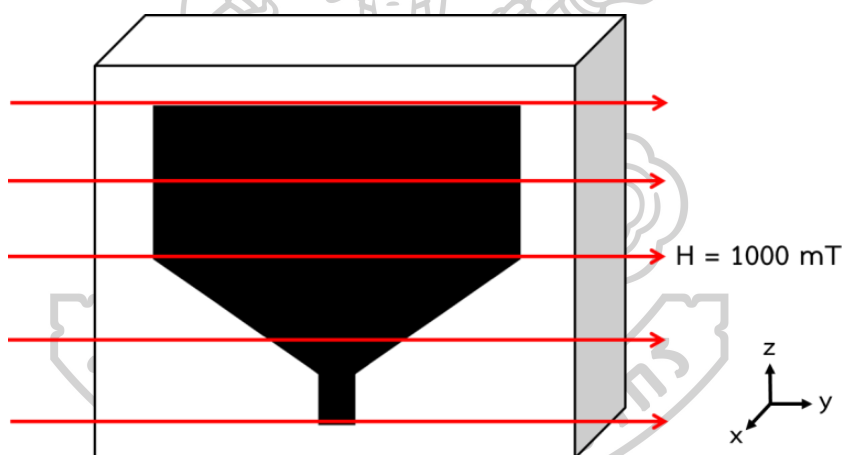
โดยในบทนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอขั้นตอนการศึกษาสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก รวมถึงแบบจำลองของหัวเขียนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็ก ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลจากการจำลองไมโครแมกเนติกและวิเคราะห์ผลการทดลอง ทั้งนี้หัวเขียนที่มีโครงสร้างและพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สามารถเป็นแนวทางเพื่อการพัฒนาหัวเขียนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

4.1 ขั้นตอนการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลเนื่องจากกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

กระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กมีขั้นตอนที่ต้องทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่า magnetic field initialization หรือกระบวนการ MFI โดยในกระบวนการ MFI สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT จะถูกป้อนให้กับหัวบันทึก

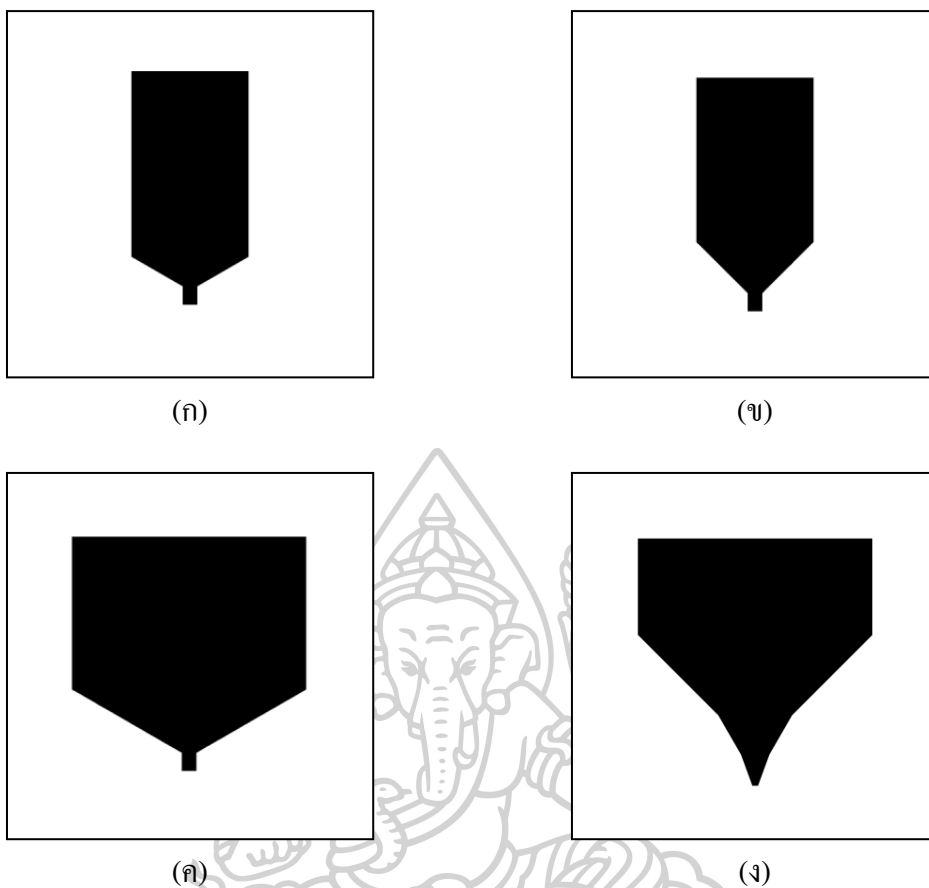
ข้อมูลแม่เหล็กในทิศทางครอสแตรีกหรือแนวแกน y [22] เพื่อไปจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันเริ่มต้นของหัวอ่านในชั้นพีไรให้มีทิศทางตามที่ต้องการ ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อความเป็นแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลของหัวเขียนด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราไม่ต้องการให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างอยู่ที่บริเวณ โพลของหัวเขียนระหว่างกระบวนการผลิต เพราะจะส่งผลให้มีโอกาสที่อนุภาคปนเปื้อนจำพวกเหล็กหรือนิกเกิลที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรือในอากาศไปเกาะติดบริเวณปลายโพล ส่งผลให้หัวบันทึกข้อมูลเสียหายหรือใช้งานไม่ได้

จากปัญหาที่กล่าวมา ในงานวิจัยนี้เราจะศึกษาผลกระทบของกระบวนการ MFI ต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลัก โดยการจำลองกระบวนการ MFI ด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT ให้กับแบบจำลองของหัวเขียนในทิศทางตามแนวแกน y (แนวครอสแตรีก) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นรอกกระทั่งแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก แล้วปล่อยให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหรือเรียกว่า สถานะแม่เหล็กคงค้าง



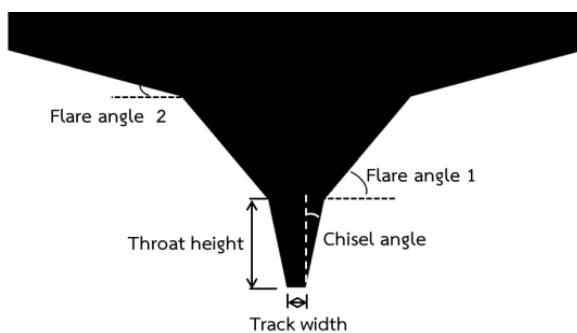
รูปที่ 4.1 จำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการ MFI โดยลูกศรสีแดงแสดงทิศทางทำให้สนามแม่เหล็กภายนอก

แบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในการศึกษาจะมีรูปทรงที่แตกต่างกันอยู่ 4 รูปทรง โดยมีแบบจำลองของหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่ายอยู่ 3 รูปทรง คือแบบที่ 1-3 ดังรูปที่ 4.2 (ก) 4.2 (ข) และ 4.2 (ค) ตามลำดับ และแบบจำลองของหัวเขียนมีขนาดใกล้เคียงกับหัวเขียนจริงดังในรูปที่ 4.2 (ง) ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ภาพแบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติก โดย (ก) แบบจำลองแบบที่ 1 (ข) แบบจำลองแบบที่ 2 (ค) แบบจำลองแบบที่ 3 และ (ง) แบบจำลองแบบที่ 4 ตามลำดับ

สำหรับแบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 4 ที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง จะมีองค์ประกอบเพิ่มเติม คือ มีมุมแฟลร์สองมุมและมีมุมที่บริเวณปลายโพลด้วย ซึ่งเรียกว่ามุม chisel ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และค่าพารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบของหัวเขียนบริเวณปลายโพล สำหรับแบบจำลองของหัวเขียนแบบที่ 4

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้จำลองไมโครแมกเนติก [5, 6]

| พารามิเตอร์ | แบบจำลองของหัวเขียน | | | |
|------------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| | แบบที่ 1 | แบบที่ 2 | แบบที่ 3 | แบบที่ 4 |
| head length/(nm) | 1280 | 1280 | 1280 | 1330 |
| head width/(nm) | 640 | 640 | 1280 | 1280 |
| flare angle 1/(degree) | 30 | 45 | 30 | 60 |
| flare angle 2/(degree) | - | - | - | 45 |
| chisel angle/(degree) | 0 | 0 | 0 | 20 |
| throat height/(nm) | 100 | 100 | 100 | 150 |
| track width/(nm) | 80 | 80 | 80 | 30 |
| head thickness/(nm) | 80 | 80 | 80 | 80 |

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์วัสดุแม่เหล็กตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน [5]

| พารามิเตอร์ | ปริมาณ |
|--|-----------------------|
| exchange constant (A), (J/m) | 1×10^{-11} |
| anisotropy constant (K_u), (J/m ³) | $0, 95,5 \times 10^3$ |
| easy axis | y, z |
| saturation magnetization (M_s), (A/m) | 1910×10^3 |
| Initial magnetization | z |

4.2 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนและวิเคราะห์ผล

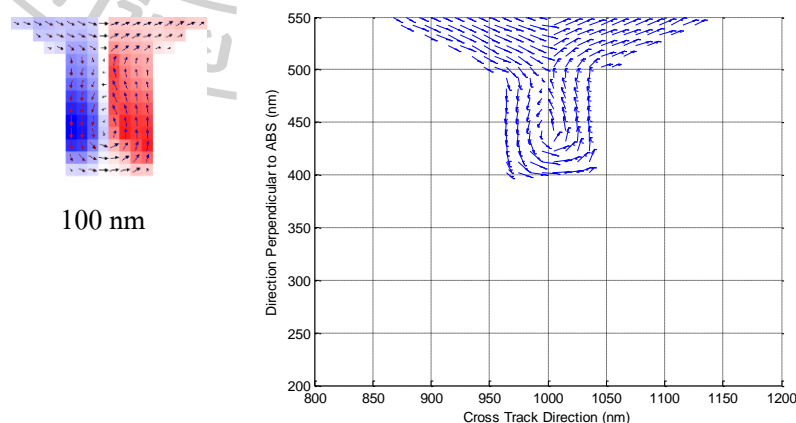
4.2.1 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย

ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 กล่าวไว้ว่า ขนาดความกว้าง ความยาว และรูปทรงของวัสดุแม่เหล็กจะส่งผลกระทบต่อรูปร่างของโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นและสนามแม่เหล็กกลับล้างสภาพแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะส่งผลกระทบต่อแรงค้ำของสนามแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นในหัวข้อนี้ เราสนใจศึกษาการค้ำของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของปลายโพล (throat height, T_h) และรูปทรงของโพล โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของมุมแฟลร์และความกว้างและความยาวของหัวเขียนแม่เหล็ก โดยในเบื้องต้นเราเลือกศึกษาโครงสร้างของหัวเขียนอย่างง่ายเสียก่อน เพื่อสร้างความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

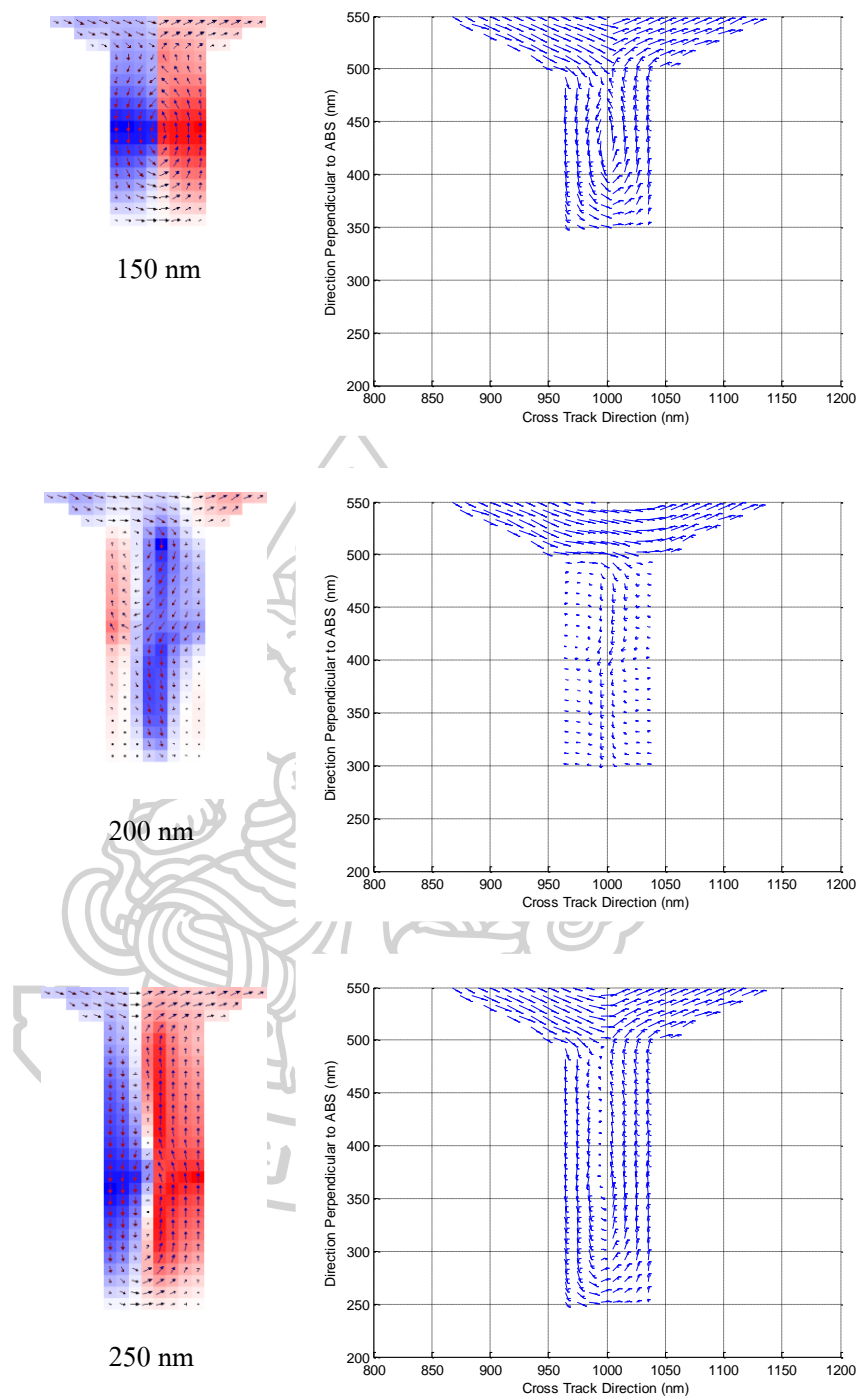
4.2.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลของหัวเขียน

ในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลต่อการคงตัวของสนามแม่เหล็ก โดยเลือกใช้แบบจำลองแบบที่ 1 และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวปลายโพลของหัวเขียน (throat height, T_p) ตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm และกำหนดขนาดของรูปทรงของแบบจำลองและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยในที่นี้เรายังไม่สนใจผลของแอนไอโซโทรปีอันเนื่องมาจากโครงสร้างของผลึก ($K_u = 0 \text{ J/m}^3$) เพื่อดูผลกระทบจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรง (shape anisotropy) เท่านั้น แมกนีไทเซชันเริ่มต้นถูกกำหนดให้อยู่ในทิศตามแนวแกน z เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วและลดเวลาในการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังในรูปที่ 4.4 โดยเราจะยกตัวอย่างผลการจำลองของหัวเขียนเมื่อมีความยาวปลายโพลเท่ากับ 100 nm 150 nm 200 nm และ 250 nm มานำเสนอแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) 4.4 (ข) 4.4 (ค) และ 4.4 (ง) ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในลักษณะที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน เมื่อภาพทางด้านซ้ายมือเป็นภาพที่ได้จากโปรแกรม OOMMF โดยที่ลูกศรแสดงแมกนีไทเซชันในแต่ละตำแหน่งของหัวเขียนบริเวณปลายโพล ลูกศรสีแดงคือแมกนีไทเซชันที่มีทิศ $-z$ ลูกศรสีน้ำเงินคือแมกนีไทเซชันที่มีทิศ $+z$ และลูกศรสีดำคือแมกนีไทเซชันมีทิศอื่น ๆ ตามลำดับ สำหรับสีของพื้นหลังก็แสดงทิศของแมกนีไทเซชันเช่นเดียวกัน โดยกำหนดให้พื้นสีแดงหมายถึงแมกนีไทเซชันมีทิศ $+z$ พื้นสีน้ำเงินหมายถึงแมกนีไทเซชันมีทิศ $-z$ และพื้นสีขาวหมายถึงแมกนีไทเซชันในทิศอื่น ๆ ตามลำดับ ในส่วนของภาพทางด้านขวามือเป็นการพล็อตแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz



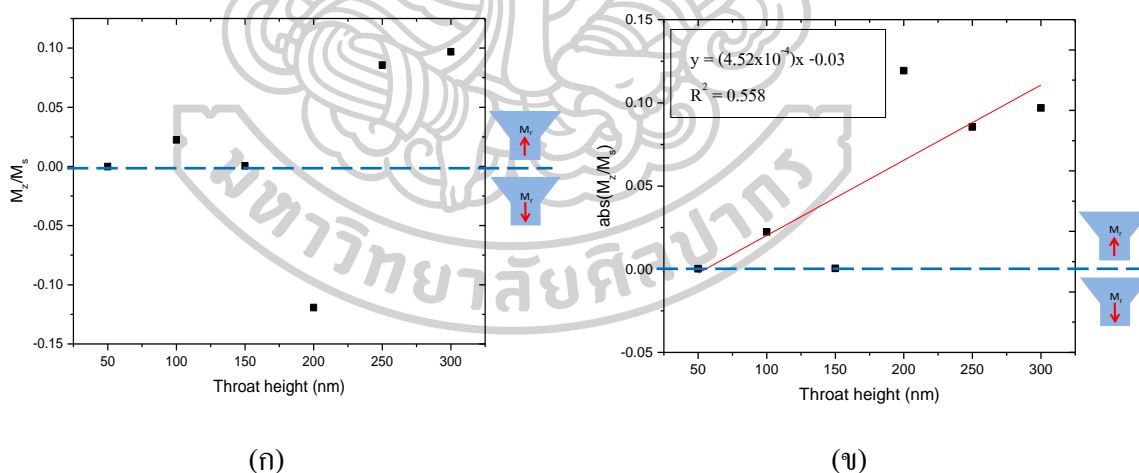
รูปที่ 4.4 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนในสถานะคงตัว ซ้ายเป็นภาพของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวาเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียน ในสถานะคงค้าง ซ้ายเป็นภาพของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวาเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 เราจะสังเกตเห็นว่าหัวเข็ญที่มีความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันพยายามจัดเรียงตัวไปตามแนวยาวมากกว่าแนวสั้นของปลายโพล ทั้งนี้เนื่องมาจากในธรรมชาติแมกนีไทเซชันจะพยายามจัดเรียงตัวให้ขนานกับพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงดั้งอธิบายไว้แล้วในบทที่ 2

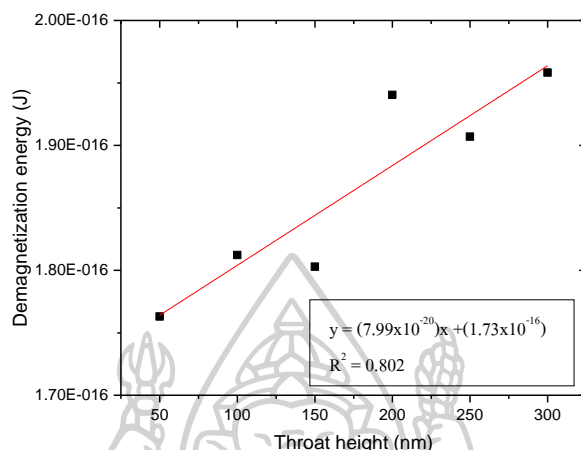
ดังนั้นเมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z ดังอธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 พบว่าเมื่อปลายโพลมีความยาวเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยรูปที่ 4.5 (ก) เป็นการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลโดยสนใจทั้งขนาดและทิศทาง แต่การคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลนั้นมีโอกาสเป็นไปได้ทั้งลบและบวก ดังนั้นเราจึงคำนวณสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลโดยสนใจเฉพาะขนาดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) จากกราฟในรูปที่ 4.5 (ข) พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยทุก ๆ ความยาวของปลายโพลที่เพิ่มขึ้น 50 nm จะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลเพิ่มขึ้น 4.52×10^{-4} แต่สำหรับกรณีที่หัวเข็ญมีความยาวปลายโพลขนาด 150 nm ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลง เนื่องจากความยาวของปลายโพลมีขนาดพอเหมาะ (เป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (l_{ex})) จึงทำให้เกิดผนังโดเมน (domain wall) แบบปิดขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเมื่อหัวเข็ญมีความยาวปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ (ข) ค่าสัมบูรณ์ของแมกนีไทเซชัน

จากนั้นพิจารณาการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กหรือพลังงานภายในหัวเข็ญจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเข็ญดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่ามีสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น โดยทุก ๆ ความยาวของปลายโพลที่เพิ่มขึ้น 50 nm จะทำให้ค่าสนามดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ยเพิ่มขึ้น

7.99×10^{-20} J โดยสำหรับกรณีที่หัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาด 150 nm และ 200 nm พบว่ามีค่าสนามแม่เหล็กนิไทเซชันเฉลี่ยที่ลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลลดลงและเพิ่มขึ้นเมื่อปลายโพลยาว 150 nm และ 200 nm ตามลำดับ

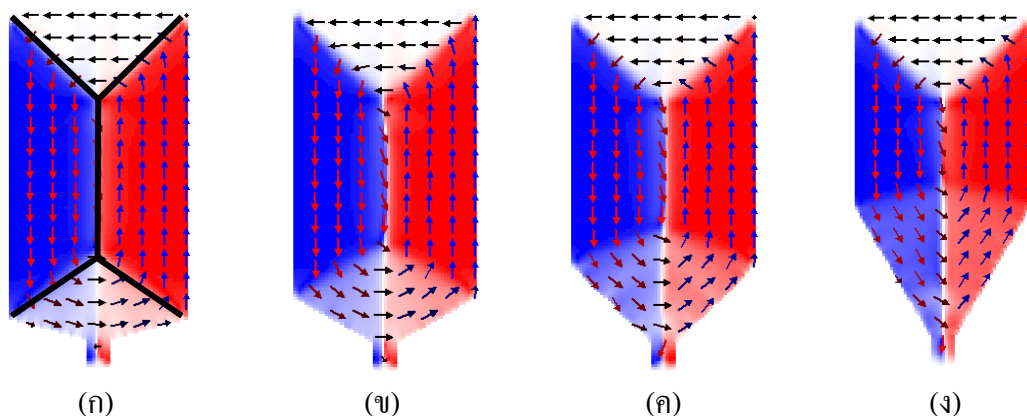


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกเนไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm

4.2.1.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณโคม

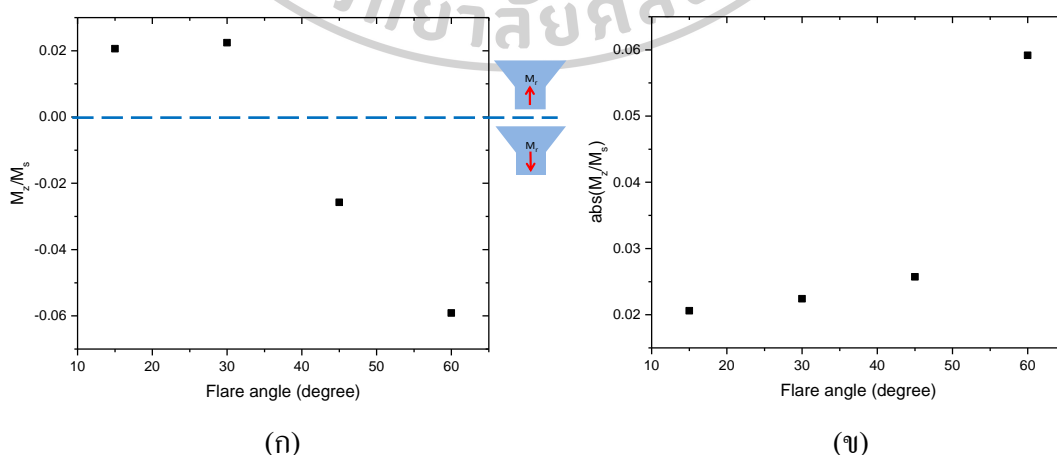
นอกจากความยาวปลายโพลของหัวเขียนที่ส่งผลต่อการคงค้างสนามแม่เหล็กแล้วการกำหนดโดเมนแม่เหล็กบริเวณ โคมก็มีผลต่อการคงค้างสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลได้เหมือนกัน โดยที่โดเมนแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ โคมพุ่งลงสู่ปลายโพล ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบรูปทรงของโคมเพื่อกำหนดรูปทรงโดเมนแม่เหล็กเพื่อช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ โคม โดยเฉพาะขนาดของมุมแฟลร์และความยาวของหัวเขียนทั้งด้านกว้าง (head width) และด้านยาว (head length)

ในการจำลองนี้ สำหรับการศึกษาค้นคว้าของขนาดมุมแฟลร์ เราเลือกแบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ 30° และ 45° ตามลำดับ (กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหัวเขียนดังในตารางที่ 4.1) นอกจากนี้เรายังทำการลดและเพิ่มขนาดของมุมแฟลร์เพื่อเปรียบเทียบให้เห็น ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นคือมุมแฟลร์ขนาด 15° และ 60° กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.1.1 ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 4.7



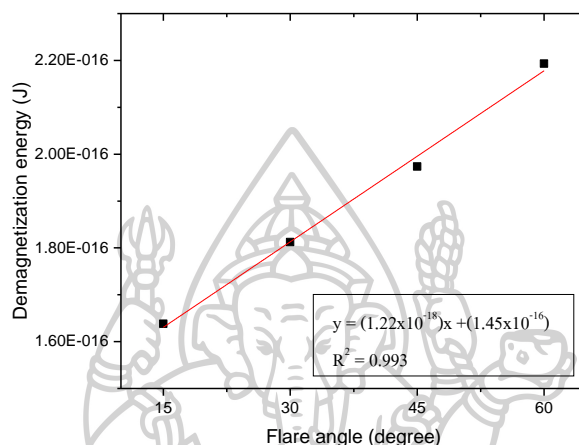
รูปที่ 4.7 โดเมนแม่เหล็กบริเวณโยคของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดย (ก) มุมแฟลร์ขนาด 15° (ข) มุมแฟลร์ขนาด 30° (ค) มุมแฟลร์ขนาด 45° และ (ง) มุมแฟลร์ขนาด 60°

จากรูปที่ 4.7 เราจะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณ โยคของหัวเขียนในแต่ละแบบจำลองเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวตั้งที่แตกต่างกันไป โดยมีโครงสร้างโดยรวมเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่บริเวณมุมแฟลร์และมีลักษณะเป็น โดเมนปิดเกือบเหมือนกันทั้ง 4 กรณี แบบจำลองของหัวเขียนทั้ง 4 รูปทรงมีขนาดทั้งหมดเท่ากันยกเว้นขนาดมุมแฟลร์ที่ต่างกัน โดยหัวเขียนที่มีขนาดมุมแฟลร์เท่ากับ 45° และ 60° จะมีแนวโน้มให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณโยคพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่า หรือพลังภายในหัวเขียนมีโอกาสรั่วไหลได้มากกว่า สามารถสังเกตได้จากผนังโดเมนในแนวตั้งที่ขยายไปยังด้านล่างบริเวณมุมแฟลร์ดังในรูปที่ 4.7 (ค) และ 4.7 (ง) ตามลำดับ แต่ในทางตรงกันข้ามหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° และ 30° ดังรูปที่ 4.7 (ก) และ 4.7 (ข) ตามลำดับ จะช่วยป้องกันไม่ให้ผนังโดเมนขยายไปยังบริเวณปลายโพลได้มากกว่าจึงช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ โยคพุ่งลงสู่ปลายโพลได้มากกว่า



รูปที่ 4.8 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60° โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ (ข) ค่าสัมบูรณ์ของแมกนีไทเซชัน

เมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแม่เหล็กในแกน z พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์กว้างขึ้นส่งผลให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์กว้างจะส่งผลทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างบริเวณ โขกพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่าหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์แคบ ๆ โดยเราสามารถดูได้จากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันดังแสดงในรูปที่ 4.9



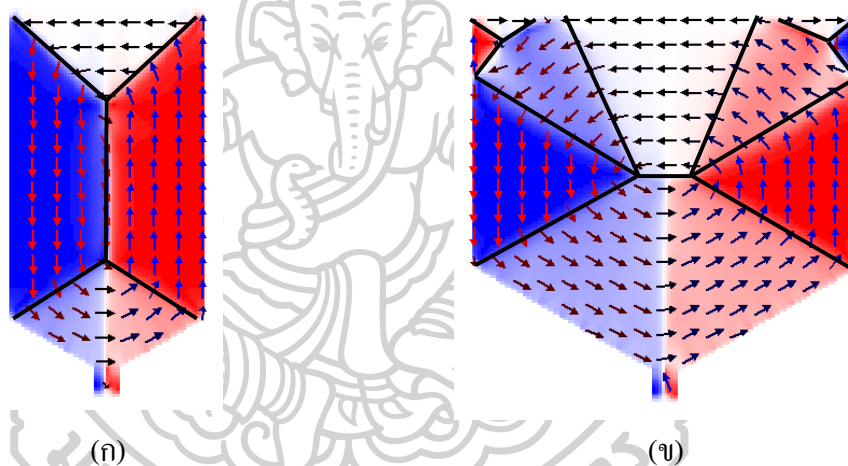
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเมื่อมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60°

จากกราฟในรูปที่ 4.9 พบว่าถ้าหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์กว้างขึ้นจะส่งผลทำให้มีพลังงานรั่วไหลสูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยทุก ๆ ขนาดของมุมแฟลร์กว้างขึ้น 15° จะทำให้ค่าสนามดีแมกนีไทเซชันเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.22×10^{-18} J

แม้ว่าหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์ขนาด 15° จะส่งผลทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างและค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่ต่ำแต่ก็ไม่ได้หมายความว่านั่นเป็นมุมที่ดีที่สุด โดยมีงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับขนาดมุมแฟลร์ของหัวเขียน ซึ่งมุ่งเน้นในเรื่องผลกระทบของขนาดสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียน (write field magnitude) และรูปแบบของสนามแม่เหล็ก (field profile) โดย Daniel Z. Bai และ Jian-Gang Zhu [3] ค้นพบว่าขนาดมุมแฟลร์ของหัวเขียนที่แคบมาก ๆ ($\leq 15^\circ$) ส่งผลให้ปลายโพลมีสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียนต่ำมาก และสนามที่ไม่ใช้เขียนสูงมาก แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับขนาดมุมแฟลร์ที่กว้างมาก ๆ ($\geq 60^\circ$) จะมีประจุแม่เหล็กบนพื้นผิวบริเวณมุมแฟลร์ด้านล่างที่อยู่ห่างจากด้าน ABS ส่งผลให้สนามแม่เหล็กรวมที่โพลลดลง นอกจากนี้เขายังพบอีกว่าหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์ขนาด 45° จะทำให้มีสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลมีความเข้มสูงสุด ดังนั้นในแง่ของความเข้มสนามแม่เหล็กแล้วหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์ขนาด 45° จึงเป็นมุมเหมาะสมที่สุด เนื่องจากหัวเขียนที่มีขนาดของมุมแฟลร์กว้างจะช่วยให้มีความเข้มฟลักซ์แม่เหล็ก

พุ่งลงสู่ปลายโพลสูงจึงส่งผลทำให้มีสนามที่ใช้เขียนสูงสุด ซึ่งเราไม่ต้องการสำหรับกรณีของสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพล ฉะนั้นหัวเขียนที่มีขนาดมุมเฟลร์เท่ากับ 30° จึงเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีสนามแม่เหล็กคงค้าง

นอกจากผลของมุมเฟลร์ที่ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กคงค้างแล้ว ยังมีผลจากขนาดของหัวเขียนบริเวณ โยคอีกด้วย ดังนั้น เราจึงทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาว โดยไม่คำนึงถึงขนาดของมุมเฟลร์ สำหรับการจำลองนี้จะใช้แบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 1 และแบบที่ 3 โดยมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาวเป็น 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กและแมกนีโทเซชันเริ่มต้นเหมือนกับการจำลองที่ก่อนหน้านี้ ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกดังแสดงในรูปที่ 4.10



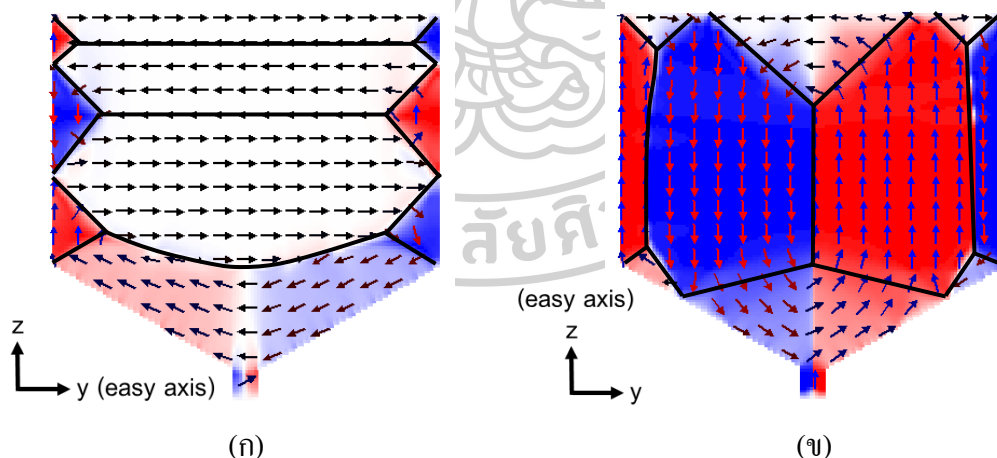
รูปที่ 4.10 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง โดยมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาวเท่ากับ 1:2 สำหรับ (ก) และ 1:1 สำหรับ (ข)

จากรูปที่ 4.10 (ก) สังเกตเห็นว่าหัวเขียนบริเวณ โยคจะมีความยาวด้านกว้างสั้นกว่าด้านยาว ทำให้เกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวตั้ง สามารถคำนวณค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง (M_r/M_s) ได้เท่ากับ 2.24×10^{-2} ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เป็นที่ต้องการเพราะว่าบริเวณ โยคมีแนวโน้มทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่า แต่ในทางตรงกันข้าม โยคที่มีความยาวด้านกว้างยาวกว่าด้านยาว จะทำให้เกิด โดเมนแม่เหล็กในทิศทางตามแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) โดยมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างเท่ากับ 2.01×10^{-2} จากรูปจะเห็นได้ชัดว่าบริเวณ โยคมีโครงสร้างของโดเมนแม่เหล็กที่ดีขึ้น กล่าวคือไม่มีโดเมนแม่เหล็กในแนวตั้งขยายออกไปยังบริเวณปลายโพลและทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนลดลงอีกด้วย

4.2.1.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ easy axis

นอกจากนี้ การกำหนดทิศทางของ easy axis ให้กับหัวเขียนยังส่งผลต่อรูปร่างของโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอีกด้วย จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา ในกระบวนการผลิตหัวเขียนแบบแนวตั้งจะกระทำโดยการปลูกฟิล์มแม่เหล็กขึ้นมาในลักษณะเป็นชั้น ๆ [32] ซึ่งบ่งบอกถึงทิศทางของ easy axis ที่ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างผลึกของวัสดุแม่เหล็กที่ทำการปลูกในชั้นตอนนี้ และการกำหนดทิศทางของ easy axis ให้ได้ตามที่เรากำลังต้องการนั้นถือว่าเป็นเรื่องยาก โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาเขาได้ทำการศึกษาผลของ easy axis ในแง่ของสนามที่ใช้เขียนอยู่ 2 ทิศทาง ได้แก่ easy axis ในแนวอนและแนวตั้ง (ตั้งฉากกับด้าน ABS) [33-35]

ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบจากทิศทางของ easy axis แค่ 2 ทิศทางที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียน จากผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้เราสามารถคัดกรองรูปทรงของหัวเขียนที่เหมาะสม คือ แบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 3 (รูปที่ 4.2 (ก)) โดยทำการกำหนดทิศทางของ easy axis ในแนวอนให้อยู่บนแกน y และ easy axis ในแนวตั้งให้อยู่บนแกน z ตามลำดับ กำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนและแมกนีไทเซชันเริ่มต้นจะถูกกำหนดเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.1.1 (หรือในตารางที่ 4.2) ยกเว้นกำหนดให้มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u) เท่ากับ $95.50 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ เพื่อดูผลกระทบจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับ easy axis ของโครงสร้างผลึก ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน ลูกศรแทนทิศของแมกนีไทเซชัน โดยที่ (ก) easy axis อยู่ในแกน y และ (ข) easy axis อยู่ในแกน z

เมื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลแล้วพบว่าหัวเขียนที่มี easy axis อยู่ในแนวแกน z จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง (M_z/M_s) ต่ำกว่า easy axis อยู่ในแนวแกน y โดยมีค่าเท่ากับ 1.30×10^{-3} และ 8.64×10^{-3} ตามลำดับ นอกจากการกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกน z จะ

ส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ต่ำแล้ว มันยังช่วยเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันที่บริเวณ โขกของหัวเขียนจัดเรียงไปตามแนว easy axis จึงเกิด โดเมนแม่เหล็กในแนวตั้ง ดังรูปที่ 4.11 (ข) แต่ว่าการเกิด โดเมนแม่เหล็กในลักษณะแนวตั้งนี้ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลพลังงานภายในหัวเขียนมากกว่าการเกิด โดเมนแม่เหล็กในแนวนอน (รูปที่ 4.11 (ก)) ซึ่งดูจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียน โดยมีเท่ากับ 7.69×10^{-16} J และ 5.91×10^{-16} J สำหรับ easy axis อยู่ในแนวแกน z และแกน y ตามลำดับ

ดังนั้น ในการจำลองต่อไปจึงเลือกพิจารณาเฉพาะ easy axis ในแนวแกน y เพื่อช่วยสร้าง โดเมนแม่เหล็กในแนวนอนที่บริเวณ โขกของหัวเขียนและช่วยลดการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ โขก แม้ว่ากรณีนี้จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลสูงแต่เราสามารถออกแบบรูปทรงของปลายโพลให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ต่ำได้ดังการทดลองที่ 4.2.1.1 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เลือกพิจารณาเฉพาะ easy axis ในแนวแกน nอนเช่นเดียวกัน โดย D. Z. Bai, et al. [5] พบว่า easy axis ที่อยู่บนแกน nอนหรือแกน y ช่วยทำให้มีโอกาสในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างได้น้อยกว่า easy axis ในแนวแกนตั้งหรือแนวแกน z

4.2.2 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง

ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ในกระบวนการผลิตหัวเขียนแม่เหล็กจะมีกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน เพื่อกำหนดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพลที่มีความแคบเท่าไร แต่ว่าการขัดดังกล่าวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณปลายโพล และการกระทำเช่นนี้จะส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นในหัวข้อนี้ เราจึงสนใจศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของปลายโพล (T_p) และศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์ โดยเราจะเลือกแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง เพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้มากขึ้นและยังสามารถนำไปพัฒนาหัวเขียนในอุตสาหกรรมการผลิตให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้อีกด้วย

4.2.2.1 ผลกระทบเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน

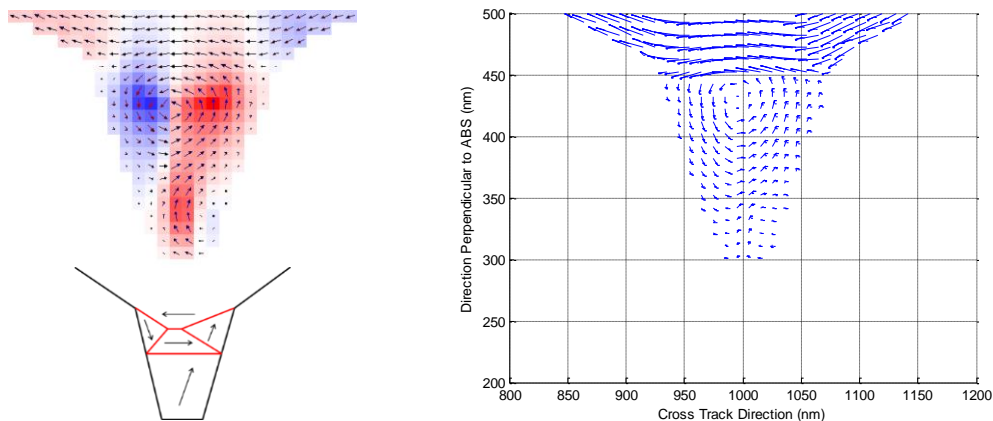
กระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียนสามารถทำได้โดยทำการขัดหัวเขียนด้วยความลึกที่มากขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดความยาวปลายโพล (T_p) ค่อย ๆ สั้นลง และทำให้ความกว้างของปลายโพล (track width) กว้างขึ้นด้วย ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบเนื่องจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียนต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็ก โดยเลือกใช้แบบจำลองแบบที่ 4 ดังแสดง

ในรูปที่ 4.2 (ง) และทำการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลของหัวเขียนดังแสดงในตารางที่ 4.3 กำหนดขนาดของรูปทรงของแบบจำลองและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยในที่นี้ เราจะกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกน y และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u) เท่ากับ $95.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ แมกนีไทเซชันเริ่มต้นถูกกำหนดให้อยู่ในทิศทางตามแนวแกน z

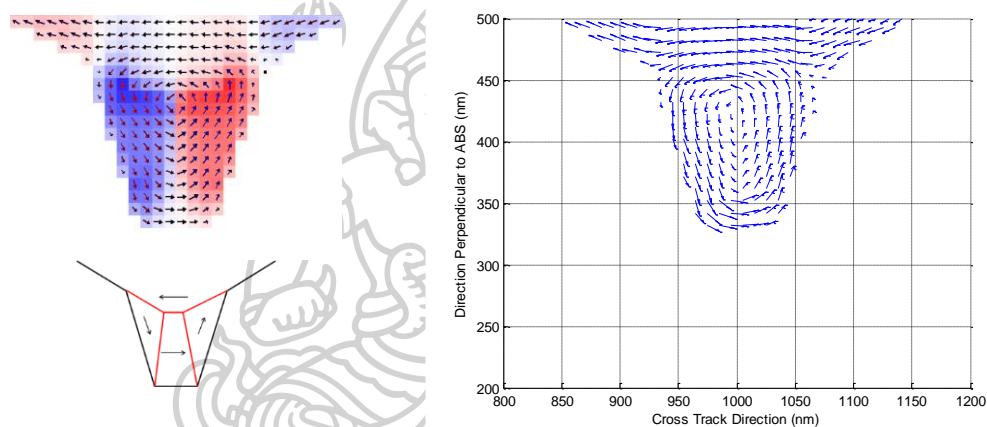
ตารางที่ 4.3 ขนาดความยาวและขนาดความกว้างของปลายโพลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของหัวเขียนสำหรับแบบจำลองไมโครแมกเนติก

| Throat height/(nm) | Track width/(nm) |
|--------------------|------------------|
| 150 | 30 |
| 140 | 40 |
| 130 | 50 |
| 120 | 60 |
| 110 | 70 |
| 100 | 80 |
| 90 | 90 |
| 80 | 100 |

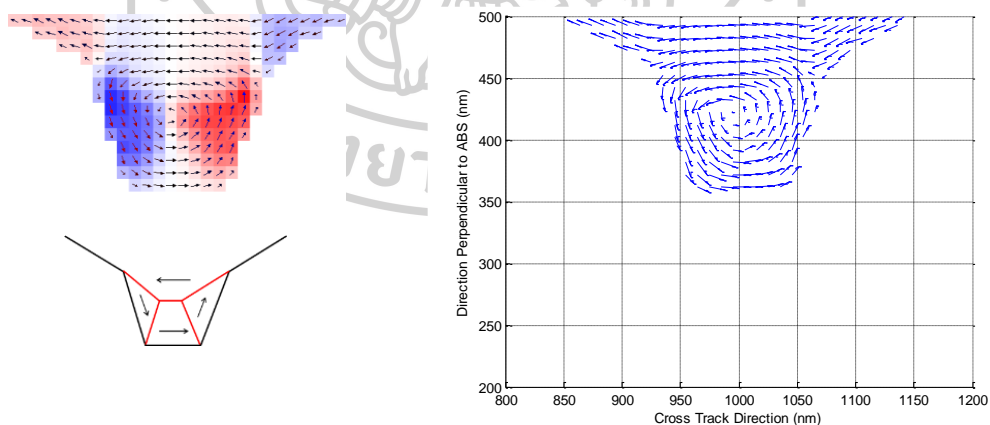
ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังในรูปที่ 4.12 โดยยกตัวอย่างผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีความยาวปลายโพลเท่ากับ 140 nm 120 nm 100 nm 90 nm และ 80 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) 4.12 (ข) 4.12 (ค) 4.12 (ง) และ 4.12 (จ) ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าบริเวณปลายโพลของหัวเขียนเกิดโดเมนแม่เหล็กในลักษณะที่แตกต่างกันเมื่อความยาวปลายโพลเปลี่ยนแปลงไป สำหรับกรณีหัวเขียนที่มีปลายโพลยาว 140 nm ดังในรูปที่ 4.12 (ก) แมกนีไทเซชันจะจัดเรียงตัวในลักษณะโดเมนปิดเฉพาะบริเวณส่วนบนของปลายโพล แต่ที่บริเวณส่วนล่างของปลายโพล แมกนีไทเซชันจะจัดเรียงตัวในลักษณะไม่เป็นโดเมนปิด กล่าวคือมันพยายามจัดเรียงตัวตามแนวยาวของปลายโพล และด้วยเหตุนี้จึงทำให้บริเวณปลายโพลมีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาได้มากกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหากความยาวปลายโพลลดลง ยกตัวอย่างเช่น ปลายโพลยาว 80 nm ดังในรูปที่ 4.12 (จ) จะเห็นว่าแมกนีไทเซชันส่วนใหญ่มันจะพยายามจัดเรียงตัวในแนวนอนและเกิดโดเมนปิดตามแนวนอนหรือแนวแกน y ดังนั้นจึงส่งผลทำให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลที่ลดลง (เป็นผลเนื่องจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงเหมือนกับการทดลองที่ 4.2.1.1)



(ก) ปลายโพลยาว 140 nm และกว้าง 40 nm

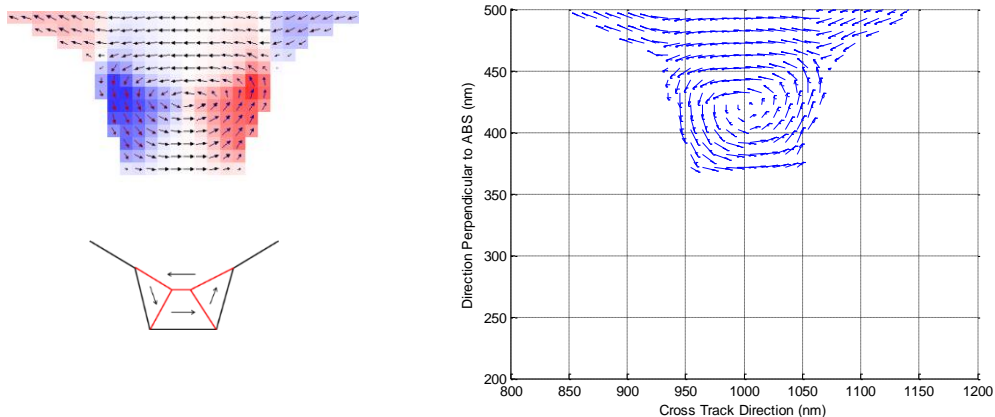


(ข) ปลายโพลยาว 120 nm และกว้าง 60 nm

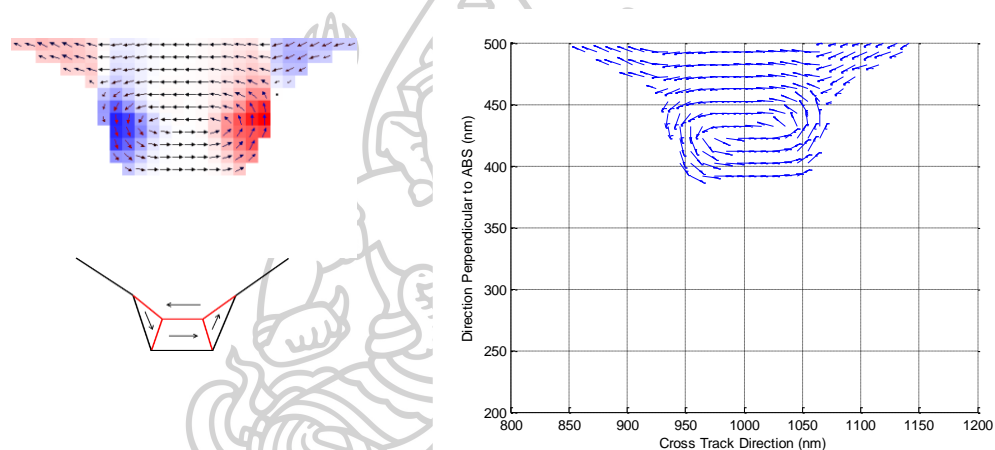


(ค) ปลายโพลยาว 100 nm และกว้าง 80 nm

รูปที่ 4.12 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้าง ซ้ายเป็นภาพของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวาเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน



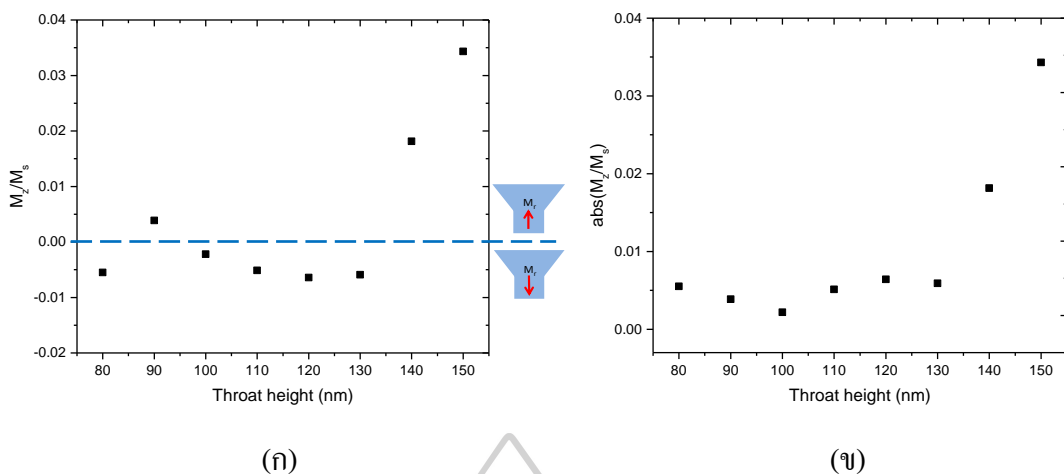
(ง) ปลายโพลงยาว 90 nm และกว้าง 90 nm



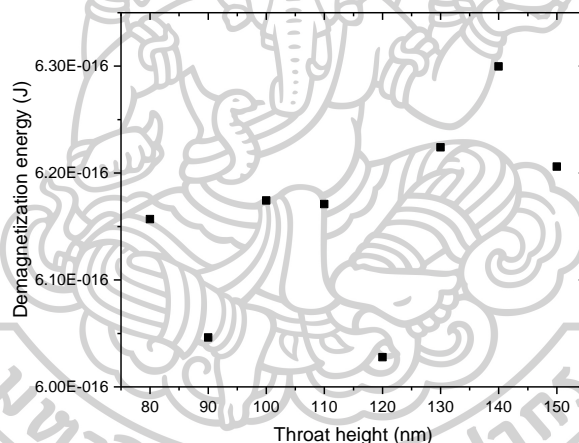
(จ) ปลายโพลงยาว 80 nm และกว้าง 100 nm

รูปที่ 4.12 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลงในสถานะคงค้าง ซ้ำเป็นภาพของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz โดยที่ปลายโพลงมีความยาวแตกต่างกัน

จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z (M_z/M_s) พบว่าเมื่อความยาวปลายโพลดลงจะส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลงมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลงตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.13 และเมื่อทำการคำนวณสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลงโดยสนใจเฉพาะขนาดที่ได้ดังกราฟในรูปที่ 4.13 (ข) เราจะเห็นว่าเมื่อความยาวปลายโพลงลดลงถึง 130 nm และลดลงเรื่อย ๆ ทีละ 10 nm จนมีขนาด 80 nm ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลงก็ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีค่าน้อยอยู่



รูปที่ 4.13 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ (ข) ค่าสัมบูรณ์ของแมกนีไทเซชัน



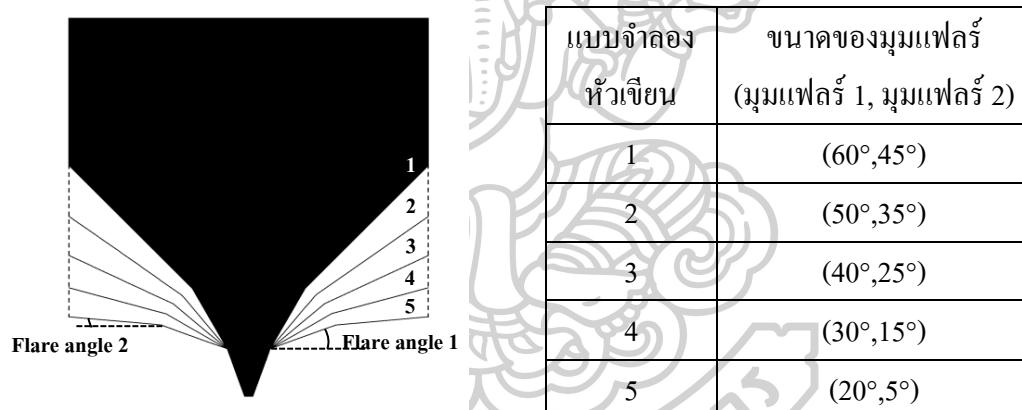
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm

และเมื่อพิจารณาจากภาพรวมของหัวเขียน พบว่าเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลลดลงจะทำให้ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนลดลงตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.14 แต่กรณีที่ปลายโพลยาว 120 nm และ 90 nm ปกติว่ามีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความยาวของปลายโพลมีขนาดพอเหมาะ จึงทำให้เกิดโดเมนปิดที่ช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) และ 4.12 (ง) สำหรับปลายโพลยาว 120 nm และ 90 nm ตามลำดับ และยังทำให้การรั่วไหลของพลังงานภายในหัวเขียนหรือค่าของพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงด้วย

4.2.2.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์

การเพิ่มขนาดของมุมแฟลร์จากการจำลองที่ 4.2.1.2 ส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลของหัวเข็ญมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างสูงขึ้น นั่นก็หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์จะมีผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลเป็นอย่างมาก

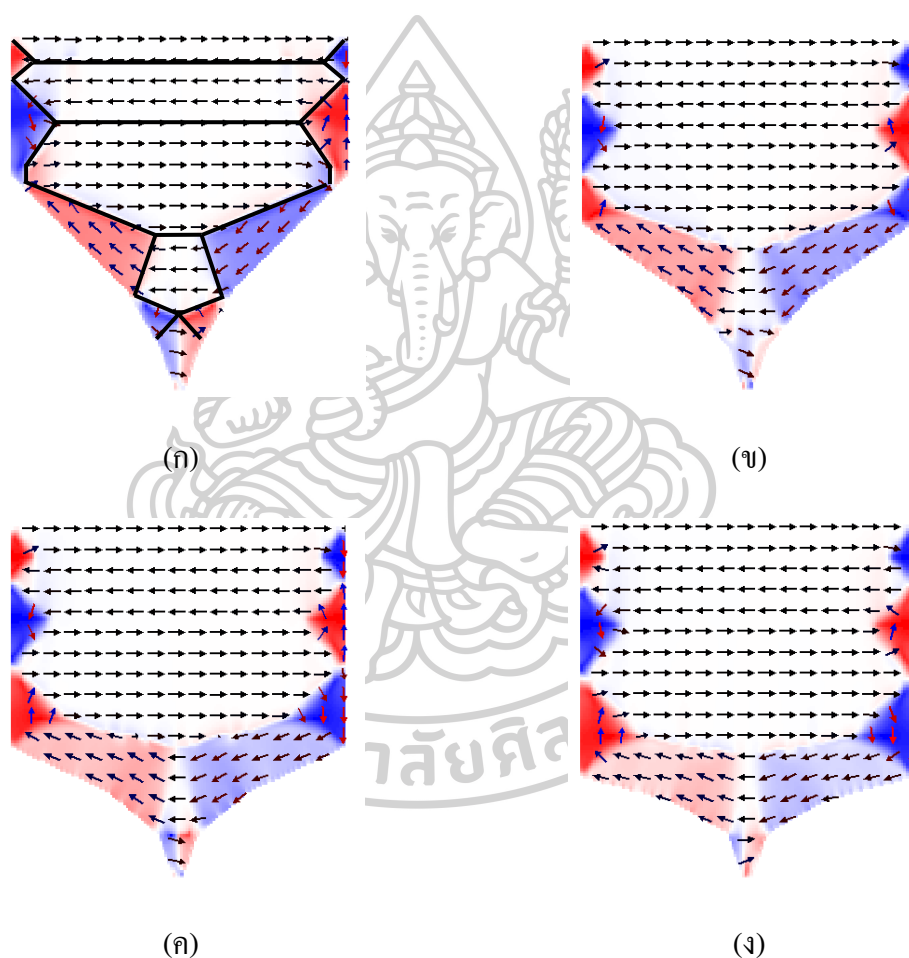
ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลของขนาดมุมแฟลร์สำหรับแบบจำลองหัวเข็ญที่มีขนาดใกล้เคียงกับหัวเข็ญจริง โดยเราจะเลือกใช้แบบจำลองของหัวเข็ญหัวเข็ญแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ง) และทำการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 ไปพร้อมกัน โดยในที่นี้เราจะระบุขนาดของมุมแฟลร์ทั้งสองนี้เป็นคู่อันดับ (มุมแฟลร์ 1, มุมแฟลร์ 2) แสดงดังตารางด้านขวาในรูปที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์สำหรับองค์ประกอบของหัวเข็ญแบบที่ 4 แสดงในตารางที่ 4.1 และกำหนดขนาดของรูปทรงของแบบจำลองและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเข็ญเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.2.1



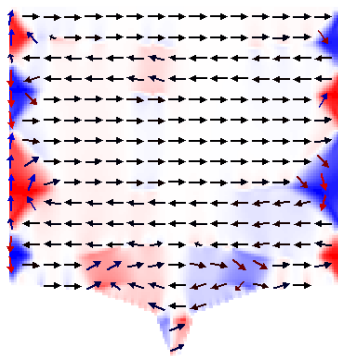
รูปที่ 4.15 ขนาดของมุมแฟลร์ สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติก

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 4.16 สังเกตเห็นว่าบริเวณโยคของหัวเข็ญในแต่ละแบบจำลองเกิดโดเมนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนปิดในลักษณะที่แตกต่างกันไป โดยเฉพาะบริเวณของมุมแฟลร์ทั้งสองมุม จากในรูปที่ 4.16 (ก) สำหรับหัวเข็ญที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°, 45°) จะสังเกตได้ว่าบริเวณ โยคด้านบนของหัวเข็ญเกิด โดเมนปิด 2 โดเมนปิดในแนวนอน และที่บริเวณมุมแฟลร์ก็เกิด โดเมนแบบปิดเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากขนาดของมุมแฟลร์ที่กว้างจึงทำให้หัวเข็ญบริเวณนี้มีลักษณะที่ชันด้วย ทำให้แมกนีไทเซชันพยายามจัดเรียงตัวไปตามขอบของหัวเข็ญแทบจะอยู่ในแนวตั้ง การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในลักษณะนี้ช่วยให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาในแนวตั้งได้มากกว่า จากนั้นเมื่อเราทำการลดขนาดของมุมแฟลร์ทั้งสองมุมเป็น (50°, 35°) (40°, 25°) (30°, 15°) และ (20°, 5°) ดังแสดงใน

รูปที่ 4.16 (ข) 4.16 (ค) 4.16 (ง) และ 4.16 (จ) ตามลำดับ เราจะสังเกตเห็นว่าแมกนีไทเซชันบริเวณมุมแฟลร์มีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่ดีขึ้น กล่าวคือถ้ามุมแฟลร์ทั้งสองมุมยิ่งแคบจะทำให้หัวเขียนบริเวณนี้มีความชันที่ลดลงแทบจะอยู่ในแนวราบ ดังนั้นแมกนีไทเซชันจึงพยายามจัดเรียงตัวไปตามขอบแทบจะเกิดโดเมนในแนวนอน ที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลในแนวตั้ง นอกจากนี้ถ้าหากขนาดของมุมแฟลร์ทั้งสองมุมแคบลงยังทำให้ความยาวของโหนดด้านยาวมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของโดเมนปิดมีขนาดกว้างขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความยาวของโหนดเป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กซ์เซนจ์ดังที่อธิบายในบทที่ 2



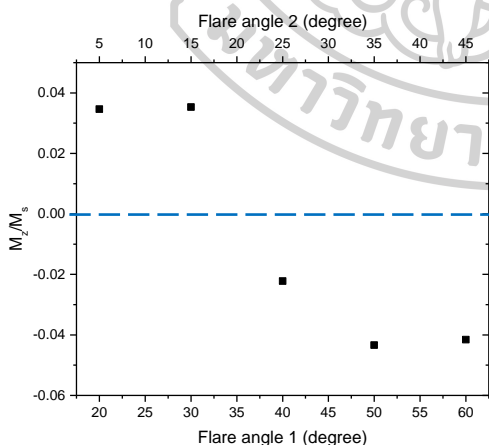
รูปที่ 4.16 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ และ $(30^\circ, 15^\circ)$ สำหรับรูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ



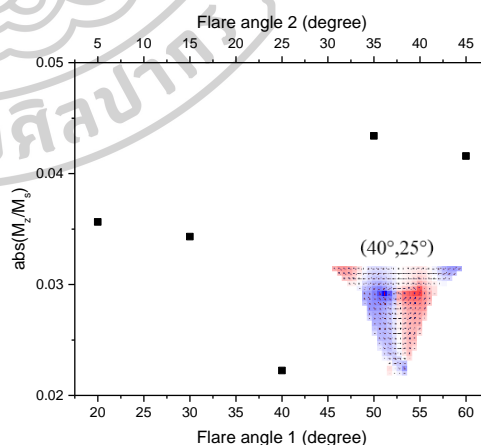
(จ)

รูปที่ 4.16 (ต่อ) รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเข็ญที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(20^\circ, 5^\circ)$ สำหรับรูป (จ)

เมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z พบว่าถ้าหัวเข็ญมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 ลดลงพร้อมกันที่ละ 10° ทั้งสองมุม ทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเข็ญสูงขึ้นตามไปด้วยดังในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่เกิดจากโดเมนแม่เหล็กบริเวณโขกของหัวเข็ญที่พุ่งลงสู่ปลายโพลน้อยกว่าหัวเข็ญที่มีมุมแฟลร์กว้าง ๆ แต่สำหรับกรณีที่หัวเข็ญมีมุมแฟลร์ขนาด $(40^\circ, 25^\circ)$ จะสังเกตเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลเกือบเป็นโดเมนปิดหัวทั้งปลายโพล จึงส่งผลให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลลดลง



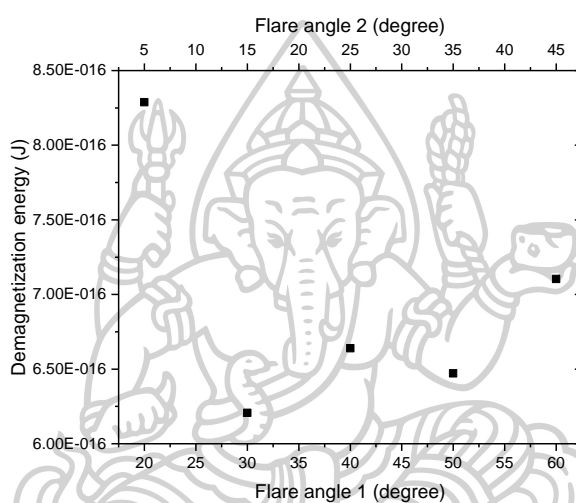
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเข็ญมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ (ข) ค่าสัมบูรณ์ของแมกนีไทเซชัน

และถ้าหากพิจารณาจากภาพรวมของหัวเขียน พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 ลดลงพร้อมกันทั้งทีละ 10° ทั้งสองมุมจะส่งผลให้หัวเขียนมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.18 แต่ในกรณีที่หัวเขียนมีมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เป็น $(20^\circ, 5^\circ)$ จะมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่สูงขึ้นกว่าปกติ เนื่องจากแมกนีไทเซชันบริเวณมุมแฟลร์ของหัวเขียนมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็น โคเมนปิดดังแสดงในรูปที่ 4.16 (จ) ส่งผลทำให้หัวเขียนเกิดการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กที่มากกว่า จึงทำให้เกิดการรั่วไหลของพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$

4.2.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็ก

จากการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.2 พบว่าแบบจำลองของหัวเขียนที่เหมาะสมที่ทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลต่ำและมีการรั่วไหลของพลังภายในหัวเขียนที่น้อยคือแบบจำลองของหัวเขียนที่มีความยาวปลายโพลเท่ากับ 100 mm และมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 เท่ากับ 30° และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ 15°

ในหัวข้อนี้เราต้องการศึกษาผลกระทบของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้สร้างหัวเขียนที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพล โดยวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่เลือกใช้ได้แก่ โลหะผสม NiFe และ CoFeNi ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 4.4 กำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกน y และแมกนีไทเซชันเริ่มต้นถูกกำหนดให้อยู่ในทิศทางตามแนวแกน z ส่วนแบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในจำลองไมโครแมกเนติก เราจะเลือกแบบจำลองหัวเขียนที่มี

ความยาวปลายโพลเท่ากับ 100 nm และมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เป็น (30°,15°) ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ของแบบจำลองหัวเขียนแสดงดังตารางที่ 4.5

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวเขียน (head width, L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (L_{ex}) สำหรับโลหะผสม NiFe และ CoFeNi ได้ดังตารางที่ 4.6 เมื่อค่าความยาวเอ็กเซนจ์ขึ้นอยู่กับค่าคงที่เอ็กเซนจ์ (A) และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u)

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในแบบจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน

| วัสดุแม่เหล็ก | พารามิเตอร์ | | | |
|---|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------|
| | A (J/m) | K_u (J/m ³) | M_s (A/m) | Easy axis |
| Ni ₈₀ Fe ₂₀ [20] | 1×10^{-11} | 119.4 | 796×10^3 | Cubic |
| Ni ₁₀ Fe ₉₀ [36] | 1×10^{-11} | 278.6 | 1592×10^3 | Cubic |
| Ni ₄₅ Fe ₅₅ [20] | 1×10^{-11} | 525.2 | 1313×10^3 | Cubic |
| Co ₈₀ Fe ₁₀ Ni ₁₀ [37] | 1×10^{-11} | 636.5 | 1273×10^3 | Uniaxial |
| Co ₃₅ Fe ₆₀ Ni ₅ [36] | 1×10^{-11} | 732 | 1830×10^3 | Uniaxial |
| Co ₆₀ Fe ₃₉ Ni ₁ [38] | 1×10^{-11} | 764 | 1910×10^3 | Uniaxial |

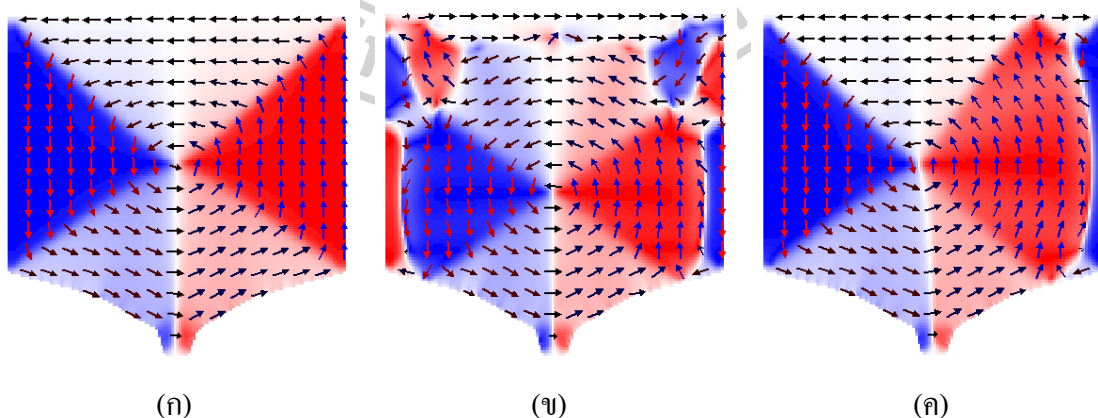
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองของหัวเขียนสำหรับแบบจำลองไมโครแมกเนติก

| พารามิเตอร์ | ปริมาณ |
|------------------------|--------|
| Head length/(nm) | 1280 |
| Head width/(nm) | 1280 |
| Flare angle 1/(degree) | 30 |
| Flare angle 2/(degree) | 15 |
| Chisel angle/(degree) | 20 |
| Throat height/(nm) | 100 |
| Track width/(nm) | 80 |
| Head thickness/(nm) | 80 |

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวเขียน (Head width, L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (l_{ex}) สำหรับโลหะผสม NiFe และ CoFeNi

| วัสดุแม่เหล็ก | ความยาวเอ็กเซนจ์ $\left(l_{ex} = \sqrt{\frac{A}{K_u}} \right)$ | ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของหัวเขียน (L) กับความยาวเอ็กเซนจ์ (l_{ex}) |
|--|--|--|
| Ni ₈₀ Fe ₂₀ | 289 nm | $L = 4.43l_{ex}$ nm |
| Ni ₁₀ Fe ₉₀ | 189 nm | $L = 6.77l_{ex}$ nm |
| Ni ₄₅ Fe ₅₅ | 138 nm | $L = 9.28l_{ex}$ nm |
| Co ₈₀ Fe ₁₀ Ni ₁₀ | 125 nm | $L = 10.24l_{ex}$ nm |
| Co ₃₅ Fe ₆₀ Ni ₅ | 117 nm | $L = 10.94l_{ex}$ nm |
| Co ₆₀ Fe ₃₉ Ni ₁ | 114 nm | $L = 11.23l_{ex}$ nm |

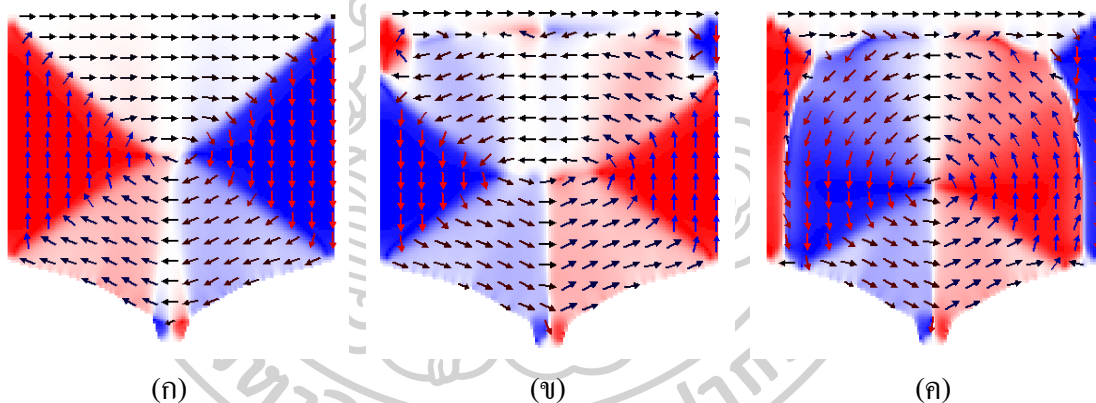
ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน ในกรณีวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม NiFe ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.19 สามารถสังเกตได้ว่าที่บริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนแม่เหล็กในลักษณะที่แตกต่างกัน จากในรูปที่ 4.19 (ก) วัสดุแม่เหล็กอ่อนของหัวเขียนเป็นโลหะผสม Ni₈₀Fe₂₀ พบว่าบริเวณ โยคเกิดโดเมนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนปิดแบบสมบรูณ์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหัวเขียนบริเวณ โยคมีขนาดพอเหมาะ (เป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กเซนจ์ที่พอเหมาะดังในตารางที่ 4.6) จึงทำให้หัวเขียนบริเวณ โยคเกิดผนังโดเมนปิดที่สมบรูณ์ขึ้น ส่งผลทำให้หัวเขียนมีแนวโน้มที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลได้มากกว่า



รูปที่ 4.19 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม (ก) Ni₈₀Fe₂₀ (ข) Ni₁₀Fe₉₀ และ (ค) Ni₄₅Fe₅₅ ตามลำดับ

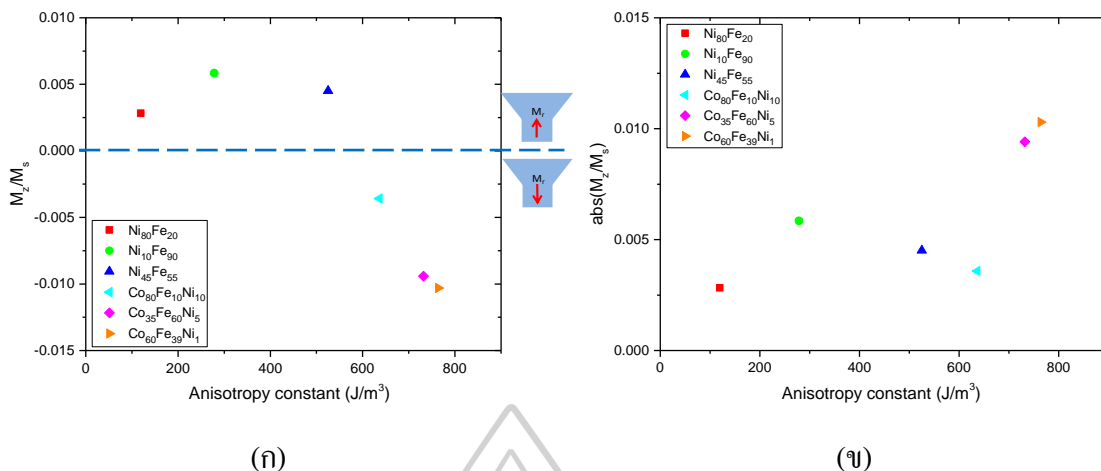
แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม $\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{90}$ และ $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ข) และ 4.19 (ค) ตามลำดับ โดยที่ $\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{90}$ และ $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ มีค่า K_u เท่ากับ 278.6 J/m^3 และ 525.2 J/m^3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า K_u สูงกว่า $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (119.4 J/m^3) จึงทำให้แมกนีไทเซชันพยายามหมุนไปในแกนเดียวกับ easy axis ได้ง่ายขึ้น ทำให้โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เกิดเป็นโดเมนปิดหลายโดเมนและมีบางบริเวณที่ไม่เป็นโดเมนปิด ทำให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาได้มากกว่า สุดท้ายแล้วโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานภายในหัวเขียนให้น้อยที่สุดเหมือนกัน และพลังงานอาจจะไม่เท่ากัน

ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน ในกรณีที่หัวเขียนใช้วัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}$, $\text{Co}_{35}\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{15}$ และ $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{39}\text{Ni}_1$ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) 4.20 (ข) และ 4.20 (ค) ตามลำดับ โดยผลการจำลองที่ได้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลคล้ายกับการจำลองหัวเขียนที่วัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสม NiFe แต่ต่างกันตรงที่มีโครงสร้างของโดเมนบริเวณ โยคของหัวเขียนมีการจัดเรียงตัวใหม่ แต่ก็ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนกัน

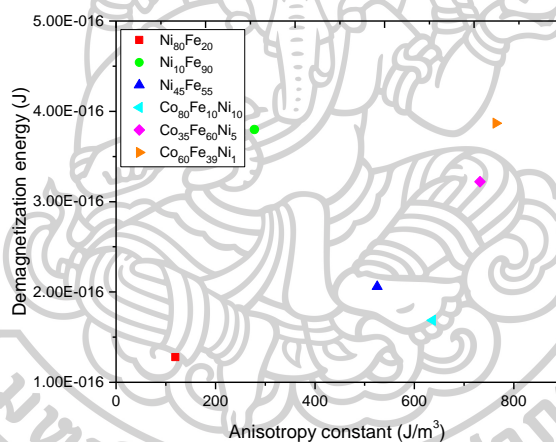


รูปที่ 4.20 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม (ก) $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}$ (ข) $\text{Co}_{35}\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{15}$ และ (ค) $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{39}\text{Ni}_1$ ตามลำดับ

เมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยในรูปที่ 4.21 (ข) พบว่าเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูงขึ้น จะส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลสูงขึ้นตามไปด้วยทั้งโลหะผสม NiFe และโลหะผสม CoFeNi แต่สำหรับกรณีที่ เป็นโลหะผสม $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากที่บริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนปิดเกือบจะสมบูรณ์ (ดังรูปที่ 4.19 (ค)) จึงช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลลงสู่ปลายโพลของหัวเขียนและทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลลดลง



รูปที่ 4.21 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ (ข) ค่าสัมบูรณ์ของแมกนีไทเซชัน



รูปที่ 4.22 ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน

โดยเราสามารถพิจารณาการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่าเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูง จะส่งผลทำให้หัวเขียนมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าถ้าวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูง จะทำให้ภายในหัวเขียนมีพลังงานหรือมีฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลสูงขึ้นนั่นเอง แต่ในกรณีที่วัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม $Ni_{45}Fe_{55}$ เราจะเห็นว่ามีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลลดลง

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณ โพลและค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนแล้ว พบว่าหัวเขียนที่ใช้วัสดุแม่เหล็กอ่อนที่เป็น โลหะผสม $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ และ $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}$ มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่โพลน้อยที่สุดสำหรับ NiFe และ CoFeNi และถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสามารถยอมรับได้



บทที่ 5

การศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก

จากการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเนื่องจากผลของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในระหว่างกระบวนการผลิตในบทที่ 4 เราสามารถพบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวเขียน ได้แก่ ความยาวปลายโพล ขนาดของหัวเขียนบริเวณ โยค และขนาดของมุมแฟลร์ ตามลำดับ จะส่งผลต่อค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเป็นอย่างมาก รวมทั้งการกำหนดทิศทาง easy axis และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็กอีกด้วย

ดังนั้น ในบทนี้เราสนใจใช้แบบจำลองไมโครแมกเนติกเพื่อศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด โดยเราจะทำการศึกษาคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโพลของหัวเขียนอันเนื่องมาจาก (1) การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณปลายโพล และบริเวณ โยค (2) อิทธิพลของทิศทาง easy axis (3) อิทธิพลของกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน และ (4) วัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้ทำหัวเขียน เช่น NiFe และ CoFeNi เป็นต้น

และในบทนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอขั้นตอนการศึกษานามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก รวมถึงแบบจำลองของหัวเขียนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็กส่วนที่สองเป็นการนำเสนอผลจากการจำลองไมโครแมกเนติกและวิเคราะห์ผลการทดลอง

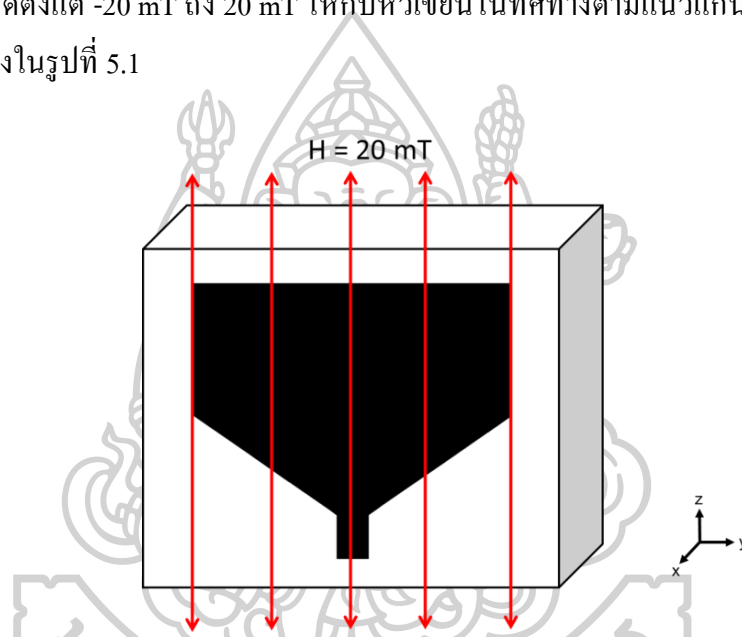
5.1 ขั้นตอนการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดตัวนำ

ในกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในแนวตั้ง จะกระทำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่หัวเขียน โดยขดลวดตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กขนาด 20 mT [39] เพื่อใช้เหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กภายในหัวเขียน และเหนี่ยวนำสารแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้มีการจัดเรียงอยู่ในแนวตั้ง ทั้งนี้เมื่อหยุดป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนค่อย ๆ เคลื่อนตัวกลับเข้าสู่สถานะสมดุลหรืออยู่ในสถานะคงค้าง และด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลของ

หัวเขียน ซึ่งถ้าหากบริเวณปลายโพลมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงพอ อาจก่อให้เกิดการเขียนข้อมูลทับซ้อนกับข้อมูลเดิมบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กและอาจทำให้ข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเกิดความเสียหายได้

จากปัญหาที่ได้กล่าวมา ในงานวิจัยนี้เราจะศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลหลักของหัวเขียน โดยใช้แบบจำลองของหัวเขียนและค่าพารามิเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กเหมือนกับการจำลองในบทที่ 4

โดยในบทนี้เราจะทำการจำลองการจ่ายกระแสด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งไปและกลับขนาดตั้งแต่ -20 mT ถึง 20 mT ให้กับหัวเขียนในทิศทางตามแนวแกน z (ตั้งฉากกับด้าน ABS) ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 จำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนเนื่องจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด ลูกศรสีแดงแสดงทิศทางทำให้สนามแม่เหล็กภายนอก

การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเขียนนั้น จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงใหญ่ ๆ ได้แก่ ช่วงแรกจะเป็นการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก ($+z$) ตั้งแต่ 0 mT ถึง 20 mT จากนั้นรอจนกระทั่งแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (20 mT ถึง 0 mT) แล้วปล่อยให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง ส่วนช่วงที่สองเป็นการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ ($-z$) ตั้งแต่ 0 mT ถึง -20 mT จากนั้นรอจนกระทั่งแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงหยุดป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (-20 mT ถึง 0 mT) แล้วปล่อยให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง ซึ่งในการจำลองนี้ เราจะเลือกพิจารณาเฉพาะแมกนีไทเซชันที่เข้าสู่สภาวะสมดุลสุดท้ายหรือแมกนีไทเซชัน

ในสถานะคงค้างของทั้งสองช่วงการจำลอง นั่นก็คือช่วงที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง $+z$ และในทิศทาง $-z$

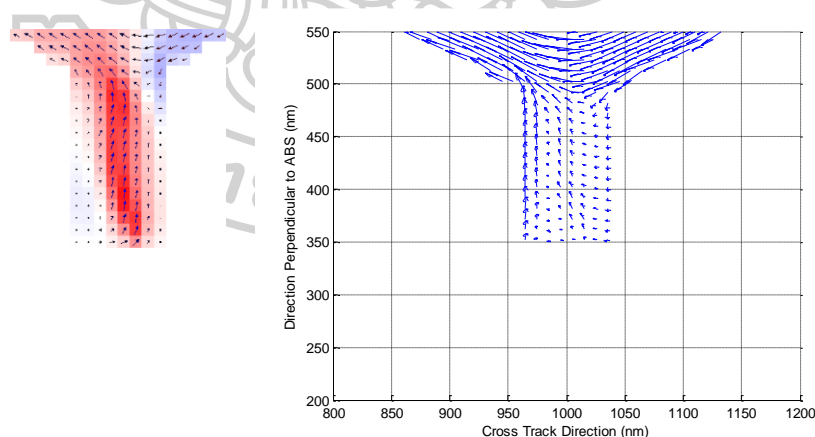
5.2 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนและวิเคราะห์ผล

5.2.1 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย

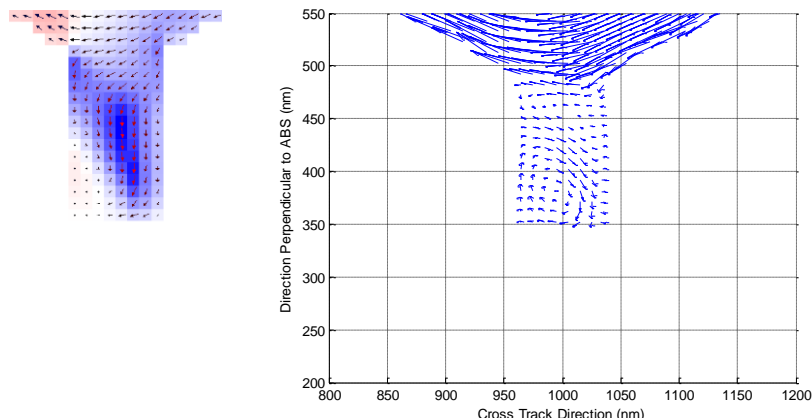
หัวข้อนี้เราต้องการศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพล อันเนื่องมาจากผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของปลายโพลและรูปทรงของโพล โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของมุมแฟลร์และความกว้างและความยาวของหัวเขียนแม่เหล็ก สำหรับหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย

5.2.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลของหัวเขียน

ในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็ก โดยเลือกใช้แบบจำลองของหัวเขียนและกำหนดขนาดของรูปทรงของแบบจำลองและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.2.1 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวปลายโพลของหัวเขียนตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 สำหรับกรณีที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และทิศ $-z$ ตามลำดับ



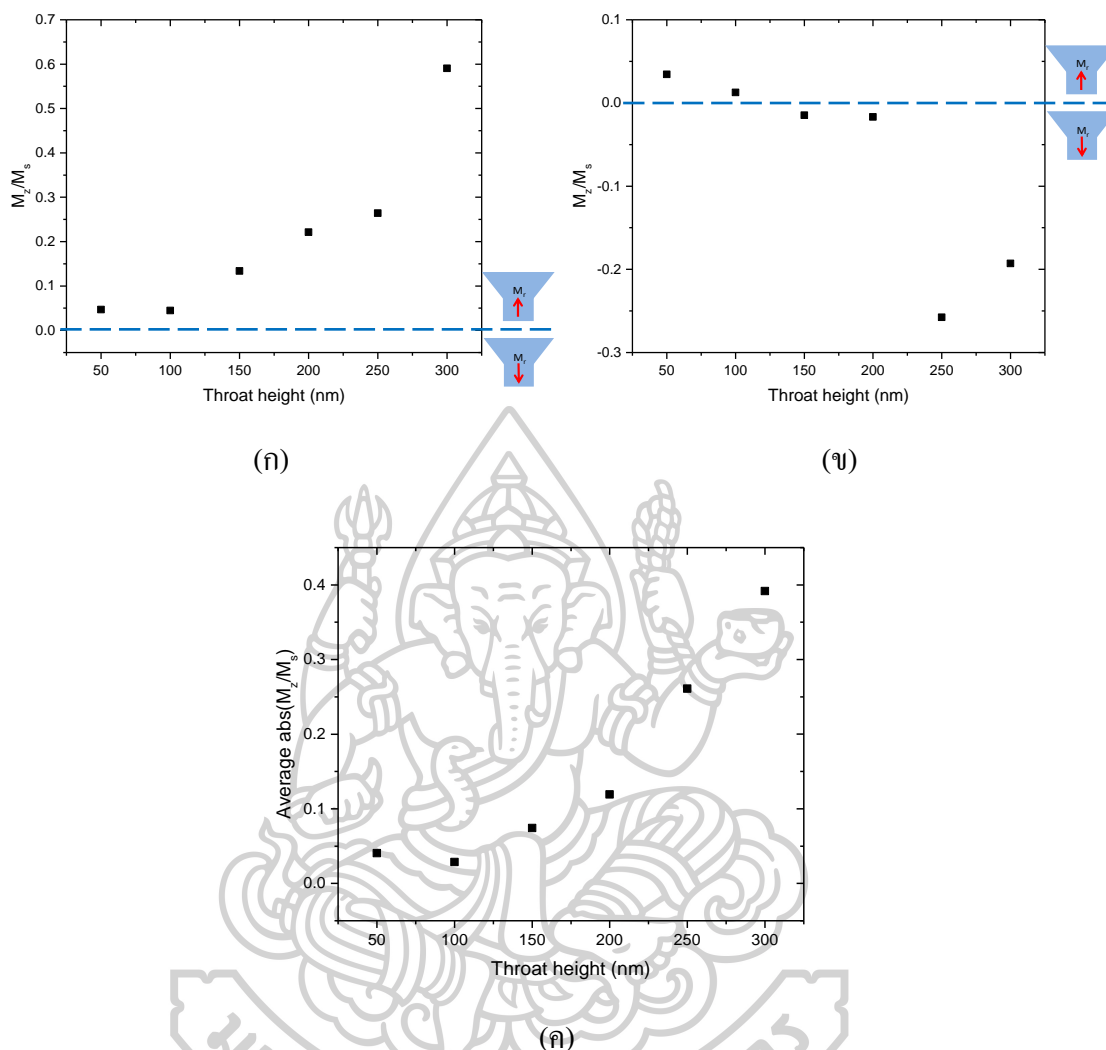
รูปที่ 5.2 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่มีความยาว 150 nm ในสถานะคงค้าง เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ โดยภาพซ้ายเป็นของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวาเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุกๆ ความหนา x ในระนาบ yz



รูปที่ 5.3 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่มีความยาว 150 nm ในสถานะคงค้าง เมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $-z$ โดยภาพซ้ายเป็นของแมกนีไทเซชันจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm และขวาเป็นแมกนีไทเซชันเฉลี่ยของทุก ๆ ความหนา x ในระนาบ yz

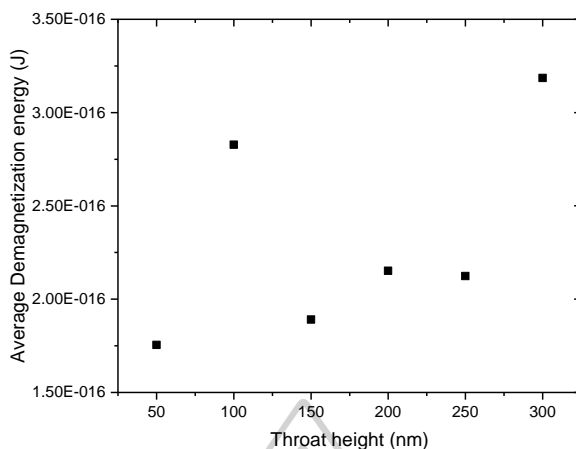
จากผลการจำลองในรูปที่ 5.3 เราจะยกตัวอย่างเฉพาะหัวเขียนที่มีความยาวปลายโพลเท่ากับ 150 nm เนื่องจากผลการจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.2.1 กล่าวคือถ้าหัวเขียนมีความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้นจะทำให้แมกนีไทเซชันพยายามจัดเรียงตัวไปตามแนวยาวมากกว่าแนวสั้นของปลายโพล แต่ในการทดลองนี้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และ $-z$ จึงทำให้แมกนีไทเซชันพยายามจัดเรียงตัวไปในทิศบวกและทิศลบตามทิศของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไป และยังคงจัดเรียงตัวไปตามแนวยาวมากกว่าแนวสั้นของปลายโพลเช่นเดียวกัน

และเมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z พบว่าเมื่อปลายโพลมีความยาวเพิ่มขึ้นค่าสนามแม่เหล็กคงค้างก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากแมกนีไทเซชันที่บริเวณปลายโพลพยายามจัดเรียงตัวไปตามแนวยาวของปลายโพล จึงส่งผลให้ปลายโพลที่ยาวค่าสนามแม่เหล็กคงค้างก็จะสูงขึ้นด้วย โดยที่รูปที่ 5.4 (ก) แสดงค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่เพิ่มขึ้นในทิศทางบวกเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง $+z$ รูปที่ 5.4 (ข) แสดงค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่เพิ่มขึ้นในทิศทางลบเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง $-z$ และรูปที่ 5.4 (ค) แสดงค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างของทั้งสองกรณี โดยสนใจเฉพาะขนาด

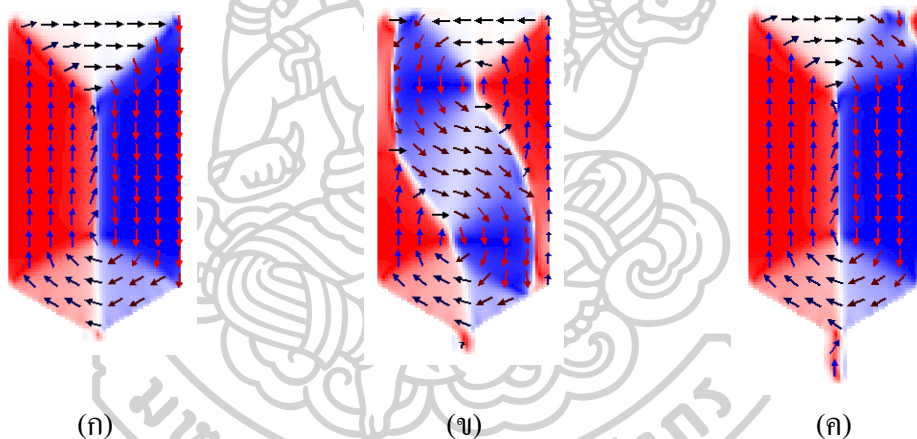


รูปที่ 5.4 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm โดย (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z (ข) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ -z และ (ค) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์แมกนีไทเซชันจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ -z

จากนั้นดูการรั่วไหลของพลังงานภายในหัวเขียนจากค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันของทั้งกรณีได้ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.1.1 คือเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นก็หมายความว่าถ้าหากปลายโพลมีค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันยิ่งสูง ก็ยิ่งทำให้พลังงานภายในหัวเขียนรั่วไหลได้มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z และทิศ -z เมื่อหัวเขียนมีปลายโพลขนาดตั้งแต่ 50 nm ถึง 300 nm



รูปที่ 5.6 โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้างสำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z เมื่อหัวเขียนมีปลายโพลขนาด (ก) 50 nm (ข) 100 nm และ (ค) 200 nm ตามลำดับ

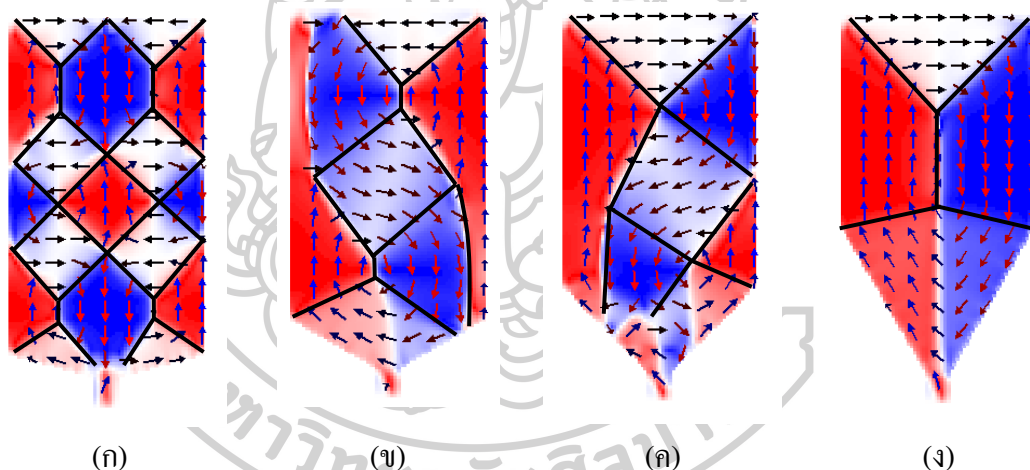
จากกราฟในรูปที่ 5.5 สามารถสังเกตเห็นว่ากรณีที่หัวเขียนมีปลายโพลยาว 100 nm จะมีค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากความยาวของปลายโพลมีขนาดไม่พอเหมาะ (เป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กเชนจ์) จึงส่งผลให้แมกนีไทเซชันที่บริเวณ โยคของหัวเขียนมีการจัดเรียงตัวเกิดโดเมนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนปิด แต่มีบางบริเวณที่ไม่เป็นโดเมนปิดดังในรูปที่ 5.6 (ข) การเกิดเมนในลักษณะนี้จะมีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลได้มากกว่า และทำให้ค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนสูงขึ้นนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเขียนที่มีปลายโพลยาว 50 nm และ 200 nm ดังในรูปที่ 5.6 (ก) และ 5.6 (ค) ตามลำดับ เราจะเห็นว่าบริเวณโยคเกิดโดเมนปิดแทบทั่วทั้งโยค จึงมีแนวโน้มให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก

รู้ว่าไหลได้น้อยกว่าและยังมีค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีโทเซชันของหัวเขียนน้อยลงอีกด้วย (ผลการจำลองไมโครแมกเนติกในรูปที่ 5.6 เราจะยกตัวอย่างเฉพาะกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ เนื่องจากบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนแม่เหล็กในลักษณะที่คล้ายกันทั้งสองกรณี)

5.2.1.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณโยค

ส่วนการจำลองนี้เราต้องการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณ โยคต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่ปลายโพล เพื่อดูลักษณะการเกิด โดเมนแม่เหล็กที่บริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดมุมแฟลร์ และอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาว

ในการจำลองนี้ สำหรับการศึกษาขนาดของมุมแฟลร์ เราจะเลือกใช้แบบจำลองหัวเขียนและกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.1.2 ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 5.7 (ยกตัวอย่างเฉพาะกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$)

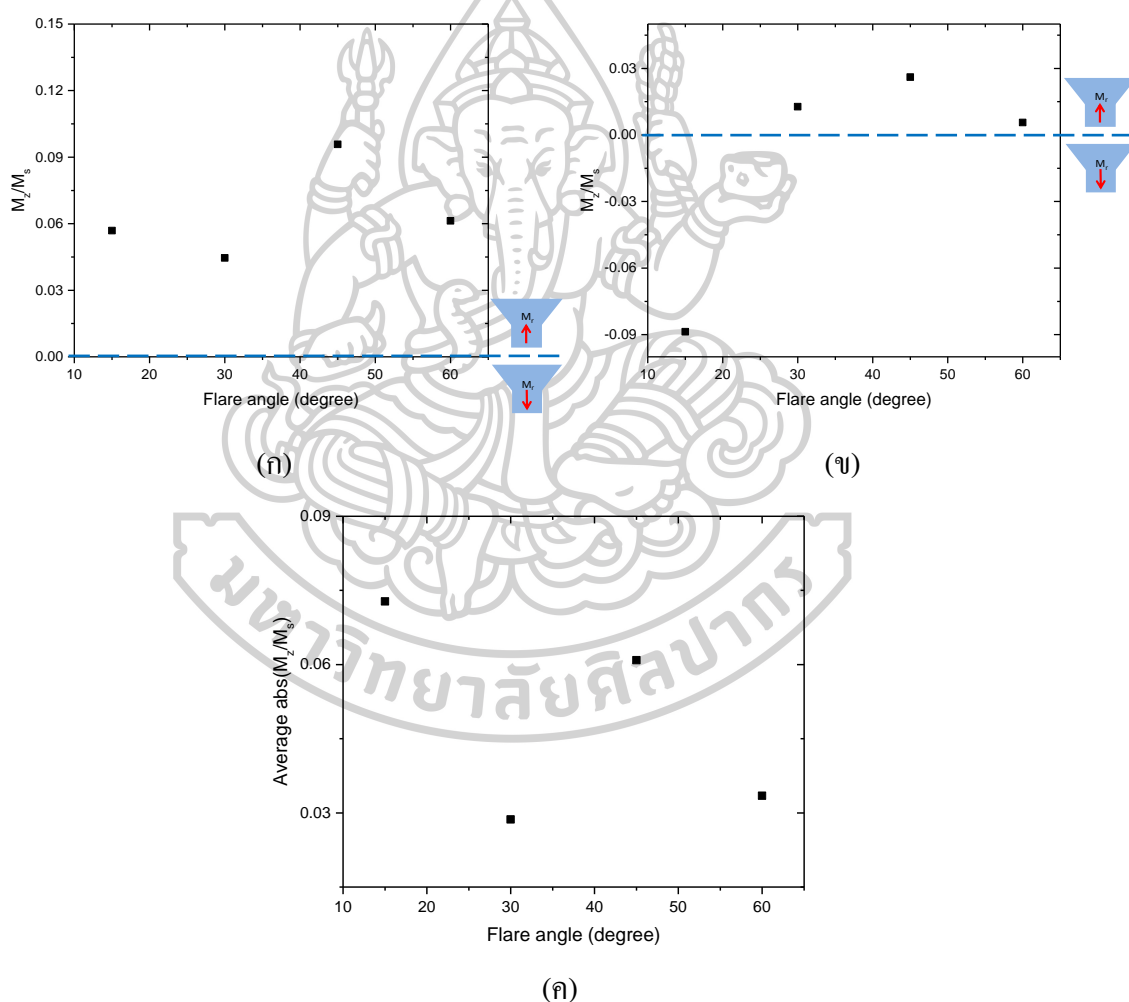


รูปที่ 5.7 โดเมนแม่เหล็กบริเวณ โยคของหัวเขียนในสถานะคงค้าง โดย (ก) มุมแฟลร์ขนาด 15° (ข) มุมแฟลร์ขนาด 30° (ค) มุมแฟลร์ขนาด 45° และ (ง) มุมแฟลร์ขนาด 60°

จากรูปที่ 5.7 เราสังเกตเห็นว่าบริเวณ โยคของหัวเขียนสำหรับหัวเขียนที่มีขนาดของมุมแฟลร์แตกต่างกัน จะเกิด โดเมนแม่เหล็กในลักษณะที่แตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือเมื่อหัวเขียนมีขนาดมุมแฟลร์เท่ากับ 15° และ 60° จะเกิดโดเมนแม่เหล็กแบบปิดทั่วทั้งบริเวณ โยคของหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ก) และ 5.7 (ง) ตามลำดับ จึงทำให้มีแนวโน้มที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ โยค แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหากหัวเขียนมุมแฟลร์ขนาด 30° และ 45° ดังรูปที่ 5.7 (ข) และ 5.7 (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ โยคเกิดกำแพงโดเมนแบบปิดแต่มีบางบริเวณที่ไม่เป็นโดเมนปิด ซึ่งทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่บริเวณ โยคได้มากกว่า

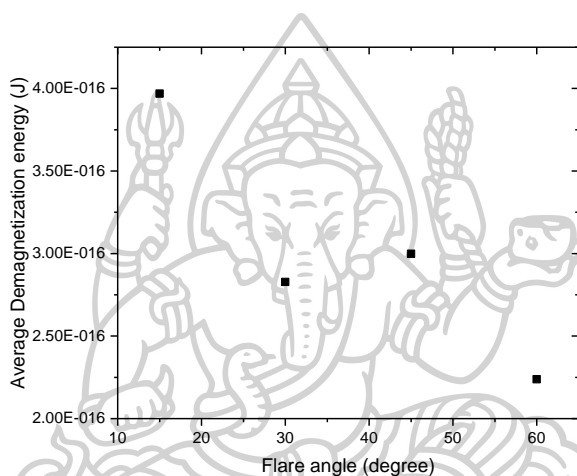
และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.1.2 พบว่าโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้เนื่องจากอธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ว่าในสถานะสมดุลแมกนีโทเซชันมันพยายามจัดเรียงตัวไปอยู่ในแนวเดียวกันกับ easy axis อยู่แล้ว แต่ว่าถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปคนละทิศทาง การเกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างก็จะไม่เหมือนเดิม แต่ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนกัน

จากนั้นนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีโทเซชันคงค้างในแนวแกน z พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์กว้างขึ้นจะทำให้บริเวณปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.8



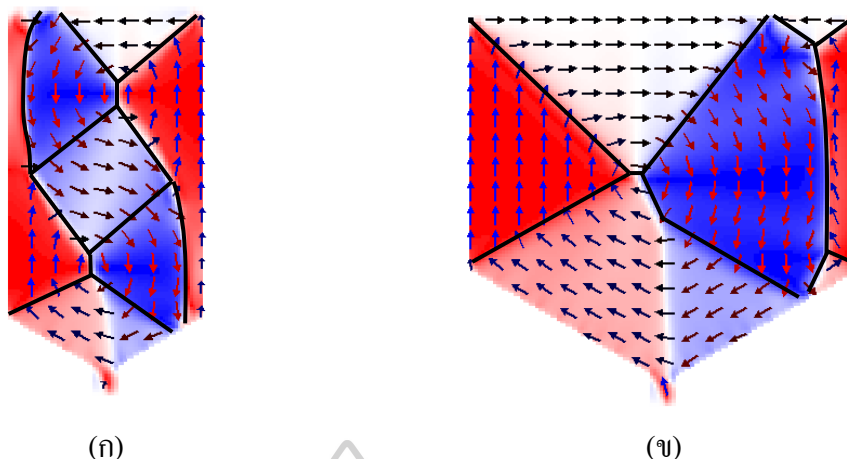
รูปที่ 5.8 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60° โดย (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีโทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ (ข) ขนาดและทิศทางของแมกนีโทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ -z (ค) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์แมกนีโทเซชันจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ -z

จากกราฟในรูปที่ 5.8 (ค) แสดงค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ และ $-z$ (สนใจเฉพาะขนาด) โดยสังเกตได้ว่ากรณีที่หัวเขียนมีมุมแฟลร์ขนาด 30° จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยพบว่าเมื่อมุมแฟลร์กว้างขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนลดลง แต่กรณีที่หัวเขียนมุมแฟลร์ขนาด 30° จะมีค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลง ที่บ่งบอกว่าหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ 30° มีการรั่วไหลของพลังงานภายในลดลง ดังนั้นจึงทำให้ปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ลดลงด้วย



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และทิศ $-z$ เมื่อหัวเขียนมีมุมแฟลร์เท่ากับ 15° 30° 45° และ 60°

จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาว โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:2 และ 1:1 สำหรับแบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หัวเขียนและวัสดุแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันเริ่มต้นเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.1.2 ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกดังแสดงในรูปที่ 5.10 (ยกตัวอย่างเฉพาะกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$)



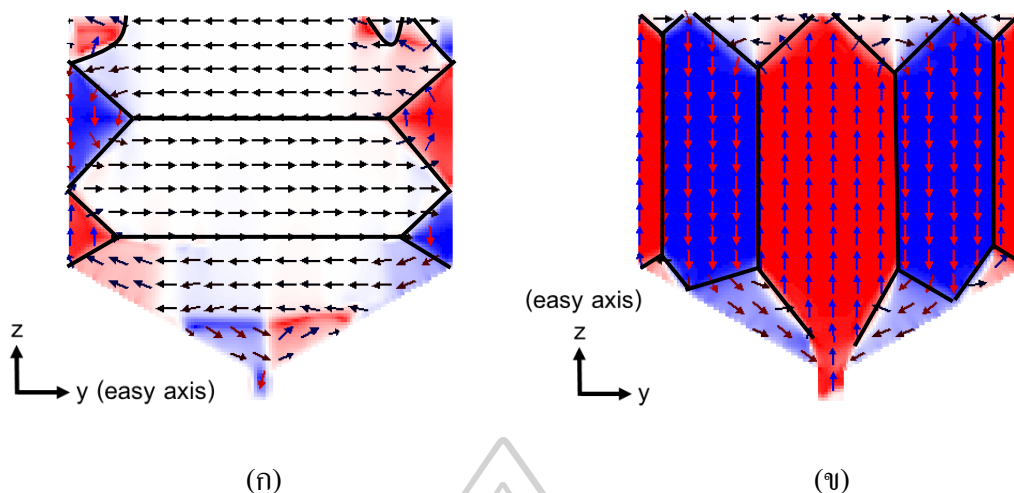
รูปที่ 5.10 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้าง โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาว มีค่าเท่ากับ 1:2 สำหรับ (ก) และ 1:1 สำหรับ (ข)

จากรูปที่ 5.10 (ก) จะเห็นว่า โยคที่มีความยาวด้านกว้างสั้นกว่าด้านยาว เกิดโดเมนปิด แต่ว่ามีบางบริเวณที่ไม่เป็นโดเมนปิด จึงส่งผลทำให้หัวเขียนมีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างพุ่งลงสู่ปลายโพลได้มากกว่า และสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยสนามแม่เหล็กคงค้างโดยสนใจเฉพาะขนาด (Average $\text{abs}(M_z/M_s)$) ได้เท่ากับ 2.87×10^{-2} แต่ในทางตรงกันข้าม โยคที่มีความยาวด้านกว้างยาวกว่าด้านยาว จะเกิดโดเมนปิดทั่วทั้งบริเวณโยคของหัวเขียนดังในรูปที่ 5.10 (ข) ซึ่งช่วยลดการเกิดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างพุ่งลงสู่ปลายโพลและยังทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ลดลงอีกด้วย โดยมีค่าเฉลี่ยสนามแม่เหล็กคงค้างเท่ากับ 1.87×10^{-2}

5.2.1.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ easy axis

จากการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.1.3 พบว่าการกำหนดทิศทางของ easy axis ให้กับหัวเขียนจะส่งผลต่อรูปร่างของโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และส่งผลต่อค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชัน และการคงค้างของสนามแม่เหล็กเป็นอย่างมาก

ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบจากทิศทางของ easy axis แค่ 2 ทิศทางที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียน เนื่องจากผลของการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด โดยเลือกใช้แบบจำลองหัวเขียนแบบที่ 3 (รูปที่ 4.2 (ค)) และทำการกำหนดทิศทางของ easy axis ในแนวอนนให้อยู่บนแกน y และ easy axis ในแนวตั้งให้อยู่บนแกน z ตามลำดับ กำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนและแมกนีไทเซชันเริ่มต้นจะถูกกำหนดเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.1.3 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แมกนีไทเซชันในสถานะคงค้างของหัวเขียน ลูกศรแทนทิศของแมกนีไทเซชัน โดยที่ (ก) easy axis อยู่ในแนวแกน y และ (ข) easy axis อยู่ในแนวแกน z

จากนั้นคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลแล้วพบว่าหัวเขียนที่มี easy axis อยู่ในแนวแกน y จะมีค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างต่ำกว่า easy axis อยู่ในแนวแกน z โดยมีค่าเท่ากับ 1.22×10^{-2} และ 24.05×10^{-2} ตามลำดับ นอกจากการกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกน y จะทำให้ปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ต่ำแล้ว มันยังมีค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่ต่ำกว่า easy axis อยู่ในแนวแกน z อีกด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 5.47×10^{-16} J และ 5.60×10^{-16} J ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองในหัวข้อดังรูปที่ 4.2.1.3 พบว่าบริเวณโยคของหัวเขียนเกิดแมนแม่เหล็กในลักษณะที่คล้ายกัน แต่ต่างกันตรงที่มีจำนวนโดเมนแม่เหล็กลดลงและเพิ่มขึ้น เมื่อ easy axis อยู่ในแนวแกน y และอยู่ในแนวแกน z ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกคนละทิศทางจึงทำให้การเกิดโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างไม่เหมือนเดิมแต่ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนกัน แต่สุดท้ายแล้วการกำหนดให้ easy axis อยู่ในแนวแกน y ถือว่าเป็นทิศทางที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล และทำให้มีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 4.2.1.3

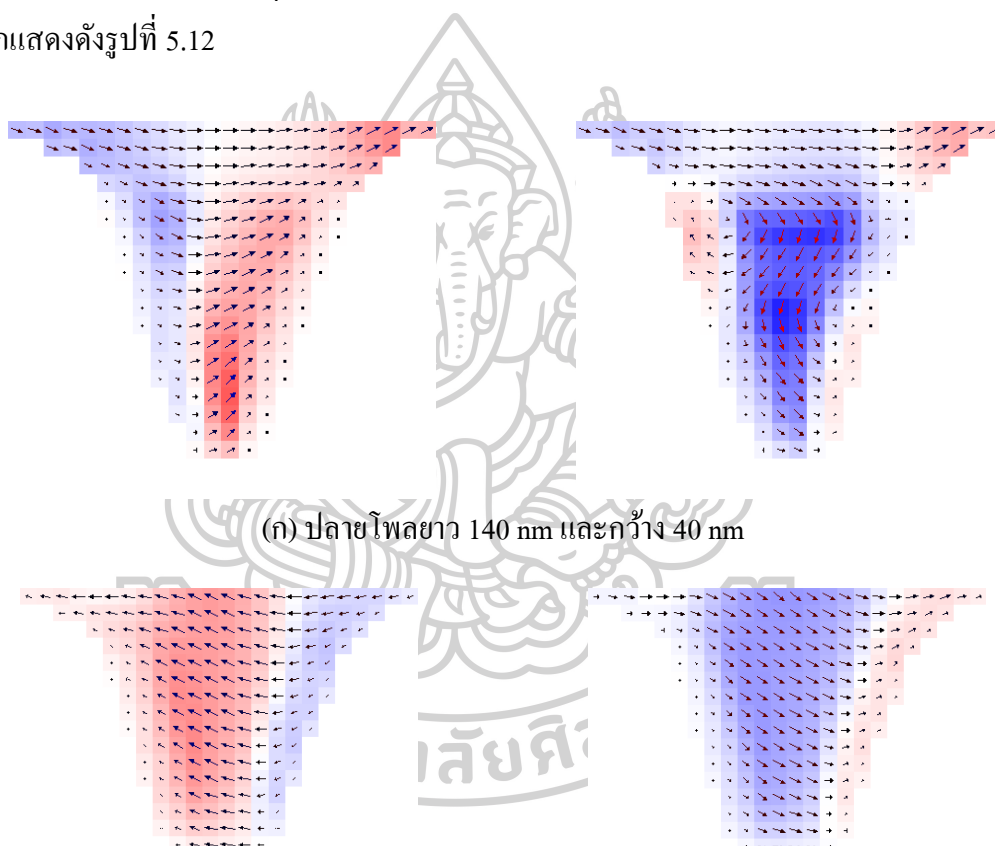
5.2.2 ผลการจำลองสำหรับหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 พบว่าการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกจากกระบวนการผลิตมีผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่โพลหัวเขียนเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงสนใจศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลอันเนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวด และผลกระทบจากการการกัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน โดยเลือกใช้แบบจำลอง

ของหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับขนาดจริง และทำการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนเหมือนกันกับการจำลองในหัวข้อที่ 4.2.2

5.2.2.1 ผลเนื่องจากกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน

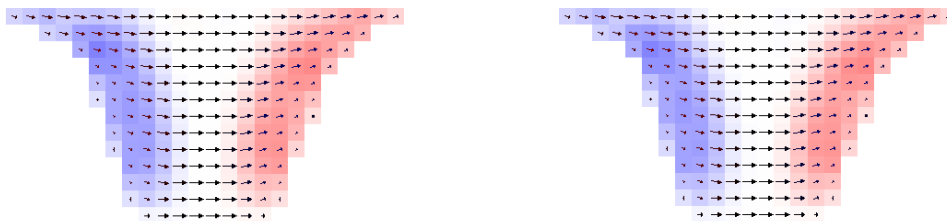
ในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลกระทบเนื่องจากกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียนต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็ก โดยใช้แบบจำลองของหัวเขียนแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ง) และทำการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.2.1 รวมทั้งกำหนดขนาดของรูปทรงของแบบจำลองและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวเขียนด้วย ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 5.12



(ก) ปลายโพลยาว 140 nm และกว้าง 40 nm

(ข) ปลายโพลยาว 120 nm และกว้าง 60 nm

รูปที่ 5.12 แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้างจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm เมื่อภาพซ้ายเป็นกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และภาพขวาเป็นกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $-z$ โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน



(ค) ปลายโพลยาว 100 nm และกว้าง 80 nm



(ง) ปลายโพลยาว 90 nm และกว้าง 90 nm

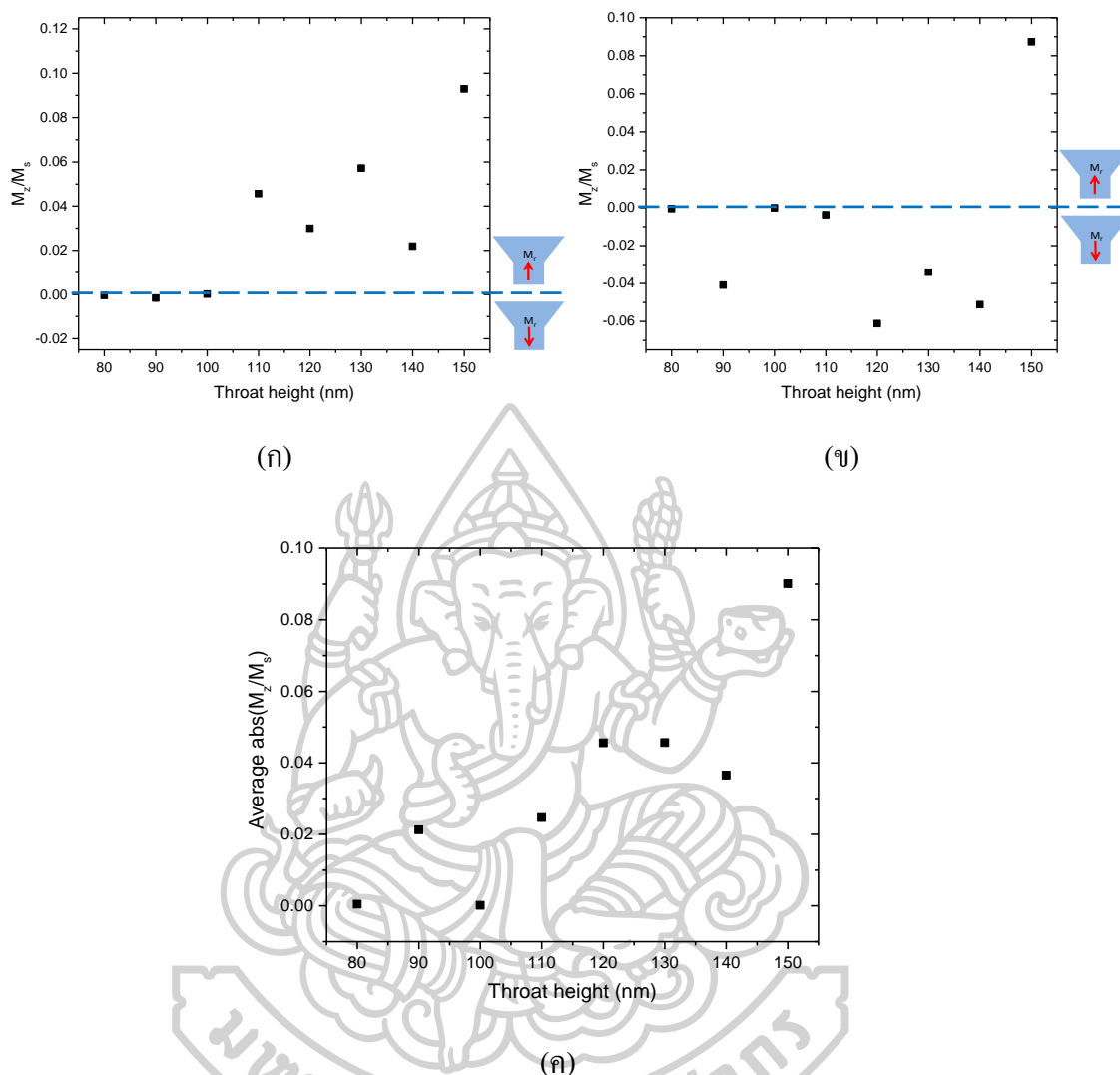


(จ) ปลายโพลยาว 80 nm และกว้าง 100 nm

รูปที่ 5.12 (ต่อ) แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลในสถานะคงค้างจากโปรแกรม OOMMF ที่ความหนา 40 nm เมื่อภาพซ้ายเป็นกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และภาพขวาเป็นกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $-z$ โดยที่ปลายโพลมีความยาวแตกต่างกัน

จากผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังรูปที่ 5.12 โดยเราจะยกตัวอย่างผลการจำลองของหัวเขียนเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลเท่ากับ 140 nm 120 nm 100 nm 90 nm และ 80 nm ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (ก) 5.12 (ข) 5.12 (ค) 5.12 (ง) และ 5.12 (จ) ตามลำดับ โดยเราจะสังเกตเห็นว่าหัวเขียนที่มีความยาวปลายโพลยาวมาก ๆ แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลมันจะจัดเรียงตัวไปตามแนวแกนยาวมากกว่าแกนสั้น เป็นผลเนื่องจากผลของแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า ดังนั้นส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลมีแนวโน้มที่จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาได้มากกว่าเมื่อขนาดของปลายโพลเพิ่มขึ้น

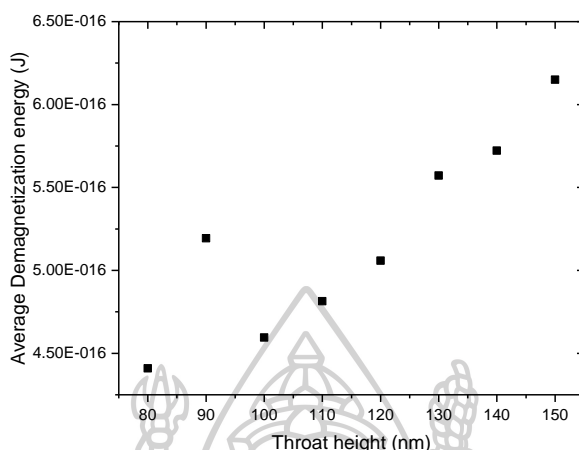
ดังนั้นเมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่าเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.13 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 nm ถึง 150 nm โดย (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z (ข) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ -z และ (ค) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์แมกนีไทเซชันจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ -z

จากกราฟในรูปที่ 5.13 (ง) แสดงค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างของทั้งสองกรณี (สนใจเฉพาะขนาด) เราสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อหัวเขียนมีปลายโพลยาว 90 nm จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากในกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ -z ที่ทำให้แมกนีไทเซชันบริเวณปลายโพลส่วนใหญ่พยายามเรียงตัวไปในทิศ -z ตามทิศของสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 5.11 ดังนั้นจึงส่งผลทำให้หัวเขียนที่มีปลายโพลยาว 90 nm มีแนวโน้มในการ

เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเร็วไหลได้มากกว่า โดยสามารถดูได้จากค่าเฉลี่ยของพลังงานสนามแม่เหล็ก-ไทเซชันดังแสดงในรูปที่ 5.14



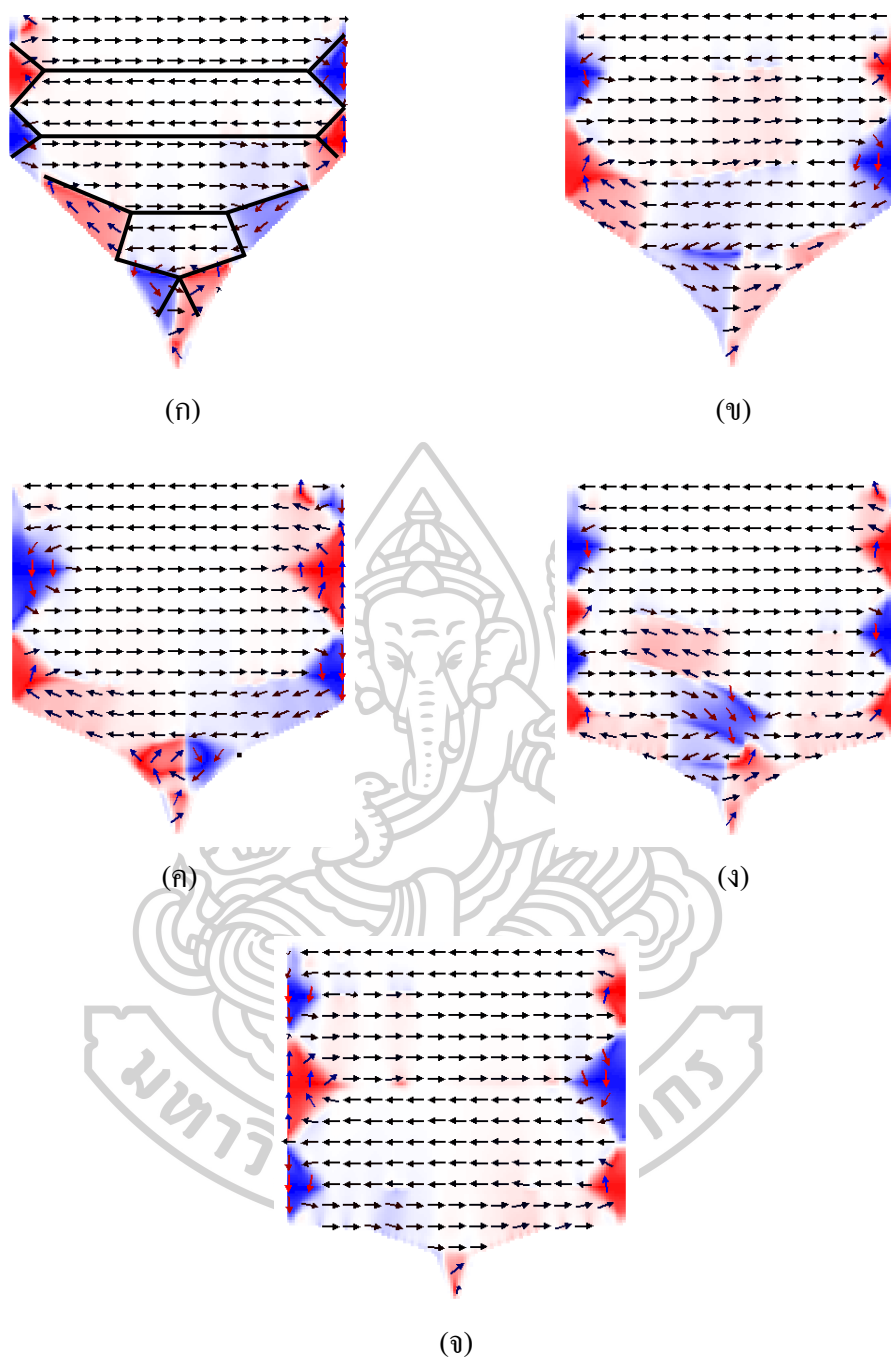
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z และทิศ -z โดยที่หัวเขียนมีความยาวปลายโพลตั้งแต่ 80 ถึง 150 nm

และจากกราฟในรูปที่ 5.14 พบว่าเมื่อขนาดปลายโพลมีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่สำหรับในกรณีที่ปลายโพลยาว 90 nm จะมีค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงส่งผลให้ปลายโพลขนาด 90 nm มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่สูงขึ้นนั่นเอง

5.2.2.2 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์

การเพิ่มขนาดของมุมแฟลร์ในการจำลองที่ 5.2.1.2 ส่งผลทำให้บริเวณปลายโพลของหัวเขียนมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างสูงขึ้น นั่นก็หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์จะมีผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลเป็นอย่างมาก

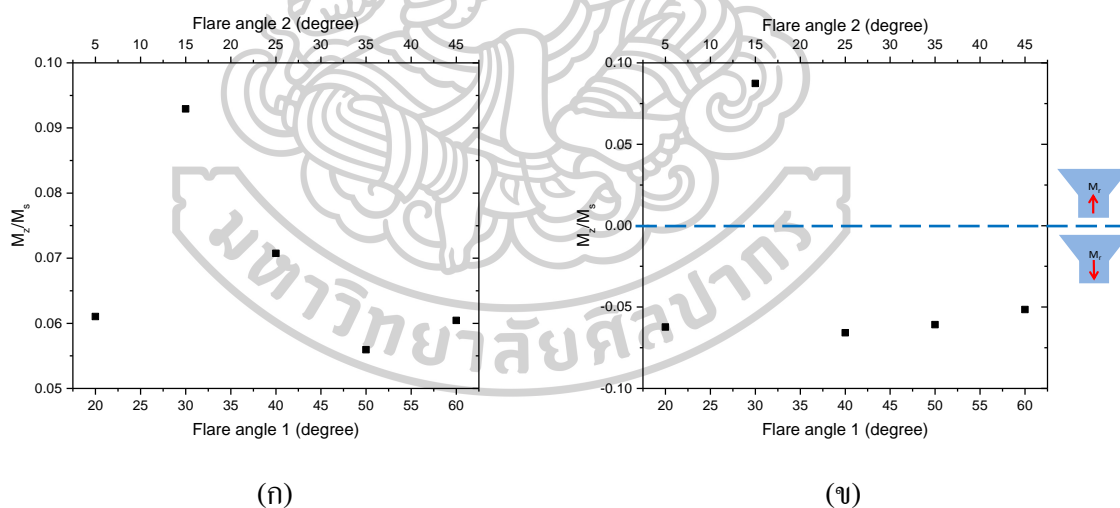
ดังนั้นในการจำลองนี้ เราต้องการศึกษาผลของขนาดมุมแฟลร์สำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง โดยเราจะเลือกใช้แบบจำลองของหัวเขียนแบบที่ 4 ดังในรูปที่ 4.2 (ง) และทำการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 ไปพร้อมกัน เหมือนกับการจำลองในหัวข้อ 4.2.2.2 ได้ผลการจำลองไมโครแมกเนติกดังรูปที่ 5.15 โดยยกตัวอย่างเฉพาะกรณีที่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง +z



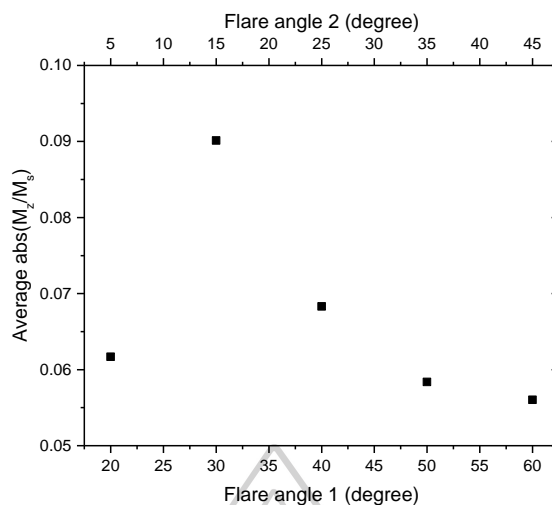
รูปที่ 5.15 รูปแบบของโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างสำหรับแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ สำหรับรูป (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.15 สามารถสังเกตเห็นว่าบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนปิดในลักษณะที่แตกต่างกันไป กล่าวคือเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ทั้งสองมุมลดลงทีละ 10° ทั้งสองมุม ส่งผลให้บริเวณ โยคเกิดโดเมนปิดที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดมุมแฟลร์แคบลง โดยเฉพาะหัวเขียนที่มีมุมแฟลร์ขนาด $(30^\circ, 15^\circ)$ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ง) เราจะเห็นว่าแมกนีไทเซชันพยายามบริเวณ โยค ตรงกลางมีการเรียงตัวไปในทิศทางอื่นที่ไม่ใช่แนว easy axis จึงทำให้โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่แต่ยังคงรักษาพลังงานให้น้อยที่สุด และด้วยเหตุนี้จึงมีแนวโน้มที่ก่อให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาได้มากกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ $(20^\circ, 5^\circ)$ ดังแสดงในรูป 5.15 (จ) สังเกตเห็นว่าบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนปิดแทบจะไม่มีแมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวไปในทิศทางอื่นที่นอกเหนือจากแนวแกนนอน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่ช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งลงสู่ปลายโพลได้มากกว่ากรณีอื่น

เมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z พบว่าถ้าขนาดของมุมแฟลร์ทั้งสองมุมลดลงพร้อมกันทั้งทีละ 10° ส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.16



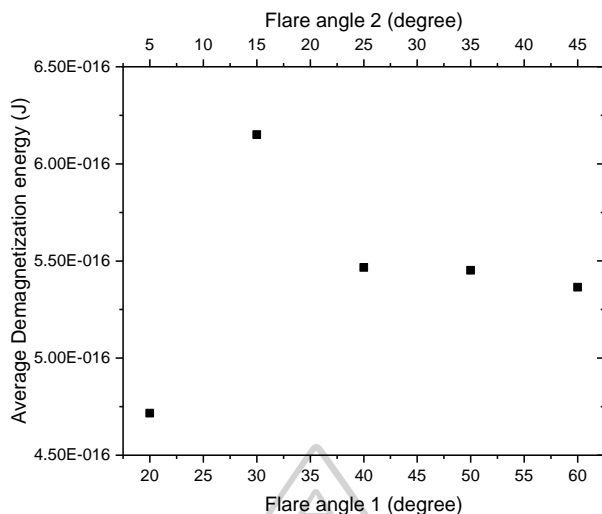
รูปที่ 5.16 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ โดย (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ (ข) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ -z



(ค)

รูปที่ 5.16 (ต่อ) ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°) โดย (ค) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์แมกนีไทเซชันจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ -z

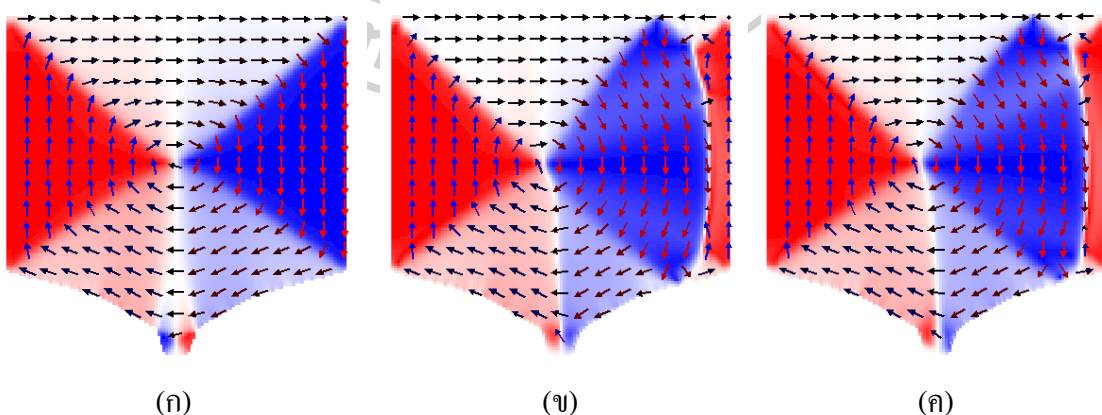
จากกราฟในรูปที่ 5.16 (ค) แสดงค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ +z และ -z โดยสนใจเฉพาะขนาด พบว่าเมื่อหัวเขียนมีมุมแฟลร์ขนาด (20°,5°) จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากบริเวณโขคของหัวเขียนเกิดโดเมนแบบปิดที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลลงสู่ปลายโพลของหัวเขียนดังในรูปที่ 5.15 (จ) โดยเราสามารถพิจารณาการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจากค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 5.17 พบว่าเมื่อมุมแฟลร์แคบลงจะทำให้ค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนเพิ่มขึ้น แต่กรณีที่มุมแฟลร์ขนาด (20°,5°) จะมีค่าเฉลี่ยพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลง แสดงว่าหัวเขียนที่มีขนาดของมุมแฟลร์เท่ากับ (20°,5°) มีการรั่วไหลของพลังงานภายในลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลลดลงด้วย



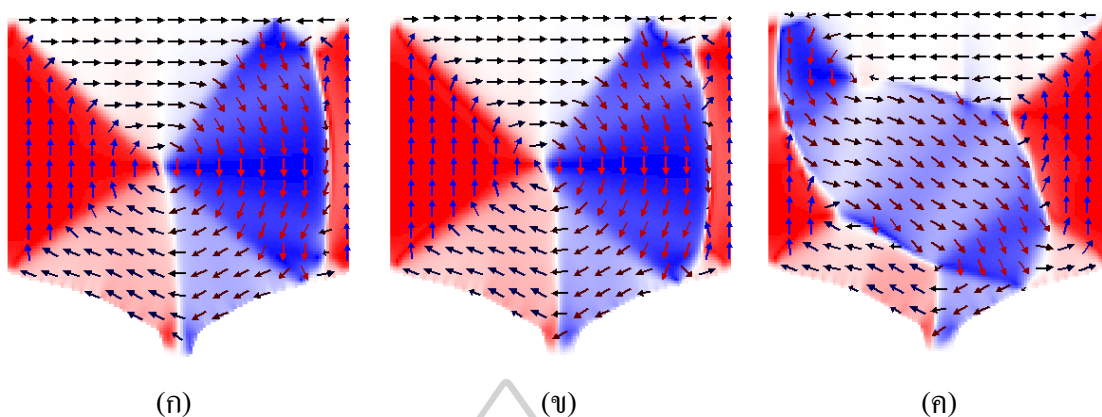
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z และทิศ -z โดยที่หัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เท่ากับ (60°,45°) (50°,35°) (40°,25°) (30°,15°) และ (20°,5°) ตามลำดับ

5.2.3 ผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียน

ในหัวข้อนี้เราต้องการศึกษาผลกระทบของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ใช้สร้างหัวเขียนที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพล โดยวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่เลือกใช้ได้แก่โลหะผสม NiFe และ CoFeNi ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 4.4 กำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กและเลือกใช้แบบจำลองหัวเขียนเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.3 ผลการจำลองไมโครแมกเนติกแสดงดังในรูปที่ 5.18 และ 5.19 สำหรับโลหะผสม NiFe และ CoFeNi ตามลำดับ

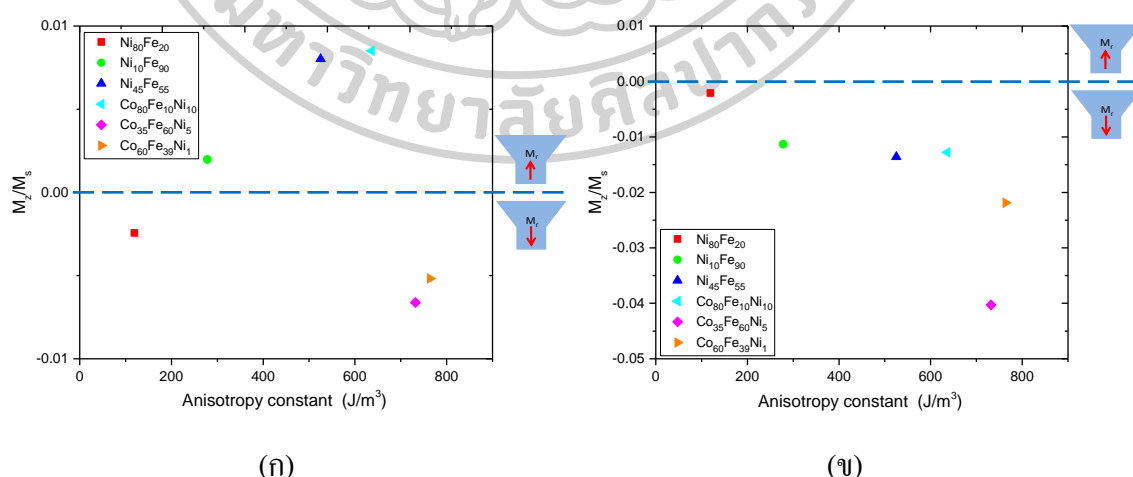


รูปที่ 5.18 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม (ก) $Ni_{30}Fe_{20}$ (ข) $Ni_{10}Fe_{90}$ และ (ค) $Ni_{45}Fe_{55}$ ตามลำดับ สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ +z

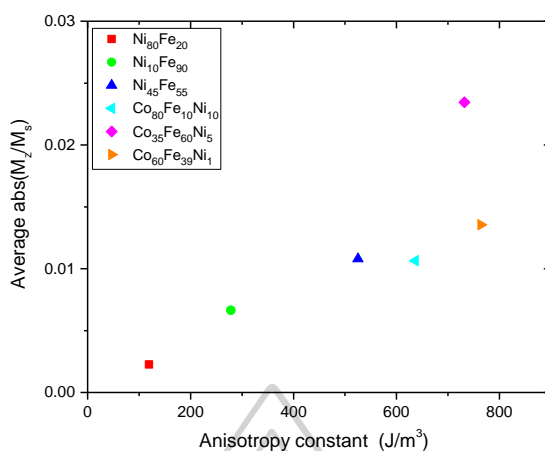


รูปที่ 5.19 รูปแบบโดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างของหัวเขียนแม่เหล็ก เมื่อวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม (ก) $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{10}$ (ข) $\text{Co}_{35}\text{Fe}_{60}\text{Ni}_5$ และ (ค) $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{39}\text{Ni}_1$ ตามลำดับ สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$

จากผลการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 5.18 และ 5.19 พบว่าโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กเหมือนกับการจำลองที่ 4.2.3 กล่าวคือเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าค่า K_u จะทำให้แมกนีไทเซชันพยายามหมุนไปในแกนเดียวกับ easy axis ได้ง่ายขึ้น แต่โดเมนแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย และยังคงรักษาสมดุลของพลังงานภายในหัวเขียนให้น้อยที่สุด เมื่อนำผลลัพธ์จากการจำลองไมโครแมกเนติกมาคำนวณหาความเป็นแมกนีไทเซชันคงค้างในแนวแกน z ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.20



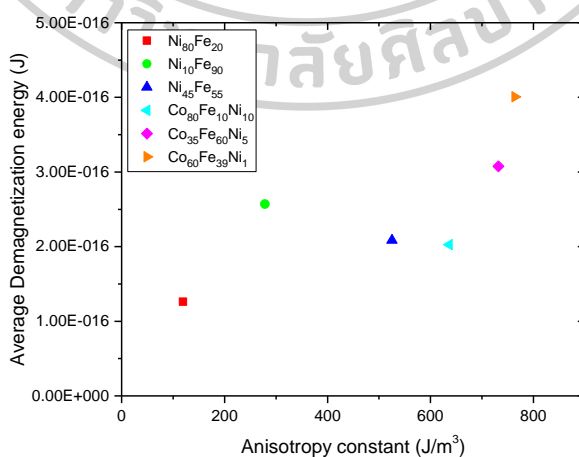
รูปที่ 5.20 ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน โดยที่ (ก) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ และ (ข) ขนาดและทิศทางของแมกนีไทเซชันกรณีป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $-z$



(ค)

รูปที่ 5.20 (ต่อ) ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพล เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็นโลหะผสมต่างชนิดกัน โดยที่ (ค) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์แมกนีไทเซชันจากกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ และ $-z$

จากในรูปที่ 5.20 (ง) แสดงค่าเฉลี่ยของสนามแม่เหล็กคงค้างของกรณีการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ และ $-z$ (สนใจเฉพาะขนาด) พบว่าเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u ที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ปลายโพลมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นผลมาจากฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างที่ไหลลงฟุ้งลงสู่ปลายโพลมากกว่า โดยจะพิจารณาการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กได้จากค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานดีแมกนีไทเซชัน สำหรับกรณีป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ $+z$ และทิศ $-z$ เมื่อหัวเขียนมีวัสดุแม่เหล็กเป็น โลหะผสมต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 5.21 พบว่าเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูงจะส่งผลทำให้หัวเขียนมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันสูงขึ้นไปด้วย ส่งผลทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กหรือพลังงานภายในหัวเขียนมีการรั่วไหลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณ โพลและค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนแล้ว พบว่าหัวเขียนที่ใช้วัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็นโลหะผสม NiFe และ CoFeNi โดยมีอัตราส่วนเป็น $Ni_{80}Fe_{20}$ และ $Co_{80}Fe_{10}Ni_{10}$ จะทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่โพลน้อยที่สุดสำหรับวัสดุแม่เหล็ก NiFe และ CoFeNi เช่นเดียวกับผลการจำลองที่ 4.2.3 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและสามารถยอมรับได้



บทที่ 6

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอก สนามแม่เหล็กภายนอกที่ศึกษาได้แก่ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจากกระบวนการ MFI และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำ ในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก รวมทั้งศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนจากกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน และศึกษาผลของทิศทาง easy axis และวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนต่อสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลของหัวเขียน โดยทำการจำลองไมโคร-แมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์กิลเบิร์ต โดยทำการวิเคราะห์จากค่านอมัลไลซ์ของแมกนีไทเซชันเฉลี่ยในแนวแกน z (M_z/M_s) บริเวณปลายโพลของหัวเขียน และพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน

แบบจำลองของหัวเขียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นภาพจำลองสองมิติของหัวเขียนมุมมองด้านหน้า (front view) โดยกำหนดให้มีพื้นที่ความกว้างและความยาวเท่ากับ $2000 \text{ nm} \times 2000 \text{ nm}$ และองค์ประกอบของหัวเขียนมีขนาดดังนี้ 1) ความยาวของหัวเขียนด้านกว้าง (head width) เท่ากับ 1280 nm 2) ความยาวของหัวเขียนด้านยาว (head length) เท่ากับ 1280 nm 3) ความยาวที่ปลายโพลของหัวเขียน (throat height) เท่ากับ 100 nm 4) ความกว้างของปลายโพล (track width) เท่ากับ 80 nm และ 5) ขนาดของมุมแฟลร์ (flare angle) เท่ากับ 30° เมื่อพื้นที่ที่เป็นองค์ประกอบของหัวเขียนจะถูกกำหนดให้เป็นสีดำและพื้นที่ที่ไม่ใช่ขององค์ประกอบของหัวเขียนจะกำหนดให้เป็นสีขาว แทนวัสดุแม่เหล็กต่างชนิดกัน

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติกถูกกำหนดให้ขนาดความกว้าง (y range) ความยาว (z range) และความหนา (x range) เท่ากับ $2000 \text{ nm} \times 2000 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$ ตามลำดับ โดยให้แกน x เป็นทิศดาวน์แตรีก แกน y เป็นทิศรอสแตรีก และแกน z อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งตั้งฉากกับด้าน ABS กำหนดให้พื้นที่สีขาวเป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic) และสีดำเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกตัวอย่าง (ferromagnetic material) แมกนีไทเซชันเริ่มต้นถูกกำหนดให้อยู่ในทิศ z

ในการจำลองไมโครแมกเนติก หัวเขียนถูกแบ่งออกเป็นเซลล์ขนาดเล็กรังสี่เหลี่ยม โดยความยาวแต่ละด้านของเซลล์จะต้องไม่เกินความยาวเอกซ์เชนจ์ เพื่อให้โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ใน

เซลล์ติดกันไม่สามารถส่งอันตรกิริยาเอ็กเซนจต์ต่อกันได้ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่เซลล์ติดกันไม่ชี้หรือหันไปในทิศเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดคลาดเคลื่อนของการคำนวณแบบจำลองไมโครแมกเนติกได้น้อยลง

เมื่อหัวเขียนได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 1000 mT ซึ่งเป็นการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการบวนการ MFI ทำให้แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง โดยพยายามเบนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแมกนีไทเซชันจะมีทิศเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก จากนั้นหยุดป้อนสนามแม่เหล็กแบบทันทีทันใดแมกนีไทเซชันจะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง พบว่าแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโดเมนแม่เหล็กหรืออยู่ในสภาวะคงค้าง โดเมนแม่เหล็กนี้จะส่งผลให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งออกจากบริเวณโขคของหัวเขียน ซึ่งหมายความว่าภายในหัวเขียนมีการรั่วไหลของพลังงานดีแมกนีไทเซชันเกิดขึ้น และพลังงานนี้จะส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลด้วย ดังนั้นเราจึงศึกษาการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนจากกรณีที่แมกนีไทเซชันเข้าสู่สภาวะสมดุลสุดท้าย โดยวิเคราะห์จากค่า M_z/M_0 เฉพาะบริเวณปลายโพลของหัวเขียน

อีกหนึ่งปัจจัยของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ส่งผลต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียน คือสนามแม่เหล็กภายนอกที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก สำหรับการจำลองไมโครแมกเนติกเราจะจำลองการกระจายกระแสให้กับขดลวดตัวนำ ด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งไปและกลับขนาดตั้งแต่ -20 mT ถึง 20 mT ให้กับหัวเขียนในทิศทางตามแนวแกน z โดยป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 20 mT ให้กับหัวเขียนในทิศ +z แล้วหยุดป้อนสนามแม่เหล็กแบบทันทีทันใด และป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกขนาด -20 mT ให้กับหัวเขียนในทิศ -z แล้วหยุดป้อนทันที เพื่อจำลองการคงค้างของสนามแม่เหล็กที่เกิดการกระจายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับของขดลวดตัวนำ

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย ยังส่งผลทำให้การคงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนมีการเปลี่ยนแปลง โดยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหัวเขียนที่ใช้ในการจำลองไมโครแมกเนติก มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกันตลอดการจำลอง แต่ภาพแบบจำลองของหัวเขียนในแต่ละองค์ประกอบมีขนาดดังนี้ 1) ความยาวของหัวเขียนด้านกว้าง (head width) เท่ากับ 640 nm 2) ความยาวของหัวเขียนด้านยาว (head length) เท่ากับ 1280 nm 3) ความยาวที่ปลายโพลของหัวเขียน (throat height) เท่ากับ 100 nm 4) ความกว้างของปลายโพล (track width) เท่ากับ 80 nm และ 5) ขนาดของมุมแฟลร์ (flare angle) เท่ากับ 30° โดย

ในที่นี้ เรายังไม่สนใจผลของแอนไอโซโทรปีอันเนื่องมาจากโครงสร้างของผลึก ($K_u = 0 \text{ J/m}^3$) เพื่อดูผลกระทบจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรง (shape anisotropy) เท่านั้น

การศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวปลายโพลต่อการคงค้ำของสนามแม่เหล็ก โดยในแบบจำลองนี้จะใช้แบบจำลองหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย แต่เปลี่ยนแปลงค่าความยาวปลายโพลของหัวเขียนตั้งแต่ 50-300 nm เมื่อจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ในสถานะสมดุลสุดท้ายพบว่าหัวเขียนที่มีความยาวปลายโพลเพิ่มขึ้น ทำให้แมกนีไทเซชันพยายามจัดเรียงตัวไปตามแนวยาวมากกว่าแนวสั้นของปลายโพล และมีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลหรือพลังงานภายในหัวเขียนได้มากกว่า ซึ่งการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในลักษณะนี้ จะเป็นผลเนื่องมาจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรง

เมื่อคำนวณค่า M_z/M_s พบว่าถ้าปลายโพลของหัวเขียนมีความยาวเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่บริเวณปลายโพลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และถ้าปลายโพลมีความยาวเพิ่มขึ้นยังทำให้ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียนเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในกระบวนการ MFI กรณีหัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาด 150 nm จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากความยาวของปลายโพลมีขนาดพอเหมาะ (เป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กซ์เชนจ์ (l_{ex})) จึงทำให้เกิดผนังโดเมน (domain wall) แบบปิดขึ้น และยังทำให้มีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงอีกด้วย แต่สำหรับกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก เมื่อหัวเขียนมีความยาวปลายโพลขนาด 100 nm พบว่ามีค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่ปลายโพลต่ำ แต่มีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่สูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากบริเวณโพลเกิดโดเมนแม่เหล็กที่ไม่เป็นโดเมนปิดแบบสมบูรณ์ จึงก่อให้เกิดการรั่วไหลของพลังงานภายในหัวเขียนที่มากขึ้น ดังนั้นกรณีที่ปลายโพลยาว 150 nm เป็นความยาวที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ MFI และปลายโพลยาว 100 nm เป็นความยาวที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก แต่ขนาดของปลายโพลทั้งสองยังถือว่าทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่น้อยและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้สำหรับทั้งสองกระบวนการ

นอกจากความยาวปลายโพลของหัวเขียนที่ส่งผลต่อการคงค้ำสนามแม่เหล็กแล้ว การกำหนดโดเมนแม่เหล็กบริเวณโพลก็ส่งผลต่อการคงค้ำสนามแม่เหล็กที่ปลายโพลได้เหมือนกัน ดังนั้นจึงศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณโพล เพื่อกำหนดรูปทรงโดเมนแม่เหล็กที่ช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้ำที่บริเวณโพล โดยเฉพาะขนาดของมุมแฟลร์และความยาวของหัวเขียนทั้งด้านกว้าง (head width) และด้านยาว (head length)

สำหรับการศึกษาผลของขนาดมุมแฟลร์จะใช้แบบจำลองหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย โดยเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์ดังนี้ 15° 30° 45° และ 60° เมื่อจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก มีผลการจำลองที่แตกต่างกันดังนี้ สำหรับกรณีของกระบวนการ

MFI ในสภาวะสมดุลสุดท้ายพบว่าหัวเขียนที่มีขนาดมุมเพลร์เท่ากับ 45° และ 60° จะมีแนวโน้มทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ โยคพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามหัวเขียนที่มีขนาดมุมเพลร์เท่ากับ 15° และ 30° จะช่วยลดฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ โยคพุ่งลงสู่ปลายโพลได้มากกว่า เมื่อคำนวณหาค่า M_z/M_s พบว่าหัวเขียนมีขนาดของมุมเพลร์ที่กว้างขึ้นส่งผลให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างที่บริเวณปลายโพลเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากหัวเขียนที่มีมุมเพลร์กว้างจะส่งผลทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างบริเวณ โยคพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่าหัวเขียนที่มีมุมเพลร์แคบ ๆ โดยดูจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชัน พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมเพลร์กว้างขึ้นจะส่งผลทำให้มีพลังงานรั่วไหลสูงขึ้นเช่นกัน

แต่สำหรับกรณีของกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก พบว่าบริเวณ โยคเกิดโดเมนแม่เหล็กในลักษณะที่แตกต่างจากเดิม ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะสมดุลแมกนีไทเซชันมันพยายามจัดเรียงตัวไปอยู่ในแนวเดียวกันกับ easy axis อยู่แล้ว แต่ถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปคนละทิศทางการเกิด โดเมนแม่เหล็กในสถานะคงค้างก็จะไม่เหมือนเดิม แต่ยังคงรักษาสมดุลของพลังงานให้น้อยที่สุดเหมือนเดิม และเมื่อคำนวณหาค่า M_z/M_s พบว่าเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมเพลร์กว้างขึ้นจะส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างลดลง และยังทำให้ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลลงสู่ปลายโพล แต่ในกรณีที่หัวเขียนมีมุมเพลร์ขนาด 30° มีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งทำให้ค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ปลายโพลลดลงด้วย แม้ว่าในกระบวนการ MFI หัวเขียนที่มีมุมเพลร์ขนาด 15° จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ต่ำที่สุด แต่ในแง่ของขนาดสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียน หัวเขียนที่มีมุมเพลร์ขนาด 15° ปลายโพลจะมีสนามแม่เหล็กที่ใช้เขียนต่ำมากและสนามที่ไม่ใช่เขียนสูงมาก ดังนั้นหัวเขียนที่มีมุมเพลร์ขนาด 30° จึงเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งสองกระบวนการ

ผลจากขนาดของหัวเขียนบริเวณ โยค โดยทำการศึกษาแบบจำลองหัวเขียนที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อด้านยาวเป็น 1:2 และ 1:1 เมื่อจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ในสภาวะสมดุลสุดท้ายพบว่า หัวเขียนที่มีอัตราส่วนเป็น 1:2 บริเวณ โยคจะเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวตั้ง และหัวเขียนที่มีอัตราส่วนเป็น 1:1 จะเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวนอน การเกิดโดเมนในแนวตั้งจะส่งผลให้มีแนวโน้มที่ทำให้เกิด ฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างพุ่งลงสู่ปลายโพลมากกว่าโดเมนในแนวนอน และเมื่อคำนวณหาค่า M_z/M_s ยังพบอีกว่าโยคของหัวเขียนที่มีความยาวด้านกว้างสั้นกว่าด้านยาว (1:2) จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลสูงกว่าโยคที่มีความยาวด้านกว้างยาวกว่าด้านยาว (1:1) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหัวเขียนที่มี

อัตราส่วนเป็น 1:1 จะเป็นขนาดที่ดีที่สุดในการรื้อไหลของฟลักซ์แม่เหล็กสำหรับทั้งสองกระบวนการ

การจำลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าหัวเขียนที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวของหัวเขียนด้านกว้างต่อความยาวของหัวเขียนด้านยาวเป็น 1:1 มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่น้อยลง ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปร่างของโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้น คือการกำหนดทิศทางของ easy axis ให้กับหัวเขียน โดยทำการศึกษาทิศทางของ easy axis อยู่ 2 ทิศทาง ได้แก่ easy axis ในแกน y และในแกน z นอกจากนี้ยังกำหนดให้มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (K_u) เท่ากับ $95.50 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ เพื่อดูผลกระทบจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับ easy axis ของโครงสร้างผลึก

เมื่อจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ในสถานะสมดุลสุดท้ายพบว่า กำหนด easy axis อยู่ในแนวแกน y บริเวณ โขกจะเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวนอน ซึ่งช่วยลดการรื้อไหลของฟลักซ์แม่เหล็กลงสู่ปลายโพลมากกว่า ถ้า easy axis อยู่ในแนวแกน z จะเกิดโดเมนแม่เหล็กในแนวตั้งที่ทำให้มีแนวโน้มการรื้อไหลของฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งลงสู่ปลายโพลที่มากขึ้น โดยดูจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชัน เมื่อ easy axis อยู่ในแนวแกน y จะมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันน้อยกว่า easy axis อยู่ในแนวแกน z

แต่ถ้าคำนวณหาค่า M_z/M_x พบว่าในกรณีของกระบวนการ MFI เมื่อกำหนด easy axis อยู่ในแนวแกน y จะมีค่า M_z/M_x สูงกว่าการกำหนด easy axis อยู่ในแนวแกน z แต่ในกรณีกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ถ้ากำหนด easy axis อยู่ในแนวแกน y จะมีค่า M_z/M_x ต่ำกว่าการกำหนด easy axis อยู่ในแนวแกน z แม้ว่าการกำหนด easy axis ให้อยู่ในแนวแกน y สำหรับกระบวนการ MFI จะมีค่า M_z/M_x ที่สูง แต่ปลายโพลเราสามารถออกแบบให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ต่ำได้จากการจำลองก่อนหน้านี้ ดังนั้นการกำหนด easy axis ให้อยู่ในแนวแกน y จึงถือว่าเป็นแกนที่เหมาะสมที่สุดในกรณีการรื้อไหลของฟลักซ์แม่เหล็กหรือพลังงานภายในหัวเขียนสำหรับทั้งสองกระบวนการ

เนื่องจากในกระบวนการผลิตหัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กจะมีกระบวนการขัดเปิดผิวหน้าหัวเขียน เพื่อกำหนดขนาดของสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากปลายโพล และจากกระบวนการนี้ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของหัวเขียนบริเวณปลายโพล ที่มีต่อการคงค้างของสนามแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นต่อไปนี้จะใช้ภาพแบบจำลองหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง โดยที่องค์ประกอบของหัวเขียนมีขนาดดังนี้ 1) ความยาวของหัวเขียนด้านกว้าง (head width) เท่ากับ 1280 nm 2) ความยาวของหัวเขียนด้านยาว (head length) เท่ากับ 1330 nm 3) ความยาวที่ปลายโพลของหัวเขียน (throat height) เท่ากับ 150 nm 4) ความกว้างของปลายโพล (track width) เท่ากับ 30 nm 5) ขนาดของมุมแฟลร์ 1 (flare angle 1) เท่ากับ 60° และ 6) ขนาดของมุมแฟลร์ 2 (flare angle 2) เท่ากับ 45° 7) มุม chisel (chisel angle) 20°

กระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียนสามารถทำได้โดยทำการจัดหัวเขียนด้วยความลึกที่มากขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดความยาวปลายโพลน้อย ๆ สั้นลง และทำให้ความกว้างของปลายโพล (track width) กว้างขึ้นด้วย ดังนั้นในการจำลองนี้ เราจึงศึกษาผลกระทบเนื่องจากกระบวนการจัดเปิดผิวหน้าหัวเขียนต่อการคงค้ำของสนามแม่เหล็ก โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวปลายโพลตั้งแต่ 150 nm ถึง 80 nm และความกว้างของปลายโพลตั้งแต่ 30 nm ถึง 100 nm ด้วยการลดความยาวและเพิ่มความกว้างปลายโพลไปพร้อมกันทีละ 10 nm เมื่อจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก พบว่าถ้าปลายโพลมีความยาวลดลงแมกนีไทเซชันมันจะพยายามจัดเรียงตัวตามแนวอนของปลายโพลจึงเกิดเป็นโดเมนปิดตามแนวอนหรือแนวแกน y ส่งผลทำให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลที่ลดลง (เป็นผลเนื่องจากแอนไอโซโทรปีที่ขึ้นกับรูปทรงเหมือนกับการจำลองหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่าย)

จากนั้นคำนวณหา M/M_0 พบว่า ถ้าปลายโพลของหัวเขียนมีขนาดลดลงส่งผลทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่ปลายโพลลดลงตามไปด้วย แต่ในกรณีของกระบวนการ MFI ถ้าความยาวปลายโพลลดลงถึง 130 nm และลดลงจนมีขนาด 80 nm ค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่บริเวณปลายโพลก็ยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีค่าน้อยอยู่ และในกรณีกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก เมื่อความยาวปลายโพลลดลงจนมีขนาด 90 nm ค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำที่บริเวณปลายโพลจะสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานดีแมกนีไทเซชันของหัวเขียนลดลงนั่นเอง ดังนั้นหัวเขียนที่มีปลายโพลยาว 100 nm จึงดีที่สุดสำหรับทั้งสองกระบวนการ แม้ว่าปลายโพลยาว 80 nm จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้ำใกล้เคียงกับปลายโพล 100 nm ก็ตาม แต่ขนาดความกว้างของปลายโพลมีขนาดกว้างเกินไปที่ส่งผลทำให้มีขนาดของสนามแม่เหล็กกว้าง ซึ่งไม่ต้องการสำหรับกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

การจำลองหัวเขียนที่มีรูปทรงแบบง่ายที่ผ่านมา พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์มีผลต่อการคงค้ำของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องศึกษาผลของมุมแฟลร์สำหรับหัวเขียนที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับหัวเขียนจริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 (1,2) ไปพร้อมกันดังนี้ $(60^\circ, 45^\circ)$ $(50^\circ, 35^\circ)$ $(40^\circ, 25^\circ)$ $(30^\circ, 15^\circ)$ และ $(20^\circ, 5^\circ)$ ผลการจำลองที่ได้จากการจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็กจะแตกต่างกันดังนี้

สำหรับกรณีของกระบวนการ MFI ในสถานะสมดุลสุดท้ายพบว่าถ้ามุมแฟลร์ทั้งสองมุมยังคงจะช่วยให้หัวเขียนบริเวณมุมแฟลร์มีความชันที่ลดลงแทบจะอยู่ในแนวราบ ดังนั้นแมกนีไทเซชันจึงพยายามจัดเรียงตัวไปตามขอบ (ตามแนวของมุมแฟลร์) แทบจะเกิดโดเมนในแนวอน การเกิดโดเมนในลักษณะนี้จะช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลในแนวตั้ง โดยพิจารณาจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชัน กล่าวคือถ้าหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 ลดลงพร้อม

กันทั้งสองมุมจะส่งผลให้หัวเขียนมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ค่า M_r/M_s บริเวณปลายโพลลดลงเมื่อหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ลดลงพร้อมกันทั้งสองมุม

แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับกรณีของกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก ในสภาวะสมดุลสุดท้าย พบว่าแมกนีไทเซชันบริเวณโขคของหัวเขียนมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้นเมื่อหัวเขียนมีขนาดมุมแฟลร์แคบลง คือเกิดโดเมนปิดที่ไม่สมบูรณ์เป็นเหตุทำให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งลงสู่ปลายโพลมากขึ้นเมื่อมุมแฟลร์แคบลง โดยพิจารณาจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชัน พบว่าถ้าหัวเขียนมีขนาดของมุมแฟลร์ลดลงพร้อมกันจะมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้แม้ว่าการจำลองทั้งสองกระบวนการจะมีแนวโน้มแตกต่างกันและมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างที่ไม่เท่ากัน แต่ว่าขนาดของมุมแฟลร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ $(30^\circ, 15^\circ)$ เนื่องจากเป็นมุมที่มีขนาดพอเหมาะทำให้เกิดการรั่วไหลของพลังงานดีแมกนีไทเซชันที่น้อยและใกล้เคียงกันทั้งสองกระบวนการ นอกจากนี้ยังดีในแง่ของสนามที่ใช้เขียนที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากการจำลองที่ผ่านมาทำให้สามารถคัดกรองรูปทรงหัวเขียนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้มีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างและค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันอยู่ในเกณฑ์ที่ถือว่าน้อย โดยมีความยาวปลายโพลเท่ากับ 100 nm และมีขนาดของมุมแฟลร์ 1 และมุมแฟลร์ 2 เป็น $(30^\circ, 15^\circ)$ ส่วนองค์ประกอบอื่นของแบบจำลองเหมือนเดิม ทั้งนี้วัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองที่ผ่านมาเป็นเพียงแค่วัสดุแม่เหล็กตัวอย่างที่ใช้ทำการจำลองไมโครแมกเนติกของหัวเขียน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการจำลองได้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนแม่เหล็ก

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุแม่เหล็กที่ใช้สร้างหัวเขียนเป็น NiFe และ CoFeNi สำหรับการจำลองกระบวนการ MFI และกระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็ก พบว่าถ้าเป็นโลหะผสม $Ni_{80}Fe_{20}$ และ $Co_{80}Fe_{10}Ni_{10}$ ที่บริเวณโขคเกิดโดเมนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนปิดแบบสมบูรณ์ เป็นผลจากหัวเขียนบริเวณโขคมีขนาดพอเหมาะหรือเป็นจำนวนเท่าของความยาวเอ็กเซนจ์ที่พอเหมาะ ส่งผลทำให้หัวเขียนมีแนวโน้มที่ช่วยลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลได้มากกว่า แต่ถ้าหัวเขียนเป็นโลหะผสม $Ni_{10}Fe_{90}$, $Ni_{45}Fe_{55}$ และ $Co_{35}Fe_{60}Ni_{15}$, $Co_{60}Fe_{39}Ni_1$ พบว่าแมกนีไทเซชันบริเวณโขคพยายามหมุนไปในแกนเดียวกับ easy axis ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากมีค่า K_u สูงกว่าค่า K_u ของ $Ni_{80}Fe_{20}$ จึงทำให้โดเมนแม่เหล็กบริเวณโขคของหัวเขียนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เกิดเป็นโดเมนแม่เหล็กแบบปิดหลายโดเมนและมีบางบริเวณที่ไม่เป็นโดเมนปิด เป็นผลทำให้มีแนวโน้มในการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลออกมาได้มากกว่า โดยเราสามารถพิจารณาการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจากค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน ซึ่งพบว่าโดยรวมแล้วถ้าหัวเขียนเป็นโลหะผสม NiFe จะมีค่า

พลังงานดีแมกนีไทเซชันที่ต่ำกว่าหัวเขียนเป็นโลหะผสม CoFeNi แต่ถ้าวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูงขึ้น จะทำให้ค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันจะสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในกรณีที่หัวเขียนเป็นโลหะผสม $Ni_{10}Fe_{90}$ จะมีค่าพลังงานดีแมกนีไทเซชันเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งสองการจำลอง เนื่องจากบริเวณ โยคของหัวเขียนเกิดโดเมนปิดที่ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลได้มากกว่า $Ni_{45}Fe_{55}$

จากนั้นคำนวณหาค่า M_z/M_s พบว่าถ้าหัวเขียนเป็นโลหะผสม NiFe ค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง บริเวณปลายโพลจะเพิ่มขึ้นในทางบวกเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูงขึ้น โดยที่ค่า K_u ของโลหะผสม $Ni_{80}Fe_{20} > Ni_{10}Fe_{90} > Ni_{45}Fe_{55}$ และถ้าหัวเขียนเป็นโลหะผสม CoFeNi ค่าสนามแม่เหล็กคงค้าง บริเวณปลายโพลจะเพิ่มขึ้นในทางลบเมื่อวัสดุแม่เหล็กมีค่า K_u สูงขึ้น โดยที่ค่า K_u ของโลหะผสม $Co_{80}Fe_{10}Ni_{10} > Co_{35}Fe_{60}Ni_{15} > Co_{60}Fe_{30}Ni_{10}$ แต่โดยรวมแล้วหัวเขียนที่เป็นโลหะผสม NiFe จะมีค่า สนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลต่ำกว่าหัวเขียนที่เป็นโลหะผสม CoFeNi และหัวเขียนที่เป็น โลหะผสม $Ni_{80}Fe_{20}$ จะมีค่าสนามแม่เหล็กคงค้างบริเวณปลายโพลและค่าสนามดีแมกนีไทเซชันต่ำสุด

การจำลองไมโครแมกเนติกด้วยโปรแกรม OOMMF นี้ สามารถศึกษาปรากฏการณ์การ คงค้างของสนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนได้ จากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของ แมกนีไทเซชันภายในหัวเขียน และในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการจำลองหัวเขียนที่มีขนาดและรูปทรง ใกล้เคียงกับของจริง ดังนั้นเราจึงสามารถทำนายผลที่เกิดขึ้นได้ก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์นั้นจริง ซึ่งในอนาคตเราสามารถที่จะพัฒนาแบบจำลองของหัวเขียน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคงค้างของ สนามแม่เหล็กบริเวณปลายโพลของหัวเขียนที่เกิดจากปัญหาอื่น ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามการ ออกแบบหัวเขียนยังคงต้องการสนามแม่เหล็กที่ออกจากโพลที่สูงและมีการคงค้างของ สนามแม่เหล็กที่โพลน้อย

รายการอ้างอิง

- [1] Toshiba. (2004, July 12). *Perpendicular Recording Technology Achieves 1.8 inch Drive That Holds the Industry Largest 80-gigabytes Of Information*. Available: https://www.toshiba.co.jp/about/press/2004_12/pr1401.htm
- [2] K. Yamakawa, Y. Ohsawa, S. Greaves, and H. Muraoka, "Pole design optimization of shielded planar writer for 2 Tbit/in² recording," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 7, p. 07B728, 2009.
- [3] D. Z. Bai and J.-G. Zhu, "Stitched pole-tip design with enhanced head field for perpendicular recording," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 10, pp. 6540-6542, 2003.
- [4] D. Ramli and M. Khairurrijal, "Effect of Ferromagnetic Layer Thickness on the Giant Magnetoresistance Properties of NiCoFe/Cu/NiCoFe Sandwich," in *3rd Asian Physics Symposium Bandung, Indonesia, 2009*, pp. 65-67.
- [5] D. Z. Bai, Z. Jian-Gang, L. Peng, K. Stoev, and F. Liu, "Writer pole tip remanence in perpendicular recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 3, pp. 473-480, 2006.
- [6] K. Hirata, T. Roppongi, M. Ohtsuki, A. Yamaguchi, and K. Noguchi, "Material properties and domain structure influence on pole erasure occurrence in perpendicular recording heads," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 10, pp. 2902-2904, 2005.
- [7] M. S. Patwari and R. H. Victora, "Simulation of Erase After Write on 2.4 T FeCo Solid Pole Writer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 5, pp. 1212-1219, 2010.
- [8] K. Hirata, T. Roppongi, and K. Noguchi, "A study of pole material properties for pole erasure suppression in perpendicular recording heads," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 287, pp. 352-356, 2005.
- [9] W. Yu *et al.*, "Time resolved scanning Kerr microscopy of hard disk writer structures with a multilayered yoke," *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 16, p. 162407, 2013.
- [10] *Oomf User's Guide, Version 1.0... Nistir 6376... U.S. Department Of Agriculture*. Commerce Department -- National Institute of Standards and Technology (NIST), 1998.
- [11] M. M. and NunokaWa, "Magnetic head for perpendicular recording and fabrication process," 2009.

- [12] K. G. Ashar, *Magnetic disk drive technology: heads media channel interfaces and integration*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley, 2011.
- [14] A. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [15] M. S. Patwari, "Micromagnetic Tests of Techniques for Reducing Pole Tip Remanence of High Density Perpendicular Write Heads," Doctor of Philosophy, University of Minnesota, 149, 2010.
- [16] G. S. Abo, Y.-K. Hong, J. Park, J. Lee, W. Lee, and B.-C. Choi, "Definition of Magnetic Exchange Length," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 8, pp. 4937-4939, 2013.
- [17] J. S. Ma., "Investigation of magnetic domain configuration and vortex-antivortex creation and annihilation on CoFeB patterns," Master of Science, University of Maryland, 106, 2011.
- [18] R. D. Gomez, "Visualizing and modifying objects at the nanometer length scales," 2008.
- [19] R. D. Gomez, T. V. Luu, A. O. Pak, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, "Domain configurations of nanostructured Permalloy elements," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 6163-6165, 1999.
- [20] N. Robertson, H. L. Hu, and T. Ching, "High performance write head using NiFe 45/55," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 2818-2820, 1997.
- [21] M. K. Othman, A. Dolah, N. A. Omar, and M. R. Yahya, "Design Of Experiment (DOE) For Thickness Reduction Of GaAs Wafer Using Lapping Process," in *2006 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*, 2006, pp. 583-585.
- [22] Z. Li, D. Z. Bai, E. Lin, and S. Mao, "Write field asymmetry in perpendicular magnetic recording," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 7, p. 07B713, 2012.
- [23] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 Terabit per square inch," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 1, pp. 36-42, 2000.
- [24] R. H. Victora and M. Khan, "Micromagnetic model of perpendicular head and double-layer media for 100 Gb/in²," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 1, pp. 181-185, 2002.

- [25] (July 13). *Micromagnetics*. Available:
<http://www.worldlibrary.org/articles/micromagnetics>.
- [26] H. Zhang, "A Numerical Study of Dynamic Micromagnetics," Master of Science, Department of Chemistry, New Orleans Theses and Dissertations, China, 2006.
- [27] M. d'Aquino, "Nonlinear Magnetization Dynamics in Thin-films and Nanoparticles," Dr., University of Napoli, 165, 2004.
- [28] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, "On The Theory Of The Dispersion Of Magnetic Permeability In Ferromagnetic Bodies," *J. Phys.*, vol. 53, no. Special Issue, pp. 14-22, 2008.
- [29] D. Wei, *Micromagnetics and Recording Materials*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [30] D. D. Aurélio, "Spintronic micromagnetic simulations using parallel computations," Dr., Física Aplicada, Salamanca, 143, 2013.
- [31] V. von, T. Gerhardt, and A. Friedberg., "Micromagnetic Simulations of Ferromagnetic Domain Walls in Nanowires," Ph.D., Department of Physics, University of Hamburg., Hamburg, 112, 2014.
- [32] Z. Jinqi, H. Liubo, S. Yong, Y. Hongping, C. Y. Tsung, and Z. Honglin, "Perpendicular magnetic recording head," 2012.
- [33] A. Chiu *et al.*, "Thin-film inductive heads," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 40, 1996.
- [34] M. S. Patwari, S. Batra, and R. H. Victora, "Effect of pole tip anisotropy on the recording performance of a high density perpendicular head," *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 10, pp. 6543-6545, 2003.
- [35] T. Schrefl, M. E. Schabes, D. Suess, and M. Stehno, "Dynamic Micromagnetic Write Head Fields During Magnetic Recording in Granular Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 4, pp. 2341-2343, 2004.
- [36] J. J. Kim, K. Hirata, Y. Ishida, D. Shindo, M. Takahashi, and A. Tonomura, "Magnetic domain observation in writer pole tip for perpendicular recording head by electron holography," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 16, p. 162501, 2008.
- [37] N. C. Anderson and R. B. Chesnutt, "Electrodepositing CoNiFe alloys for thin film heads," 1987.

- [38] N. Robertson. (2012, July 15.). *Electrodeposition of Magnetic Materials*. Available: http://pwrsocevents.com/wp-content/uploads/2012presentations/session-7/7.1_Neil%20Robertson.pdf
- [39] V. A. Vas'ko *et al.*, "High saturation magnetization films of FeCoCr," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, p. 6818, 2002.





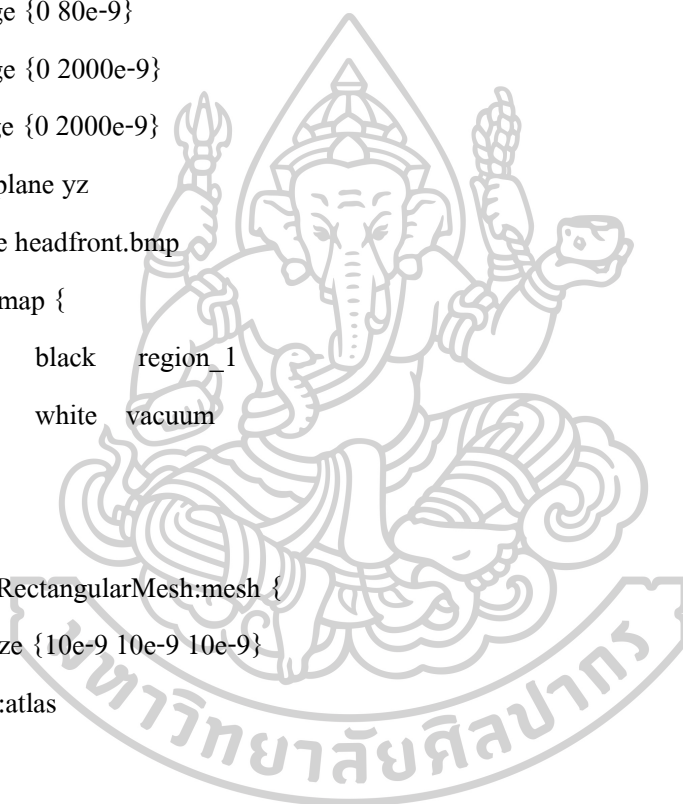
คำสั่งที่ใช้ในการจำลองหัวเขียนด้วยสมการลันดา – ลิฟวิทซ์ กิลเบิร์ต

1. การจำลองสารแม่เหล็กที่มี easy axis เป็นแบบ Cubic

```

set pi [expr 4*atan(1.0)]
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
RandomSeed 1
Specify Oxs_ImageAtlas:atlas {
    xrange {0 80e-9}
    yrange {0 2000e-9}
    zrange {0 2000e-9}
    viewplane yz
    image headfront.bmp
    colormap {
        black    region_1
        white    vacuum
    }
}
Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
    cellsize {10e-9 10e-9 10e-9}
    atlas :atlas
}
Specify Oxs_CubicAnisotropy {
    K1 { Oxs_AtlasScalarField {
        atlas :atlas
        default_value 0
        values {
            region_1 278.6
            vacuum    0
        }
    }
}
}

```




```

m0 { Oxs_AtlasVectorField {
    atlas :atlas
    values {
        region_1 {0 0 1}
        vacuum {0 0 0}
    }
    norm 1.0
}}
vector_field_output_format {text %5g}
}

```

2. จำลองการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับหัวเข็มนาฬิกา เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดตัวนำ และสารแม่เหล็กที่มี easy axis เป็น Uniaxial

```

set pi [expr 4*atan(1.0)]
set mu0 [expr 4*$pi*1e-7]
Specify Oxs_ImageAtlas:atlas {
    xrange {0 80e-9}
    yrange {0 2000e-9}
    zrange {0 2000e-9}
    viewplane yz
    image headfront.bmp
    colormap {
        black region_1
        white vacuum
    }
}
Specify Oxs_RectangularMesh:mesh {
    cellsize {10e-9 10e-9 10e-9}
    atlas :atlas
}

```



```

}
Specify Oxs_UniformExchange {
    A 1e-11
}
Specify Oxs_UniaxialAnisotropy {
    K1 { Oxs_AtlasScalarField {
        atlas :atlas
        default_value 0
        values {
            region_1 95.5e3
            vacuum 0
        }
    }}
    axis { Oxs_AtlasVectorField {
        atlas :atlas
        values {
            region_1 {0 1 0}
            vacuum {0 0 0}
        }
        norm 1.0
    }}
}
Specify Oxs_UZeeman [subst {
    multiplier [expr 0.001/$mu0]
    Hrange {
        { 0 0 0 0 0 20 1 }
        { 0 0 20 0 0 0 1 }
        { 0 0 0 0 0 -20 1 }
        { 0 0 -20 0 0 0 1 }
    }
}

```

```

}]
Specify Oxs_Demag {}
Specify Oxs_RungeKuttaEvolve:evolve {
    alpha 1
}
Specify Oxs_TimeDriver {
    basename imageatlas
    evolver :evolve
    stopping_dm_dt 1
    mesh :mesh
Ms { Oxs_AtlasScalarField {
    atlas :atlas
    default_value 0
    values {
        region_1 1910e3
        vacuum 0
    }
}}
m0 { Oxs_AtlasVectorField {
    atlas :atlas
    values {
        region_1 {0 0 1}
        vacuum {0 0 0}
    }
    norm 1.0
}}
vector_field_output_format {text %5g}
}

```

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | ชื่อแก้ว เจริญชาติ |
| วัน เดือน ปี เกิด | 19 สิงหาคม 2532 |
| สถานที่เกิด | กาฬสินธุ์ |
| วุฒิการศึกษา | ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 40 หมู่ 8 บ้านชาด ตำบลนาโก อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46110 |
| ผลงานตีพิมพ์ | ผลกระทบของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อสนามแม่เหล็กคงค้าง ที่ปลายโพลของหัวเขียนด้วยการจำลองแบบไมโครแมกเนติกส์ |

