

การจำลองจitterการเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูล แม่เหล็กที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in²

Transition Jitter Simulations of Heat Assisted Magnetic Recording at Areal Density of 4.1 Tb/in²

ชวกร จงใจหาญ (Chavakon Jongjaihan)* ดร.อาคม แก้วระวัง (Dr.Arkorn Kaewrawang)^{1**}

(Received: September 7, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: January 4, 2023)

บทคัดย่อ

จitterการเปลี่ยนผ่านเป็นสัญญาณรบกวนรูปแบบหนึ่ง และใช้จitterการเปลี่ยนผ่าน เพื่อบ่งชี้สมรรถนะของกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ในบทความนี้ได้จำลองจitterการเปลี่ยนผ่านในรูปแบบ 2 มิติ ของเทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (heat assisted magnetic recording, HAMR) เทคโนโลยี HAMR เป็นหนึ่งในตัวเลือกสำหรับการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ การจำลองไมโครแมกเนติกใช้สมการ แลงเดา - ลิฟชิตซ์ - กิลเบิร์ต เป็นพื้นฐาน และใช้ MATLAB สำหรับการคำนวณและการจำลองจitterการเปลี่ยนผ่าน แผ่นบันทึกข้อมูลใช้รูปแบบลวดลายไวโรนอย และขนาดเกรนเฉลี่ยเป็น 5.1 นาโนเมตร พิจารณาความยาวบิตและความกว้างแทร็คที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in² พบว่าจitterการเปลี่ยนผ่านน้อยที่สุดคือ 1.679 นาโนเมตร ที่ความยาวบิต 8 นาโนเมตร และความกว้างแทร็ค 19.5 นาโนเมตร

ABSTRACT

The transition jitter is one form of noise and the transition jitter is used to indicate the performance of the magnetic recording process. In this paper, the transition jitter is simulated in two-dimension (2-D) format of the heat assisted magnetic recording (HAMR) technology. HAMR technology is among the candidates for increasing areal density. The micromagnetic simulations based on the Landau-Lifshitz-Gillbert (LLG) equation and MATLAB was used for calculation and the transition jitter simulation. Voronoi pattern model was used as the medium and an average grain size of 5.1 nm. Bit length and track width were considered at the areal density of 4.1 Tb/in². It was found that the minimum transition jitter is 1.679 nm at bit length of 8 nm and track width of 19.5 nm.

คำสำคัญ: จitterการเปลี่ยนผ่าน เทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก รอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก

Keywords: Transition jitter, Heat assisted magnetic recording, Magnetic footprints

¹Corresponding author: arkom@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Student, Master of Engineering Program in Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

บทนำ

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่มากขึ้นทุก ๆ ปี [1] ปัญหาของการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ก็คือการเกิดสถานะแม่เหล็กพาราแมกเนติกยิ่งยวด (superparamagnetic) หรือเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กต่ำ เนื่องจากการลดปริมาตรของเกรน ปัญหานี้แก้ไขได้โดยใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก (magneto crystalline anisotropy, K_u) ที่สูง จากการเพิ่มค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กที่สูง ส่งผลต่อการใช้งานแม่เหล็กของหัวเขียนที่สูงตามไปด้วย [2] ดังนั้นจึงมีเทคโนโลยีที่ช่วยในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก เช่น เทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (heat assisted magnetic recording, HAMR) [3] เทคโนโลยี HAMR เป็นการยิงเลเซอร์ลงไปที่แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ความร้อนที่เกิดขึ้นจากเลเซอร์ส่งผลให้ K_u ของวัสดุแม่เหล็กลดลงจนถึงจุดที่สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนสามารถเขียนได้ แต่ปัญหาที่เกิดจากกระบวนการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้เทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกก็คือสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนประกอบไปด้วยสาเหตุหลัก ๆ สองอย่างคือ สัญญาณรบกวนจิตเตอร์หรือจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน และสัญญาณรบกวนกระแสตรง [4-5]

จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านเป็นสัญญาณรบกวนรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสอดคล้องอย่างมากกับสัญญาณรบกวนกระแสตรง จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านอาจทำให้ความคมของสัญญาณน้อยลงและความกว้างของสัญญาณเพิ่มขึ้น ในส่วนของสัญญาณรบกวนกระแสตรงอาจทำให้ขนาดของสัญญาณรูบัสที่เหลือน้อยลง [4-5] ดังนั้นความผิดพลาดของสัญญาณอ่านกลับสอดคล้องกับจิตเตอร์ เพราะฉะนั้นสมรรถนะของเทคโนโลยีความร้อนช่วยการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กสามารถบ่งชี้ได้โดยจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน การหาจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านสามารถหาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ตำแหน่งผ่านศูนย์ของสัญญาณ ปัจจัยของการเกิดจิตเตอร์เปลี่ยนการผ่านคือ ขนาดเกรน (grain size) การกระจายตัวของขนาดเกรน (grain size distribution) รูปร่างเกรน (grain shape) ความกว้างการอ่าน (reading width) รูปร่างจุดความร้อน (heat spot geometry) และเกรเดียนต์อุณหภูมิ (thermal gradient) เป็นต้น [6-11]

ในบทความนี้เสนออีกรูปแบบหนึ่งของการหาจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน คือการหาจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านในรูปแบบ 2 มิติ สำหรับการหาจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านของการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้เทคโนโลยีความร้อนเข้ามาช่วยที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่คงที่ การจำลองทางแม่เหล็กใช้โปรแกรมไมโครแมกเนติกเป็นพื้นฐาน แผ่นสื่อบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในการจำลองในครั้งนี้ใช้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก $L1_0 - \text{FePt}$ เป็นพื้นฐาน เนื่องจากมีค่า K_u ที่สูงและอุณหภูมิคูรีที่ต่ำ [3, 12] ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB [13] ในการคำนวณและแสดงผลของการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านในรูปแบบ 2 มิติ ผลจากการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านในรูปแบบ 2 มิติ สามารถบ่งชี้ถึงผลของจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านเทียบกับผลการจำลองรอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก และแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านกับความยาวบิตที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่คงที่

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in²
2. วิเคราะห์ผลของความยาวบิตที่มีต่อจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านในเทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in²

วิธีการวิจัย

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครแมกเนติกในการจำลองการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กโดยมีสมการแลนเดา - ลิฟชิตซ์ - กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert, LLG, Equation) เป็นพื้นฐาน แสดงดังสมการที่ (1) [14-16]

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma\alpha}{M_s}\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) \quad (1)$$

เมื่อ γ เป็นอัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) มีค่า 2.21×10^5 m/A*s,

α เป็นค่าคงที่ความหน่วงกิลเบิร์ต

$\vec{M}$ เป็นเวกเตอร์แมกเนไทเซชัน (A/m)

M_s เป็นแมกเนไทเซชันอิ่มตัว (A/m)

$\vec{H}_{eff}$ เป็นเวกเตอร์สนามประสิทธิผลที่มาจากผลรวมของเวกเตอร์สนามแลกเปลี่ยน (exchange field, $\vec{H}_{ex}$) เวกเตอร์สนามลบ
ล้าง (demagnetizing field, $\vec{H}_{de}$) เวกเตอร์สนามแอนไอโซทรอปี (anisotropy field, $\vec{H}_{an}$) และเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก
ภายนอก (external applied field, $\vec{H}_{ext}$)

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม the object-oriented micromagnetic framework (OOMMF) [17] ในการจำลองไมโครแมก-
เนติก ในส่วนของการจำลองเทคโนโลยี HAMR ใช้หลักการของผลกระทบจากอุณหภูมิบนวัสดุแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กเพอร์โร
คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กลดลง เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนกลายเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราที่อุณหภูมิคูรี
(Curie temperature, T_c) การระบุจุดความร้อนในกระบวนการจำลองการเขียนของเทคโนโลยี HAMR ใช้สมการ Brillouin
function แสดงดังสมการที่ (2) – (5) [14]

$$M_s(T) = M_s(0) \left[\frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}\beta\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{\beta}{2J}\right) \right] \quad (2)$$

$$\beta = 3\left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (3)$$

$$\frac{K_u(T)}{K_u(0)} = \left(\frac{M_s(T)}{M_s(0)}\right)^n \quad (4)$$

และ

$$H_k(T) = \frac{2K_u(T)}{M_s(T)} \quad (5)$$

เมื่อ J เป็นโมเมนต์ประสิทธิผล กำหนดค่าเป็น 0.85 สำหรับ $L1_0 - \text{FePt}$

T เป็นอุณหภูมิ (K)

n เป็นค่ากำลังของฟังก์ชันแอนไอโซทรอปีมีค่า 2.15

K_u เป็นค่าคงที่แอนไอโซทรอปี (magnetocrystalline anisotropy) (J/m³)

H_k เป็นค่าสนามแอนไอโซทรอปี (anisotropy field) (A/m)

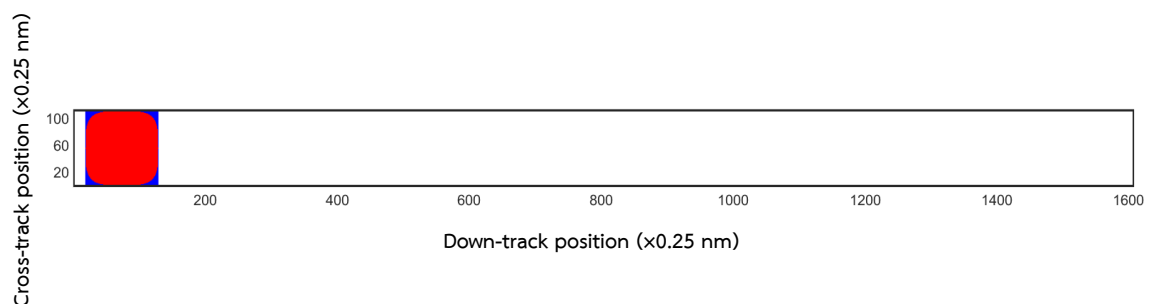
แบบจำลองของการจำลองถูกเริ่มด้วยการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีความละเอียดในแนวแกน x
และแกน y เป็น 25 พิกเซลต่อนาโนเมตร แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กสำหรับการจำลองถูกออกแบบขนาดดังนี้ กว้าง 110
นาโนเมตร และยาว 1606 นาโนเมตร รูปแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กสำหรับการจำลองทางแม่เหล็กเป็นแผ่นบันทึก
ข้อมูลแม่เหล็กแบบกรานูลาร์หรือแผ่นภาพไวโรนอย ซึ่งประกอบด้วยเกรนจำนวนมากที่มีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน

ผลของการสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กสำหรับการจำลองที่เป็นแบบแผนภาพไวโรนอยมีขนาดเกรนเฉลี่ยเป็น 5.1 นาโนเมตร [18] และส่วนเบี่ยงมาตรฐานของขนาดเกรนอยู่ที่ 8 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบสำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กเป็นแบบการบันทึกแบบบิตเดี่ยวสลับ (101010....) จำนวน 31 บิต ขนาดของสนามหัวเขียนเป็น 10 kOe [18] รูปร่างของจุดความร้อนสำหรับการใช้ในการจำลองเทคโนโลยี HAMR เป็นรูปร่างแบบ squircle ดังสมการที่ (6) [14]

$$x^4 + y^4 = r^4 \quad (6)$$

เมื่อ r เป็นขนาดครึ่งหนึ่งของความกว้างแทร็ค

รูปร่างของจุดความร้อนที่ได้จากสมการที่ (6) แสดงดังภาพที่ 1 เมื่อสนามเขียนที่เขียนทับบนจุดความร้อนกำหนดให้มีขนาดเท่ากับขนาดของจุดความร้อนคือ 25 นาโนเมตร



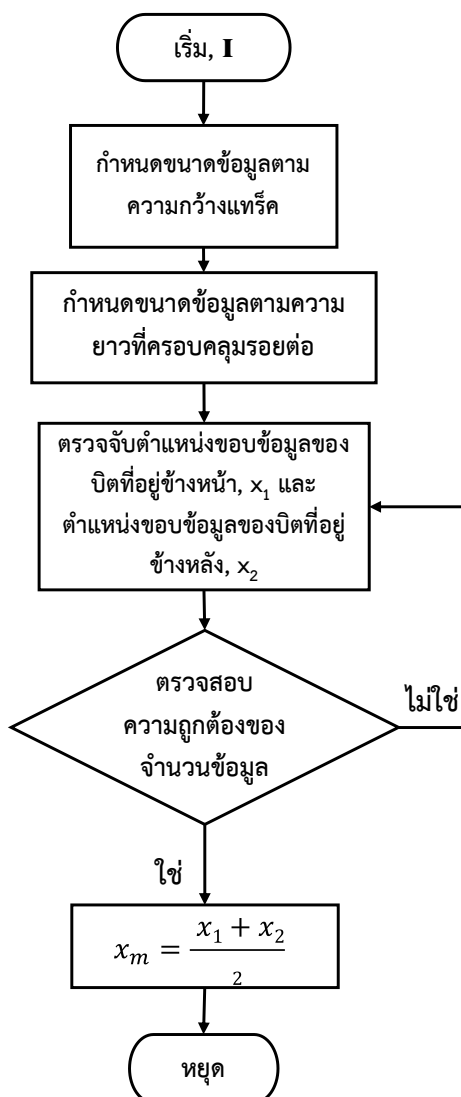
ภาพที่ 1 จุดความร้อน (พื้นที่สีแดง) และ สนามเขียน (พื้นที่สีน้ำเงิน)

คุณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก $L1_0 - \text{FePt}$ ที่อุณหภูมิห้องมีดังนี้ $M_s = 1.100 \times 10^6 \text{ A/m}$, $K_u = 7 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ และ $T_c = 710 \text{ K}$ [18] ค่าคงที่แลกเปลี่ยนที่ใช้ในการจำลองทางแม่เหล็กถูกกำหนดดังนี้ ค่าคงที่แลกเปลี่ยนภายในเกรน (intra-grain exchange stiffness constant, A_{intra}) เป็น $12 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ และไม่มีค่าคงที่แลกเปลี่ยนระหว่างเกรน (inter-grain exchange coupling, A_{inter}) [14] ค่าพารามิเตอร์สำหรับการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ 4.1 Tb/in²

ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Tb/in ²)	4.1 [18]						
ความยาวบิต (nm)	7 [18]	7.5	8 [18]	8.5	9	9.5	10
ความกว้างแทร็ค (nm)	22.5 [18]	21	19.5 [18]	18	16.5	15	13.5
ความกว้างอุณหภูมิ (nm)	25 [18]						

ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการหาขอบเขตการเปลี่ยนผ่านสำหรับการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน สำหรับข้อมูลที่ได้จากการจำลองทางแม่เหล็ก ผู้วิจัยได้จัดเรียงข้อมูลและขนาดความกว้างแทร็คของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 จากกระบวนการหาขอบเขตการเปลี่ยนผ่านได้ตำแหน่งเฉลี่ย x_m ที่อยู่ระหว่างบิตข้อมูลการเปลี่ยนผ่าน หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน



ภาพที่ 2 กระบวนการหาขอบเขตการเปลี่ยนผ่าน

จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านสามารถหาได้จาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของแต่ละจุดผ่านศูนย์ ดังสมการ (7) [6 - 11]

$$\sigma_{jitter} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{m_i} - \bar{x}_m)^2} \quad (7)$$

เมื่อ x_{m_i} เป็นตำแหน่งผ่านศูนย์ (zero-crossing position)

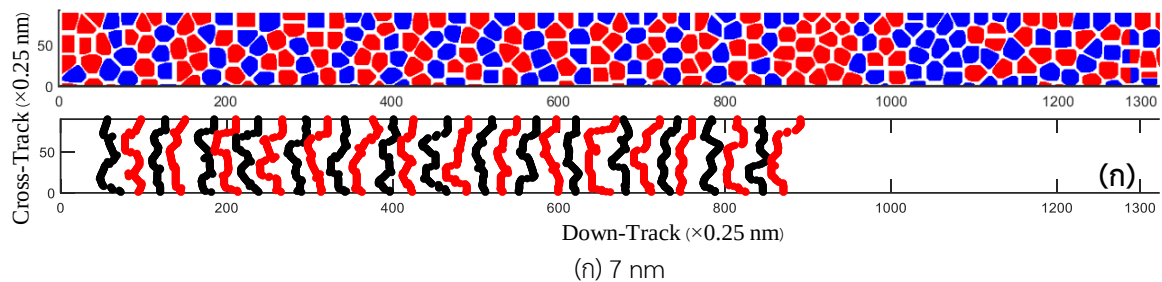
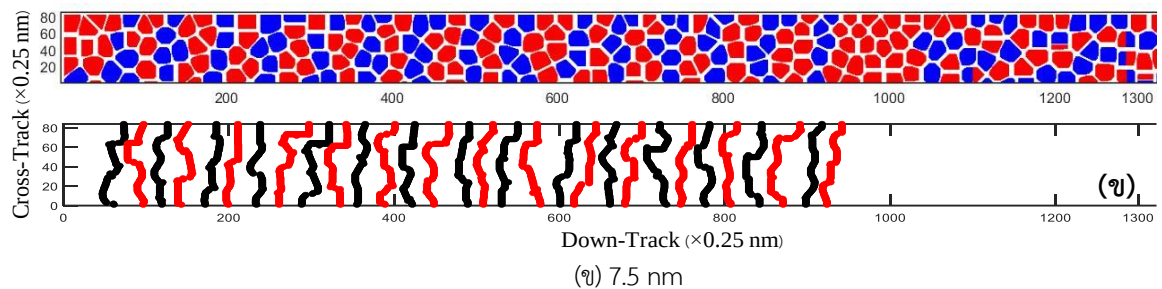
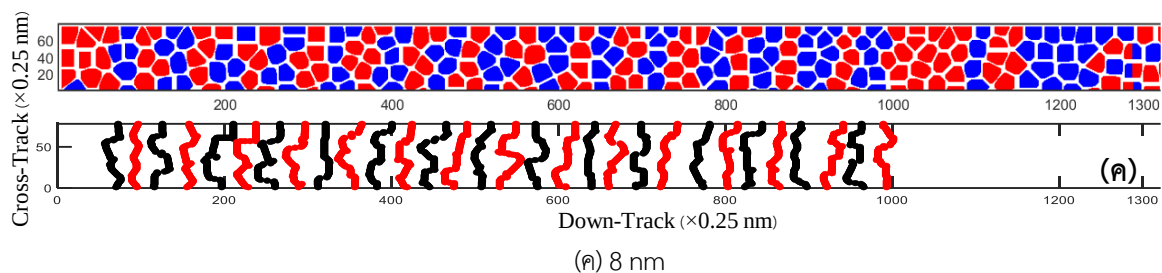
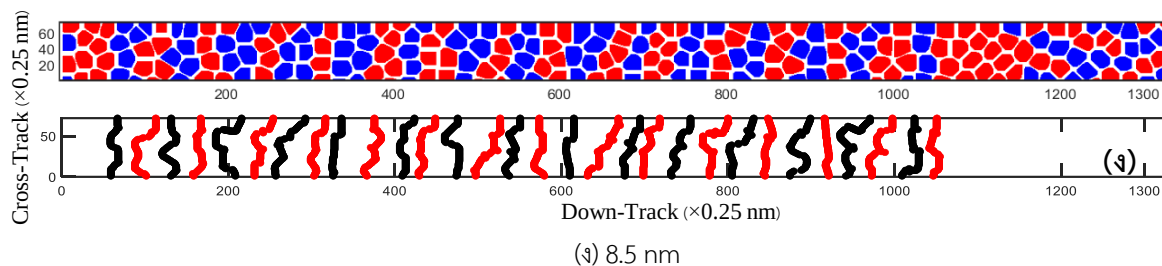
$\bar{x}_m$ เป็นตำแหน่งเฉลี่ย (average position)

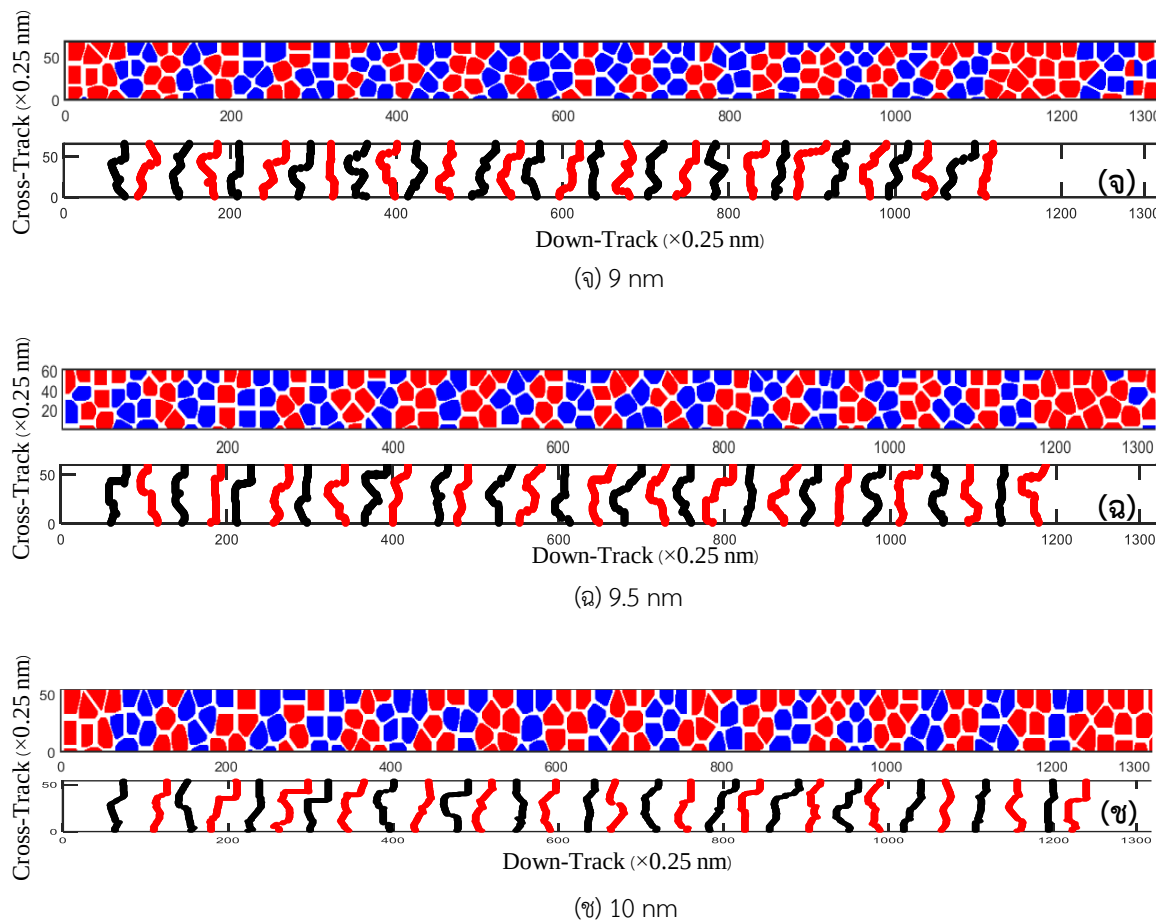
N เป็นจำนวนทั้งหมดของจุดเปลี่ยนผ่าน

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

ภาพที่ 3 แสดงผลของรอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (บน) กับขอบเขตของการเปลี่ยนผ่าน (ล่าง) ในระนาบ $x - y$ โดยรอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ประกอบไปด้วยเกรนขนาดแตกต่างกัน เกรนสีแดงแสดงถึงทิศทางของ $\vec{M}$ ในทิศทาง $+z$

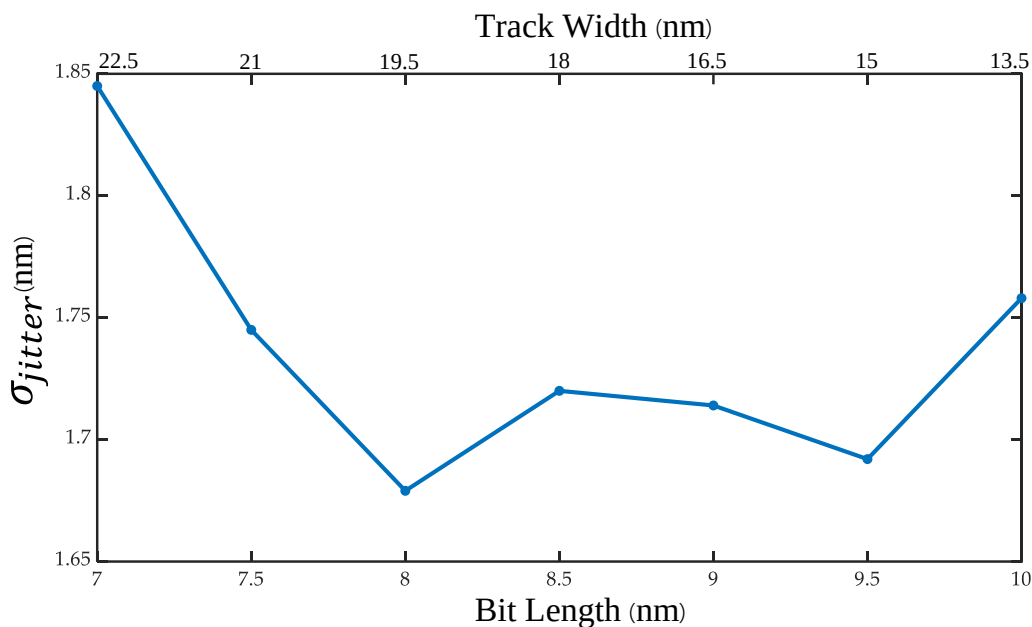
และเกรนสีน้ำเงินแสดงถึงทิศทางของ $\vec{M}$ ในทิศทาง $-z$ จากผลการจำลองรอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก สามารถตรวจหาตำแหน่งของขอบเขตการเปลี่ยนผ่านที่หาได้จากกระบวนการหาขอบเขตการเปลี่ยนผ่านดังภาพที่ 2 เพื่อนำตำแหน่งที่ได้ไปแสดงข้อมูลในรูปแบบ 2 มิติ ขอบเขตการเปลี่ยนผ่านสีดำและสีแดงแสดงถึงตำแหน่งระหว่างขอบเขตการเปลี่ยนผ่านของแต่ละบิตข้อมูล หลังจากนั้นนำไปคำนวณหาค่าของจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน จากผลของขอบเขตการเปลี่ยนผ่านที่แสดงในรูปแบบ 2 มิติ ช่วยให้สังเกตเห็นถึงการซิกแซกของขอบเขตการเปลี่ยนผ่าน (zigzag boundary) ได้อย่างชัดเจนจากการสังเกตยังพบอีกว่า มีจุดที่ซิกแซกอย่างมาก ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนจากส่วนของขอบบนของแทร็ค สาเหตุอาจจะมาจากรูปร่างของจุดความร้อนที่เป็นรูปร่างแบบ squircle โดยมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมที่มีมุมโค้งมน ดังนั้นบริเวณส่วนของขอบแทร็คจึงมีความซิกแซกอย่างมาก





ภาพที่ 3 รอยบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (บน) และ ขอบเขตการเปลี่ยนผ่าน (ล่าง) กับความยาวบิต (ก) 7 nm, (ข) 7.5 nm, (ค) 8 nm, (ง) 8.5 nm, (จ) 9 nm, (ฉ) 9.5 และ (ช) 10 nm

ภาพที่ 4 แสดงผลของจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านเปรียบเทียบกับ การปรับเปลี่ยนความยาวบิตและความกว้างแทร็ค ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่คงที่ 4.1 Tb/in² ความยาวบิตเป็น 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5 และ 10 นาโนเมตร กับความกว้างแทร็คเป็น 22.5, 21, 19.5, 18, 16.5, 15 และ 13.5 นาโนเมตร ได้จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านเป็น 1.845, 1.744, 1.679, 1.720, 1.714, 1.692 และ 1.758 นาโนเมตร ตามลำดับ จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านน้อยที่สุดเป็น 1.679 นาโนเมตร ที่ความยาวบิต 8 นาโนเมตร กับความกว้างแทร็ค 19.5 นาโนเมตร ภาพที่ 3 (ค) แสดงผลของจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านที่น้อยที่สุด จากผลของการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน ยังพบอีกว่า แนวโน้มของจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านที่มีความผันผวนในช่วงของความยาวบิตจาก 8 จนถึง 10 นาโนเมตร มีความสอดคล้องกับผลของสองบทความวิจัยที่ทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยพบว่า เมื่อความยาวบิตเพิ่มขึ้น จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านที่เปรียบเทียบกับ การปรับเปลี่ยนความยาวบิตมีแนวโน้มลดลง และเมื่อความกว้างแทร็คเพิ่มขึ้น จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านที่เปรียบเทียบกับ การปรับเปลี่ยนความกว้างแทร็คมีแนวโน้มลดลง [7-8] นอกจากนี้ เมื่อความยาวบิตลดลงจาก 8 จนถึง 7 นาโนเมตร จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้างต้น พิจารณาได้ว่าความยาวบิตที่ลดลงจนขนาดของความยาวบิตเข้าใกล้ขนาดของเกรนแล้ว จิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านเพิ่มขึ้น อาจจะมาจากรูปร่างของเกรนหรือการกระจายขนาดของเกรน เนื่องจากความยาวบิตที่ 6 นาโนเมตรไม่สามารถจำลองได้ เพราะว่าบางส่วนของเกรนไม่ได้อยู่ในพื้นที่ของจุดความร้อน ส่งผลให้แมกเนไทเซชันภายในเกรนไม่กลับตัว



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านกับความยาวบิต ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in²

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยีความร้อนช่วยบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในรูปแบบ 2 มิติ ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 4.1 Tb/in² โปรแกรมจำลองไมโครแมกเนติกที่ใช้คือ OOMMF และใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการสร้างแบบจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก การสร้างจุดความร้อน การคำนวณและการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่าน จากผลการจำลองจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านด้วยความยาวบิตตั้งแต่ 7-10 นาโนเมตร พบว่าจิตเตอร์การเปลี่ยนผ่านที่น้อยที่สุดเป็น 1.679 นาโนเมตร ที่ความยาวบิต 8 นาโนเมตร และความกว้างแทร็ค 19.5 นาโนเมตร งานวิจัยนี้อาจจะนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาในการออกแบบของการจำลองหรือการทดลองของเทคโนโลยี HAMR ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. กชกร ปิตุโส สำหรับโค้ดการจำลอง ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุแม่เหล็กและการประยุกต์ใช้งานที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ดุษฎีนิพนธ์หรือการศึกษาอิสระสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนการทำโครงการวิจัย (Project) สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และผู้วิจัยขอขอบคุณ ฟริซฟอร์ดแวร์ สำหรับการจำลองคือ โปรแกรม OOMMF User's Guide, Version 1.0 M.J. Donahue and D.G. Porter Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (Sept 1999) และโปรแกรม MATLAB

เอกสารอ้างอิง

1. Coughlin T. Developments in HDD Technology Provide Consumer Services (*The Art of Storage*). IEEE Consum Electron Mag. 2016; 5(3): 122-133.
2. Wood R. Future hard disk driver system. J Magn Mater. 2009; 321(6): 555-561.
3. Weller D, Mosendz O, Parker G, Pisana S, Santos TS. L10 FePtX-Y media for heat-assisted magnetic recording. Phys Status Solidi A. 2013; 210(7): 1245-1260.
4. Zhu JG, Li H. Understanding Signal and Noise in Heat Assisted Magnetic Recording. IEEE Trans Magn. 2013; 49(2): 765-772.
5. Weller D, et al. A HAMR Media Technology Roadmap to an Areal Density of 4 Tb/in². IEEE Trans Magn. 2014; 50(1): 1-8.
6. Victora RH, Huang PW. Simulation of heat-assisted magnetic recording using renormalized media cells. IEEE Trans Magn. 2013; 49(2): 751-757.
7. Oezelt H, et al. Transition Jitter in Heat-Assisted Magnetic Recording by Micromagnetic Simulation. IEEE Trans Magn. 2017; 53(11): 1-5.
8. Natekar NA, Victora RH. Analytical Estimation of Transition Jitter for the Heat-Assisted Magnetic Recording Process. IEEE Magn Lett. 2020; 11:1-4.
9. Wang X, et al. HAMR Recording Limitations and Extendibility. IEEE Trans Magn. 2013; 49: 686-692.
10. Sohn H, Victora RH. Recording Comparison of ECC versus Conventional Media at Equal Grain Size. IEEE Trans Magn. 2011; 47(10): 4073-4076.
11. Valcu FB, Yeh N. Jitter in a Voronoi Pattern Media-Effect of Grain Size Distribution and Reader Width. IEEE Trans Magn. 2010; 46(6): 2160-2162.
12. Tsai JL, et al. Magnetic Properties and Microstructure of FePt(BN, Ag, C) Films. Coatings. 2018; 8(10): 358.
13. MATLAB. [Internet]. 2022. Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
14. Pituso K, et al. Simulation of magnetic footprints for heat assisted magnetic recording. Eur Phys J Appl Phys. 2017; 78(2): 20301.
15. Tipcharoen W, Warisarn C, Tongsoomporn D, Karns D, Kovintavewat P. Investigation of writing error in staggered heated-dot magnetic recording systems. AIP Advances. 2017; 7(5): 056511.
16. Kaewrawang A. Magnetism and Magnetic Materials. Khon Kaen: Khon Kaen University Press; 2018. Thai.
17. Donahue MJ, Porter DG. OOMMF User's Guide, Release 1.2a3 [Internet]. 2021. Available from: https://math.nist.gov/oommf/ftp-archive/doc/userguide12a3_20021030.pdf.
18. Hernandez S, et al. Geometrical Scaling Limits of Heat-Assisted Magnetic Recording. IEEE Trans Magn. 2021; 57(3): 1-5.