

บทความวิจัย

การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวข้อข้อมูลด้วย แบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาค

วิวัฒน์ สังฆะพิลา พรรณวดี จุริมาศ และ เจษฎา จุริมาศ*

ได้รับบทความ: 2 พฤษภาคม 2562

ได้รับบทความแก้ไข: 6 สิงหาคม 2562

ยอมรับตีพิมพ์: 19 สิงหาคม 2562

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคซึ่งถูกประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีส ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำไปใช้ในหัวข้อข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนและวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติกตามลำดับ ที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมทางแม่เหล็กของวัสดุทั้งสองได้อย่างถูกต้องในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกพลวัตของแมกนีไทเซชันสามารถถูกอธิบายได้ด้วยสมการแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต ในขณะที่วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะเลือกใช้วิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์ในการอธิบาย นอกจากนี้แบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นมานี้ยังได้รับการพัฒนาให้สามารถควบคุมพารามิเตอร์ของระบบได้อย่างมีความเสมือนจริง ได้แก่ ขนาดของโครงสร้างของระบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก และผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของฟิล์มแม่เหล็ก แบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก ผลการคำนวณให้ค่าที่สอดคล้องกับทฤษฎีและผลการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาผลของลักษณะของโครงสร้างที่มีการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของฟิล์มในโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลง จากการศึกษาพบว่าค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กจะมีค่าต่ำกว่าค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนของโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่ขอบฟิล์มถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบถูกตัดออกไปจากโครงสร้างขนาดเล็กนั้นมีปริมาตรที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ

คำสำคัญ: ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน สมการแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต วิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: jessada.c@msu.ac.th

The Study of Exchange Bias Phenomenon in Read Head via the Realistic Micromagnetic Model

Wiwat Sungkapila, Phanwadee Chureemart and Jessada Chureemart*

Received: 2 May 2019

Revised: 6 August 2019

Accepted: 19 August 2019

ABSTRACT

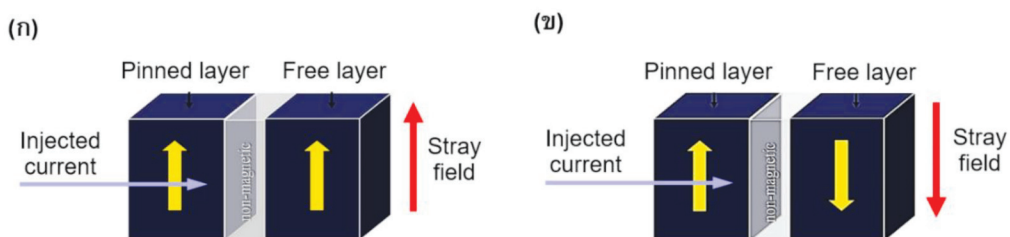
In this work, we proposed the realistic micromagnetic model used to study the exchange bias phenomenon in magnetic bilayer system such as CoFe coupled with IrMn for read head sensor in hard disk drive. CoFe and IrMn are ferromagnetic and antiferromagnetic materials, respectively, which have the different magnetic properties. We proposed the realistic micromagnetic model which can describe the magnetic behavior for both materials for the study of exchange bias phenomena. For ferromagnetic material, the dynamics of the magnetization was explained by Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation, meanwhile the kinetic Monte Carlo method was used for antiferromagnetic material. Moreover, this model has been modified to control the parameters of the system such as system size, grain diameter, grain size distribution and grain cutting at the edges of the structures. The micromagnetic model was used to investigate the exchange bias field (H_{EB}) due to the effects of exchange interlayer field (H_{int}) and grain diameter. The results showed good agreement with the theoretical and experiment works. In addition, the effect of grain cutting in small scale system was considered. We found that the H_{EB} for system including etching effect reduced by 20 percent of no etch effect structure because the volume of the cutting area was comparable with the total area.

Keywords: Exchange bias phenomenon, Landau-Lifshitz-Gilbert equation, Kinetic Monte Carlo method

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อวิถีชีวิต เศรษฐกิจ และสังคมของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางซึ่งถูกนำมาใช้ร่วมกับกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มีความต้องการให้อุปกรณ์มีความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สูงขึ้นและขนาดของอุปกรณ์ที่ลดลง นำไปสู่การพัฒนาและการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การเพิ่มความจุและการลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องพัฒนาองค์ประกอบหลักสามส่วนด้วยกันคือ แผ่นบันทึกข้อมูล (recording media) หัวเขียน (write head) และหัวอ่าน (read head) การลดขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวส่งผลให้พฤติกรรมและคุณสมบัติขององค์ประกอบหลักทั้งสามส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของหัวอ่านข้อมูลซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านข้อมูล เนื่องจากผลของการขาดเสถียรภาพทางความร้อนในอุปกรณ์ที่มีขนาดลดลง นำไปสู่การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นพินในหัวอ่านข้อมูล

โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลประกอบด้วยชั้นหลักคือ ชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กและเชื่อมติดกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรกเรียกว่า ชั้นที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงหรือชั้นพิน (pinned layer) เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้นดังกล่าวถูกยึดทิศทางโดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [1] ในขณะที่ชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่สองเรียกว่า ชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือชั้นอิสระ (free layer) แมกนีไทเซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล ลักษณะโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลถูกแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการเหนี่ยวนำแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกและมีการจ่ายกระแสซึ่งมีทิศทางของสปินแบบสุ่มผ่านโครงสร้างของหัวอ่าน (ก) แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางเดียวกัน (ข) แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินมีทิศทางแตกต่างกัน

การอ่านข้อมูลสามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล โดยพบว่าถ้าทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระมีทิศทางเดียวกันกับชั้นพินจะส่งผลให้เกิดค่าความต้านทาน ที่มีค่าต่ำ เนื่องจากผลของการกระเจิงในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลซึ่งสามารถแทนด้วยสัญญาณ 1 ดังรูปที่ 1 (ก) ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระมีทิศทางตรงข้ามกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน พบว่าค่าความต้านทานจะมีค่าสูงซึ่งสามารถแทนด้วยสัญญาณ 0 ดังรูปที่ 1 (ข) จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าหัวอ่าน

ข้อมูลสามารถอ่านข้อมูลผ่านการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระซึ่งมีทิศทางแปรผันตามทิศของแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลเทียบกับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินได้ จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าชั้นอ้างอิงนั้นมีความสำคัญต่อกระบวนการอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอย่างยิ่ง การยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิงจะอาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนจากการเชื่อมต่อกันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ในขณะที่มีการควบคุมกระบวนการทางความร้อนและสนามแม่เหล็กจากภายนอก เมื่อทำการวัดสมบัติทางแม่เหล็กจะทำให้ได้ลู่วงปิดที่เคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตร ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนถูกนิยามด้วยค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (H_{EB}) ซึ่งวัดจากค่าสนามแม่เหล็กจากแกนสมมาตรถึงกึ่งกลางของลู่วงปิดฮิสเทอรีซิสที่เลื่อนออก ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุปกรณ์สปินทรอนิกส์และอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากเซ็นเซอร์หัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อใช้เป็นชั้นอ้างอิงสัญญาณในการอ่านข้อมูล

การพัฒนาอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีขนาดของความจุที่สูงขึ้นในขณะที่ขนาดของอุปกรณ์ยังคงเท่าเดิมหรือลดลงนั้นเป็นเรื่องที่ท้าทายอย่างมาก เนื่องจากข้อจำกัดในการลดขนาดของบิตข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งปัจจุบันขนาดของบิตข้อมูลอยู่ในช่วง 20–30 นาโนเมตร [2] นอกจากนี้การพัฒนาประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องพัฒนาองค์ประกอบทุก ๆ ส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของบิตข้อมูลซึ่งนำไปสู่ปัญหาทางด้านเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ เพราะพลังงานที่ใช้ในการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันมีค่าแปรผันตามปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก [3] เมื่อขนาดของโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลมีขนาดเล็กลงจะนำไปสู่ความซับซ้อนของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบจำลองเสมือนจริงทางคอมพิวเตอร์ระดับจุลภาคให้สามารถออกแบบโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลที่มีความเสมือนจริงเพื่อใช้ในการพิจารณาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กและผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่มีต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันจำเป็นต้องมีความเหมาะสมและสามารถอธิบายวัสดุแม่เหล็กแต่ละประเภทได้วัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่เชื่อมต่อกันสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้แก่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กที่ง่ายในการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือเรียกว่า วัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic materials) และวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นวัสดุที่ยากต่อการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนีไทเซชันซึ่งจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่นานในการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองจึงมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte carlo) [4] เป็นวิธีการที่ถูกใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบแข็ง (hard magnetic material) และมีค่าแอนไอโซโทรปีสูง โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันในแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเป็นผลมาจากการกระตุ้นทางความร้อน (activation thermal) ซึ่งส่งผลให้มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องจากปริมาณความร้อนที่สามารถเอาชนะค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กได้ การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันด้วยการกระตุ้นทางความร้อนสามารถอธิบายได้ตามกฎของอาเรเนียส-นีล (Arrhenius-Neel law) [5] แสดงดังสมการ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp(-\Delta E / k_B T) \quad (1)$$

โดยที่ τ^{-1} คือระยะเวลาคลายตัวรวม (total relaxation time) ซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองสถานะที่มีค่าพลังงานต่ำสุด τ_{12} และ τ_{21} (two minima energy state) f_0 คือแฟกเตอร์ความถี่ของการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของโมเมนต์แม่เหล็ก (attempt frequency) ΔE คือปริมาณพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก k_B คือค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (Boltzmann constant) และ T คืออุณหภูมิของระบบมีหน่วยเป็นเคลวิน ในการคำนวณค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กซึ่งเกิดจากผลต่างระหว่างผลรวมของพลังงานในระบบสูงสุดและผลรวมของพลังงานในระบบต่ำสุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามสมการ

$$E = \left(\frac{KV}{k_B T} \right) \sin^2 \theta - \left(\frac{M_s V H_T}{k_B T} \right) \cos(\theta - \theta_H) \quad (2)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปี V คือปริมาตรเกรนแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร M_s คือปริมาณแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) H_T คือสนามเฉพาะบริเวณรวม (total local field) θ แทนมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับสนามเฉพาะบริเวณรวมและ θ_H แทนมุมระหว่างแมกนีไทเซชันกับทิศแกนง่าย โดยค่าสนามเฉพาะบริเวณรวมเกิดจากผลรวมของสนามดังสมการ

$$\vec{H}_T = \vec{H}_{anis} + \vec{H}_{th} + \vec{H}_{ex}^{AF} \quad (3)$$

เมื่อ \vec{H}_{anis} คือสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field) \vec{H}_{th} คือสนามความร้อน (thermal field) และ \vec{H}_{ex}^{AF} คือสนามแลกเปลี่ยนเนื่องจากชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่กระทำต่อเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนแม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$\vec{H}_{ex}^{AF} = z H_{ex}^{int} \frac{A_i}{A_j} \hat{m}_{FM} \quad (4)$$

เมื่อ $z = t_{AF}/t_{AF}$ โดยที่ t_{AF} และ t_{FM} คือความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก ตามลำดับ และ \hat{m}_{FM} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กในเกรนแม่เหล็ก FM สำหรับการพิจารณาพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ทิศแกนง่ายทำมุมกับทิศของสนามเฉพาะบริเวณ พลังงานกีดกันทางแม่เหล็กไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยในการประมาณ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่มุม θ_H มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ สามารถประมาณได้ตามสมการ

$$\Delta E(H_T, \psi) = KV \left[1 - \frac{H_T}{g(\psi)} \right]^{\kappa(\psi)} \quad (5)$$

โดยที่ $g(\psi) = [\cos^{2/3}(\psi) + \sin^{2/3}(\psi)]^{-3/2}$ และ $\kappa(\psi) = 0.86 + 1.14g(\psi)$ [6] เมื่อ ψ คือมุมที่แสดงทิศทางแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่มีทิศตามทิศทางของสนามแม่เหล็กเฉพาะบริเวณ จากค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในสมการ (5) สามารถนำไปพิจารณาความน่าจะเป็นในการผันกลับทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนีไทเซชันในแต่ละเกรนแม่เหล็กได้ [7] ตามสมการ

$$P_t = \frac{(1 - e^{-t_m/\tau})}{(1 + e^{-\Delta E/k_B T})} \quad (6)$$

เมื่อ t_m คือระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลง (measuring time) การผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันหรือการเปลี่ยนแปลงสถานะ สามารถพิจารณาได้จากการนำค่าความน่าจะเป็น P_t ไปเปรียบเทียบกับตัวเลขสุ่ม x ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยในกรณีที่ $P_t > x$ การเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันไปยังสถานะใหม่จะถูกยอมรับด้วยความน่าจะเป็น P_t แต่เมื่อ $P_t < x$ การเปลี่ยนแปลงสถานะจะไม่ถูกยอมรับ โดยเกรนแม่เหล็กจะสร้างทิศทางของแมกนีไทเซชันใหม่และนำไปคำนวณความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะจนกระทั่งเกรนแม่เหล็กทั้งหมดในระบบเกิดการเปลี่ยนสถานะ

สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเป็นชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กแบบอ่อน ซึ่งเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการเหนี่ยวนำทิศทางด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก วิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้อธิบายพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกคือ สมการแลนดาวน์ ลิฟต์ชิตซ์ กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert; LLG) [8] เมื่อพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุเกิดขึ้น เนื่องจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective magnetic field) ที่ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในระบบแสดงถึงความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{\partial \hat{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \hat{M} \times \vec{H}_{eff} - \frac{\gamma \alpha}{(1 + \alpha^2)} \left[\hat{M} \times (\hat{M} \times \vec{H}_{eff}) \right] \quad (7)$$

เมื่อ γ คือค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (absolute gyromagnetic ratio) α คือ ค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant) \hat{M} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของโมเมนต์แม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก และ \vec{H}_{eff} คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective magnetic field) จากสมการ (7) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่สองลักษณะ โดยในเทอมแรกแสดงถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวน (precessional motion) รอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล และในเทอมที่สองแสดงถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหน่วง (damping motion) เข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล เนื่องจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผลออกแรงทอร์กมากกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในระบบ การเคลื่อนที่แบบหมุนวนเข้าหาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ความหน่วงซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษาระบบที่สภาวะสมดุลควรกำหนดให้ค่าคงที่ความหน่วงมีค่าที่สูงเพื่อลดระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลของระบบ โดยค่าคงที่ความหน่วงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกในโครงสร้างแบบสองชั้นสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (8) เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสนามแม่เหล็กประสิทธิผลซึ่งเป็นผลรวมของสนามทั้งหมดที่กระทำต่อสปินภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกดังสมการ

$$\vec{H}_{\text{eff}} = \vec{H}_{\text{ex}} + \vec{H}_{\text{anis}} + \vec{H}_{\text{dip}} + \vec{H}_{\text{ex}}^{\text{FM}} + \vec{H}_{\text{th}} + \vec{H}_{\text{app}} \quad (8)$$

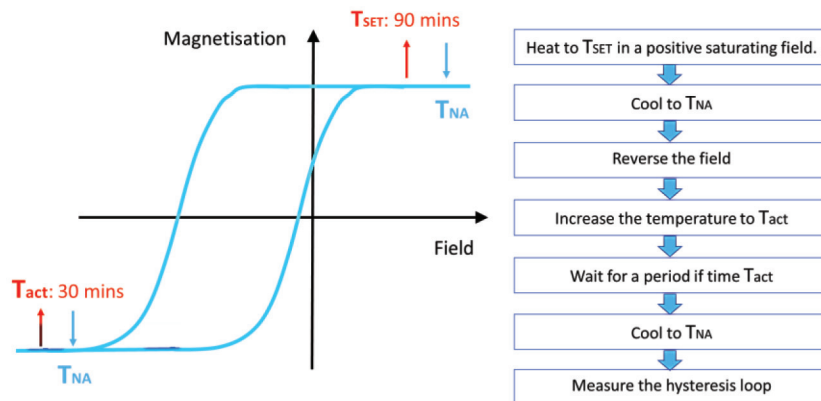
เมื่อ \vec{H}_{ex} คือสนามแลกเปลี่ยน (exchange field) ระหว่างสปินภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก \vec{H}_{anis} คือ สนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field) \vec{H}_{dip} คือสนามแม่เหล็กคู่ขั้ว (dipolar field) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ $\vec{H}_{\text{ex}}^{\text{FM}}$ คือสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (exchange interlayer field) \vec{H}_{app} คือสนามแม่เหล็กจากภายนอก (applied magnetic field) และ \vec{H}_{th} คือสนามความร้อน (thermal field) สมการ (8) แสดงค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดจากผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่ส่งผลต่อพลวัตแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ ซึ่งรายละเอียดของสนามดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โดยเริ่มจากปริมาณสนามแลกเปลี่ยนภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินภายในวัสดุ [9] ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$\vec{H}_{\text{ex}}^i = H_{\text{exch}} \sum_j \left(\frac{L_{ij}}{L_m} \right) \left(\frac{A_m}{A_j} \right) \hat{m}_j \quad (9)$$

โดยที่ $H_{\text{exch}} = J_m L_m / a^2 M$, A_m เมื่อ J_m คือการแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก i และเกรนแม่เหล็ก j L_m คือค่าเฉลี่ยระยะเชื่อมติดระหว่างเกรนแม่เหล็ก L_{ij} คือระยะการเชื่อมติดระหว่างเกรนแม่เหล็ก i และเกรนแม่เหล็ก j A_m คือค่าเฉลี่ยพื้นที่พื้นผิวของเกรนแม่เหล็ก a คือค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) M_s คือแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) และ \hat{m}_j คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันที่อยู่ใกล้เคียงกับเกรนแม่เหล็ก j สำหรับรายละเอียดในการคำนวณปริมาณสนามแอนไอโซโทรปีและสนามความร้อน สามารถพิจารณาได้ในผลงานวิจัยของ เกษฎา จูริมาศและคณะ [10]

จากที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (KMC) และสมการแลนดาวน์ ลิฟต์ซิทซ์ กิลเบิร์ต (LLG) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นอกจากนี้แล้วกระบวนการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ยังมีพื้นฐานการคำนวณเป็นไปตามขั้นตอนการสร้างปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในห้องทดลองที่เรียกว่า setting process ผ่านลักษณะการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสที่เรียกว่า York protocol ซึ่งถูกนำเสนอโดย O'Grady และคณะ [11] วิธีการดังกล่าวอาศัยการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation) ในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อช่วยให้การวัดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนให้ค่าที่เท่าเดิมทุกครั้งที่ทำกรวัดสนามไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ทำให้ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนถูกกำจัดออกไปได้ ขั้นตอนของกระบวนการ setting process สามารถอธิบายได้ดังแผนภาพโดอะแกรมในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงไดอะแกรมและขั้นตอนการวัดฮิสเทอรีซิสลูป [11]

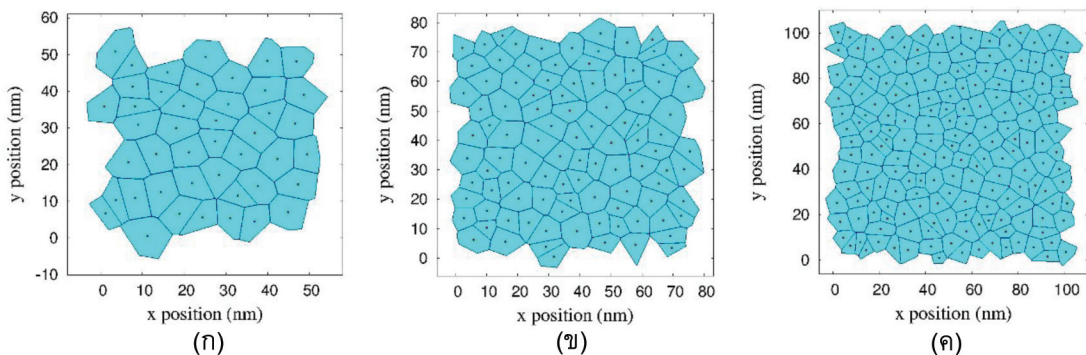
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เสมือนจริงเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากการลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งทำให้ผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างกลายเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการลดลงของขนาดของเกรนแม่เหล็กในโครงสร้างที่มีต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน โดยรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ได้นำเสนอขึ้นนี้ยังมีการจำลองลักษณะโครงสร้างแม่เหล็กสองชั้นที่มีความเสมือนจริงผ่านการออกแบบด้วยโปรแกรม voronoi construction ซึ่งสามารถกำหนดลักษณะของโครงสร้างรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น ลักษณะการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ขนาดของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและผลของการตัดขอบของโครงสร้างแม่เหล็ก

ผลการทดลอง

ในการศึกษาผลกระทบของการออกแบบของโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะทำการจำลองโครงสร้างเสมือนจริงที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (FM) เชื่อมต่อกับชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (AF) ชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ชั้นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอน (Cobalt Iron, CoFe) และอิริเดียมแมงกานีส (Iridium Manganese, IrMn) ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุทั้งสองได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลในปัจจุบัน สำหรับชั้นวัสดุแม่เหล็ก CoFe เป็นวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) 1300 เคลวิน ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี 1.8×10^5 เอริกต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและปริมาณแมกนีไทเซชันอิ่มตัว 1800 emu/cc สำหรับชั้นวัสดุ IrMn เป็นวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิของเนล (Neel temperature) 690 เคลวิน ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี 5.5×10^5 เอริกต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [12, 13] ปริมาณแมกนีไทเซชันอิ่มตัวเท่ากับ 1800 emu/cc โดยโครงสร้างของระบบที่ทำการศึกษจะถูกกำหนดให้ระบบมีขนาด 50×50 นาโนเมตร ความหนาของชั้นฟิล์ม CoFe มีความหนา 4 นาโนเมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม IrMn มีความหนา 8 นาโนเมตร โดยขนาดของเกรนแม่เหล็กของชั้นฟิล์มทั้งสองจะถูกกำหนดให้มีขนาดที่เท่ากัน

1. การออกแบบโครงสร้างเสมือนจริงระดับจุลภาค

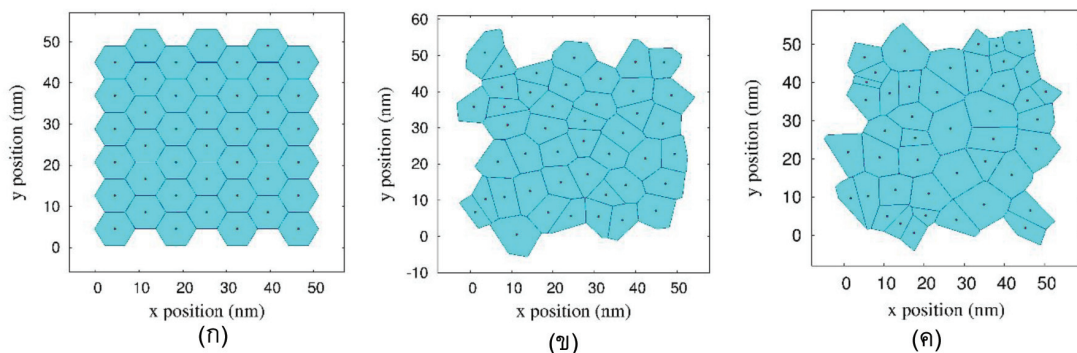
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคที่สามารถจำลองลักษณะโครงสร้างเสมือนจริงผ่านโปรแกรมโวโรนอย (voronoi construction) โครงสร้างของฟิล์มแม่เหล็กสองชั้นสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่เชื่อมติดกัน การจำลองลักษณะโครงสร้างดังกล่าวได้กำหนดตำแหน่งของเกรนแม่เหล็กทั้งสองชั้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน และมีลักษณะเป็นแท่งเกรนแม่เหล็ก การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงทางคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมโวโรนอยสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ของโครงสร้างให้มีความเสมือนจริง ได้แก่ การออกแบบลักษณะขนาดของโครงสร้างของชั้นฟิล์ม การกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กในวัสดุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก และการพิจารณาผลของการตัดขอบของแผ่นฟิล์มแม่เหล็ก เป็นต้น โดยในลำดับแรกจะแสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่มีการควบคุมขนาดของระบบที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าโครงสร้างเกรนแม่เหล็กที่ถูกจำลองด้วยโปรแกรมโวโรนอยสามารถควบคุมขนาดของระบบให้มีขนาดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น รูปที่ 3 (ก) แสดงผลของการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่ขนาดโครงสร้าง 50 x 50 ตารางนาโนเมตร ในรูปที่ 3 (ข) แสดงผลของการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่ขนาดโครงสร้าง 75 x 75 ตารางนาโนเมตร และในรูปที่ 3 (ค) แสดงการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่โครงสร้างขนาด 100 x 100 ตารางนาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กยังคงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่จำนวนของเกรนแม่เหล็กภายในระบบจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้โดยสามารถควบคุมขนาดของระบบได้ตามความต้องการ



รูปที่ 3 ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีขนาดของโครงสร้างแตกต่างกัน (ก) ขนาดโครงสร้าง 50 x 50 ตารางนาโนเมตร (ข) ขนาดโครงสร้าง 75 x 75 ตารางนาโนเมตร (ค) ขนาดโครงสร้าง 100 x 100 ตารางนาโนเมตร

นอกจากนี้ รูปแบบจำลองที่ได้นำเสนอยังสามารถควบคุมลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กภายในโครงสร้างเพื่อให้มีความเสมือนจริง เนื่องจากในกระบวนการปลูกฟิล์มไม่สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนแม่เหล็กให้มีขนาดที่เท่ากันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กภายในระบบเกิดขึ้น สาเหตุนี้นำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมโวโรนอยให้สามารถควบคุมลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กในระบบเพื่อให้มีลักษณะเสมือนจริงเมื่อ

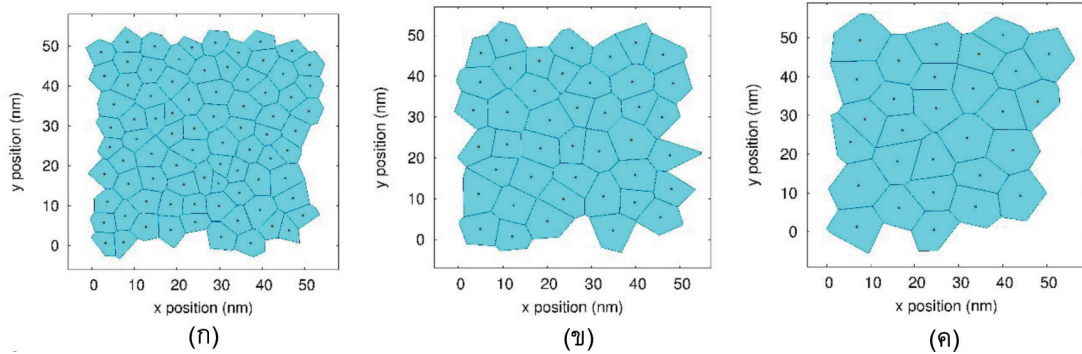
เทียบกับลักษณะการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กภายในระบบเนื่องจากการปลูกฟิล์ม การควบคุมการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กจะทำการควบคุมผ่านการกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ทำการแสดงตัวอย่างการจำลองลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดตั้งแต่ 0.0, 0.3 และ 0.5 ซึ่งให้ผลการจำลองโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองโครงสร้างที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมลักษณะของการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กได้อย่างเสมือนจริง ทำให้สามารถแสดงลักษณะการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กออกเป็น 3 ลักษณะคือ กรณีที่เกรนแม่เหล็กมีลักษณะเหมือนกัน (uniform grains) หรือไม่มีการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กภายในระบบซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 4 (ก) เกรนแม่เหล็กส่วนใหญ่ภายในระบบจะมีขนาดเท่ากันและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในกรณีที่เกรนแม่เหล็กมีการกระจายตัวปานกลาง (non-uniform grains) ซึ่งมีค่าการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กเป็น 0.3 ดังแสดงรูปที่ 4 (ข) พบว่าลักษณะของการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กในกรณีนี้จะทำให้เกรนแม่เหล็กบางส่วนมีขนาดที่เล็กลงและขนาดที่ใหญ่ขึ้น และในกรณีที่เกรนแม่เหล็กมีการกระจายตัวแบบสูงกว่าปกติ ซึ่งมีค่าการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก 0.5 แสดงดังรูปที่ 4 (ค) พบว่าการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กในลักษณะนี้จะส่งผลให้เกิดการผิดรูปของเกรนแม่เหล็กโดยเกรนแม่เหล็กบางส่วนมีขนาดที่ใหญ่กว่าปกติ



รูปที่ 4 ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีผลของการกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก 0.0 (ข) การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก 0.3 (ค) การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก 0.5 ในโครงสร้างขนาด 50 x 50 ตารางนาโนเมตร

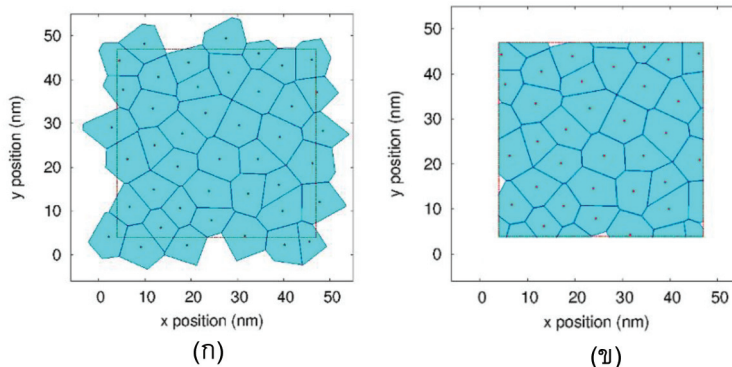
แบบจำลองโครงสร้างทางแม่เหล็กที่ได้นำเสนอยังสามารถควบคุมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนมีความเกี่ยวข้องกับปริมาตรของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาให้สามารถกำหนดขนาดของเกรนแม่เหล็กเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนได้ ยกตัวอย่างการจำลองโครงสร้างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 6 8 และ 10 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 5 โดยจะเห็นได้ว่าการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กด้วยโปรแกรมไวโรนอยสามารถจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกันได้อย่างเสมือนจริง เมื่อพิจารณาในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 6 นาโนเมตร ความหนาแน่นของเกรนแม่เหล็กภายในระบบต่อพื้นที่ที่มีค่าสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนแม่เหล็กต่อพื้นที่ที่มีค่าลดลง



รูปที่ 5 ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 6 นาโนเมตร (ข) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 8 นาโนเมตร (ค) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 10 นาโนเมตร ในโครงสร้างขนาด 50 x 50 ตารางนาโนเมตร

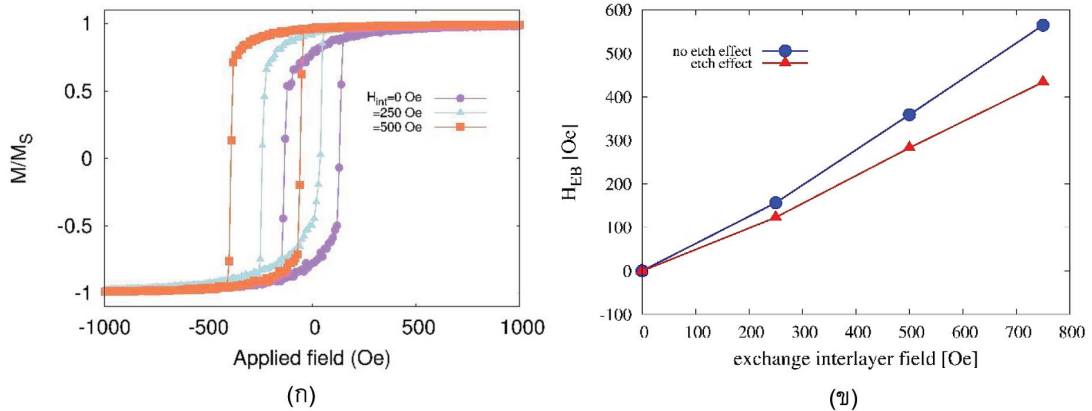
ในลำดับสุดท้าย รูปแบบจำลองเสมือนจริงยังได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการศึกษาผลของการลดขนาดชิ้นส่วนของแผ่นฟิล์ม เนื่องจากในการนำชิ้นส่วนของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องตัดให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งนำไปสู่ผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างส่งผลให้ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีค่าลดลง ดังนั้นโปรแกรมไวโรนอยจึงได้ถูกปรับปรุงให้สามารถพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างเพื่อให้เกิดความเสมือนจริงในการจำลองโครงสร้าง เพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างที่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างสามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงผลการออกแบบโครงสร้างของระบบที่ไม่มีพิจารณาและมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้าง ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ไม่มีพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้าง เกรนแม่เหล็กภายในระบบจะมีลักษณะที่สมบูรณ์ ซึ่งเกรนแม่เหล็กจะไม่ได้ถูกตัดออกไปจากระบบแสดงดังรูปที่ 6 (ก) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างดังรูปที่ 6 (ข) พบว่าเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างบางส่วนจะมีปริมาตรที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ปริมาตรของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบตลอดทั้งโครงสร้างอาจมีค่ามากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรรวมของเกรนแม่เหล็กภายในระบบ ซึ่งผลดังกล่าวอาจนำไปสู่ปัญหาด้านเสถียรภาพทางความร้อนและความคลาดเคลื่อนในการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 6 ผลการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก (ก) ลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดขอบของโครงสร้าง (ข) ลักษณะโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กในกรณีที่มีการพิจารณาผลของการตัดขอบของโครงสร้าง

2. ผลของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่มีต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นฟิล์มสำหรับโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกกับวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ ความขรุขระที่ผิวรอยต่อ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน การศึกษาผลของความขรุขระที่บริเวณผิวของรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุด้วยแบบจำลองเสมือนจริงในงานวิจัยนี้สามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (H_{int}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อทำให้เกิดการบังคับทิศทางหรือผันกลับทิศทาง สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุได้ทำการศึกษาในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กอริเดียมแมงกานีสที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนที่มีความหนา 8 และ 4 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยขนาดของโครงสร้างถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50×50 ตารางนาโนเมตรและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 นาโนเมตร ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่ทำการศึกษามีค่า 0, 250, 500 และ 750 เออร์สเตดตามลำดับ



รูปที่ 7 (ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (ข) ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีค่าแตกต่างกัน

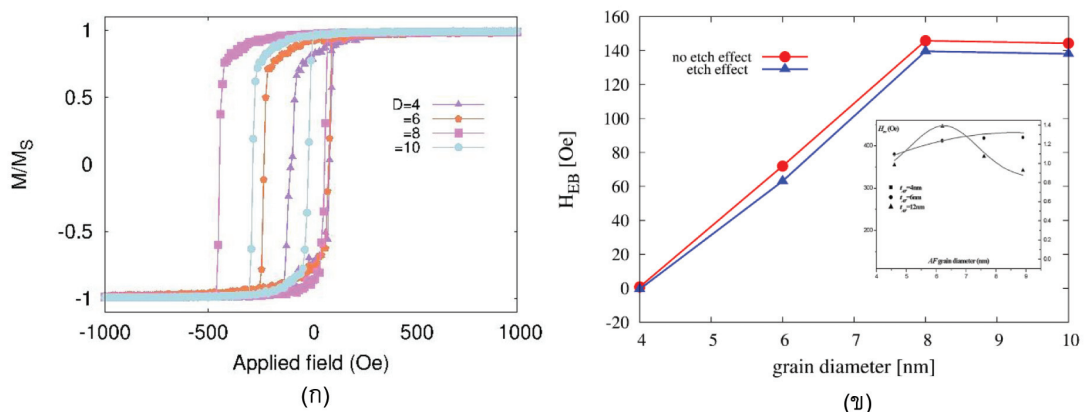
รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่สนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (H_{int}) มีค่า 0, 250 และ 500 เอร์สเทด เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของค่า H_{EB} จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ H_{int} มีค่าเป็นศูนย์ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่คำนวณได้มีลักษณะสมมาตรและไม่มีการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสนามแม่เหล็กจากภายนอก เนื่องจากแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไม่เกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างกัน ในขณะที่ทำการเพิ่ม H_{int} ขึ้นเป็น 250 และ 500 เอร์สเทด พบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่คำนวณได้มีลักษณะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้น ตามค่าความแรงของค่า H_{int} จากการพิจารณาผลของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสสามารถคำนวณค่า H_{EB} ที่แต่ละค่า H_{int} และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_{EB} และ H_{int} ได้ดังรูปที่ 7 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า H_{EB} ต่อการเพิ่มขึ้นของค่า H_{int} จากผลการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงให้ค่าที่สอดคล้องกับผลทางทฤษฎี [14] เนื่องจากการเพิ่มค่า H_{int} จะส่งผลต่ออันตรกิริยาแลกเปลี่ยนของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้น IrMn และ CoFe ที่สูงขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น CoFe จำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่สูงขึ้นตาม ซึ่งส่งผลให้ค่า H_{EB} มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ H_{int} นั้นเอง

นอกจากนี้ยังได้ทำการพิจารณาผลการตัดขอบของโครงสร้างของระบบต่อการพิจารณาค่า H_{EB} สำหรับระบบที่ไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่ขอบของโครงสร้าง (no etch effect) จะมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 6 (ก) และระบบที่พิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่ขอบของโครงสร้าง (etch effect) จะมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 6 (ข) ที่ขนาดของระบบมีขนาดเท่ากัน 50 x 50 ตารางนาโนเมตร ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบค่า H_{EB} ระหว่างทั้งสองโครงสร้าง จากการคำนวณผ่านรูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาค พบว่าค่า H_{EB} ที่ค่าสนาม H_{int} ระหว่าง 0 ถึง 750 เอร์สเทดของระบบที่พิจารณา ผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบจะมีค่า H_{EB} ที่น้อยกว่าระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็ก

ที่บริเวณขอบแสดงดังรูปที่ 7 (ข) เมื่อระบบที่มีขนาดเล็กลง ผลของการตัดขอบของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบมีผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบบางส่วนที่ถูกตัดออกไปมีปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของระบบ ซึ่งจะส่งผลให้เกรนแม่เหล็กดังกล่าวมีค่าพลังงานกีดกัน (energy barrier) ของระบบที่แปรผันตามปริมาตรของเกรนแม่เหล็กนั้นลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสามารถในการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น CoFe มีค่าลดลงด้วย ดังนั้นค่า H_{EB} ที่พิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างจึงมีค่าน้อยกว่าระบบที่ไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้าง โดยค่า H_{EB} ที่คำนวณได้จากระบบที่ไม่พิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของระบบมีค่าลดลงถึง 20% จากผลที่ได้ให้ค่าที่สอดคล้องตามทฤษฎีและยืนยันถึงความสำคัญของการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กลง

3. ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้าง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กเฉลี่ยส่งผลต่อปริมาตร และจะมีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็ก (energy barrier) ซึ่งเป็นพลังงานที่พยายามรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไม่ให้ผันกลับทิศทาง การศึกษาผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กที่มีต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนนั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก IrMn ที่เชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็ก CoFe ที่มีความหนาเป็น 8 และ 4 นาโนเมตร ตามลำดับ และกำหนดให้ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุมีค่าเท่ากับ 250 เออร์สเทด โดยโครงสร้างที่ทำการศึกษามีขนาด 50 x 50 ตารางนาโนเมตร ซึ่งได้กำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนแม่เหล็กที่ทำการศึกษามีค่าตั้งแต่ 4 6 8 และ 10 นาโนเมตร



รูปที่ 8 (ก) ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก (ข) ขนาดของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่คำนวณได้จากลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสในกรณีที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกัน [14]

จากรูปที่ 8 (ก) แสดงลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กแตกต่างกัน พบว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 4 นาโนเมตร ลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสแทบจะไม่มี การเคลื่อนออกจากแนวแกนสมมาตร แต่เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กเพิ่มขึ้นพบว่า ลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรไปในทิศทาง $-x$ เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กยังส่งผลให้ความกว้างของวงปิดฮีสเทอรีซิสมีขนาดที่กว้างมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตรกลับพบว่าขนาดของการเคลื่อนของลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่ จากการพิจารณาลูปวงปิดฮีสเทอรีซิสสามารถคำนวณค่า H_{EB} ที่แต่ละค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก ซึ่งจากผลที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า H_{EB} และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 8 (ข) จากผลการคำนวณผ่านแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระบบจุลภาคให้ผลที่สอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก โดยในกรณีที่เกรนแม่เหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก 4 นาโนเมตร พบว่า H_{EB} จะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็กมีค่าน้อย ซึ่งส่งผลให้ค่าพลังงานที่รักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันในแต่ละเกรนแม่เหล็กมีค่าต่ำ ดังนั้นระบบที่มีเกรนแม่เหล็ก 4 นาโนเมตร จึงไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแตกเปลี่ยนได้ เนื่องจากเกรนแม่เหล็กขาดเสถียรภาพทางความร้อนจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไว้ได้นั่นเอง เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่า H_{EB} จะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 นาโนเมตร เนื่องจากเกรนแม่เหล็กมีปริมาตรที่สูงส่งผลให้เกรนแม่เหล็กมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น ดังนั้นในการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กในชั้นวัสดุ CoFe ที่ถูกยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันด้วยการเชื่อมต่อกับวัสดุแม่เหล็ก IrMn จำเป็นต้องใช้ปริมาณของสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นจึงส่งผล H_{EB} มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตร กลับพบว่า มีแนวโน้มที่จะคงที่เนื่องจากเกรนแม่เหล็กมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงมากจนไม่สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ สำหรับการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแตกเปลี่ยนได้ ซึ่งเกรนแม่เหล็กดังกล่าวจะไม่ถูกนำไปพิจารณาในการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแตกเปลี่ยน ดังนั้นค่า H_{EB} จึงมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีขนาดที่สูงเกินไป นอกจากนี้ผลที่ได้จากการคำนวณยังสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและการทดลองโดยสามารถแสดงได้ในรูปเปรียบเทียบผลในรูปที่ 8 (ข) จากผลการคำนวณผ่านแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคในงานวิจัยนี้ให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและการทดลองที่ถูกเสนอโดย O'Grady และคณะ [15] จะเห็นได้ว่าลักษณะของค่า H_{EB} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากกว่า 8 นาโนเมตร

นอกจากนี้ แบบจำลองทางแม่เหล็กระดับจุลภาคยังได้มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบ เนื่องจากผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบค่า H_{EB} ระหว่างระบบที่มีการพิจารณาและระบบที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของระบบดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กที่ 4 6 8 และ

10 นาโนเมตร พบว่าค่า H_{EB} ของโครงสร้างที่มีการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของระบบให้ผลที่สอดคล้องกับระบบที่ไม่พิจารณาผลของการเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบ โดยค่า H_{EB} จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและจะมีค่าเริ่มคงที่และลดลงเมื่อเกรนแม่เหล็กมีขนาดเท่ากับ 8 นาโนเมตรและมากกว่า แต่ค่า H_{EB} มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบเนื่องจากปริมาตรของเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างถูกตัดออกไป ส่งผลให้เกรนแม่เหล็กดังกล่าวมีค่าพลังงานกีดกันที่ลดลง ซึ่งนำไปสู่การขาดเสถียรภาพทางความร้อนของเกรนแม่เหล็กจนไม่สามารถรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันไว้ได้ ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณ H_{EB} จึงให้ค่าที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของฟิล์ม ซึ่งผลการพิจารณาการตัดขอบของโครงสร้างของฟิล์มแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กลงพบว่าผลของการพิจารณาการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างมีผลต่อการคำนวณค่าเสถียรภาพทางความร้อนอย่างสูง ซึ่งไม่ส่งผลให้ค่า H_{EB} มีค่าลดต่ำลงและให้ผลสอดคล้องกับการพิจารณาปัจจัยเนื่องจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็ก H_{EB}

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนารูปแบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคเพื่อใช้สำหรับพิจารณาผลของการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูล รูปแบบจำลองดังกล่าวยังมีความเสมือนจริงในการจำลองโครงสร้างเกรนแม่เหล็ก เนื่องจากสามารถควบคุมพารามิเตอร์ของโครงสร้างได้อย่างเสมือนจริง ได้แก่ ขนาดของโครงสร้างของระบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก การกระจายตัวขนาดของเกรนแม่เหล็ก และผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้าง แบบจำลองทางแม่เหล็กเสมือนจริงระดับจุลภาคได้ถูกนำไปใช้พิจารณาค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน เนื่องจากผลของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนแม่เหล็ก พบว่าให้ค่าสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการทดลอง นอกจากนี้ ยังได้ทำการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของโครงสร้างโดยพบว่าผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบในโครงสร้างที่มีขนาดเล็กลงจะส่งผลต่อการลดลงของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ที่ยืนยันให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาผลของการตัดเกรนแม่เหล็กที่บริเวณขอบของหัวอ่านข้อมูลต่อความเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพิจารณาการลดลงของขนาดของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัย โดยโครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

1. Meiklejohn, W. H., & Bean, C. P. (1956). New magnetic anisotropy. *Physics Review*, 102(3), 1413-1414.
2. Chen, Y., Song, D., Qiu, J., Kolbo, P., Wang, L., He, Q., Covington, M., Stokes, S. Sapozhnikov, V. G., Dimitrov, D. V., Gao, K., & Miller, B. (2010). 2 Tbit/in² reader design outlook. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(3), 697-701.

3. Vallejo-Fernandez, G., & Chapman, J. N. (2009). Size effects in submicron exchange bias square elements. *Applied Physics Letter*, *94*(26), ISSN 0003-6951.
4. Chantrell, R. W., Walmsley, N., Gore, J., & Maylin, M. (2001). Calculations of the susceptibility of interacting superparamagnetic particles. *Physics Review B: Condensed Matter Mater Physics*, *63*(2), 1-14.
5. Tannous, C., & Gieraltowski, J. (2008). The Stoner-Wohlfarth model of ferromagnetism. *European Journal of Physics*, *29*(3), 475-487.
6. Pfeiffer, H. (1990). Determination of anisotropy field distribution in particles assemblies taking into account thermal fluctuations. *Physica Status Solidi*, *118*(1), 295-306.
7. El-Hilo, M., O'Grady, K., Chantrell, R. W., & Dickson, D. P. E. (1993). Time dependent magnetisation in systems with distributed energy barriers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *123*(1-2), 30-34.
8. Kittel, C. (1946). Theory of the structure of ferromagnetic domains in films and small particles. *Physics Review*, *70*(11), 965-971.
9. Peng, Y., Wu, X. W., Pressesky, J., Ju, G. P., Scholz, W., & Chantrell, R. W. (2011). Cluster size and exchange dispersion in perpendicular magnetic media. *Journal of Applied Physics*, *109*(12), 1-8.
10. Wassana, D. (2018). Effect of Easy Axis Distribution on Exchange Bias Phenomenon in Read Element via the Granular Model. *Srinakharinwirot Science Journal*, *34*(2), 79-97. (in thai).
11. O'Grady, K., Fernandez-Outon, L. E., & Vallejo-Fernandez, G. (2010). A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *322*(8), 883-899.
12. Vallejo-Fernandez, G., Deakin, T., O'Grady, K., Oh, S., Leng, Q., & Pakala, M. (2010). Measurement of the antiferromagnet activity in exchange bias systems. *Journal of Applied Physics*, *107*(9), 09D709.
13. Barker, J., Craig, B., Lamberton, R., Johnston, A., Chantrell, R. W., & Heinonen, O. (2009). A model of the exchange bias setting process in magnetic read sensors. *Applied Physics Letters*, *95*(2), 022504.
14. Craig, B., Lamberton, R., Johnston, A., Nowak, U., Chantrell, R. W., & O'Grady, K. (2008). A model of the temperature dependence of exchange bias in coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers. *Journal of Applied Physics*, *103*(7), 07C102.
15. Vallejo-Fernandez, G., Fernandez-Outon, L. E., & O'Grady, K. (2008). Antiferromagnetic grain volume effects in metallic polycrystalline exchange bias systems. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *41*(11), 112001-115507.

