

บทความวิจัย

ผลกระทบของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายต่อปรากฏการณ์ไบอัส แลกเปลี่ยนในโครงสร้างหัวอ่านผ่านรูปแบบจำลองแกรนูลาร์

วาสนา แดงอำ พวรรณดี จุริมาศ และ เจษฎา จุริมาศ*

ได้รับบทความ: 24 พฤษภาคม 2561

ได้รับบทความแก้ไข: 3 สิงหาคม 2561

ยอมรับตีพิมพ์: 3 สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

แบบจำลองแกรนูลาร์ในระดับจุลภาคซึ่งมีพื้นฐานจากสมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ตถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้สำหรับการศึกษาสมบัติแม่เหล็กพื้นฐาน เนื่องจากปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนี้สามารถจำลองลักษณะโครงสร้างวัสดุที่มีความเสมือนจริงได้ โดยการรวมผลของการกระจายตัวของขนาดของเกรนภายในระบบรวมทั้งผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกได้ นอกจากนี้ ยังสามารถรวมผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนและอันตรกิริยาระหว่างชั้นวัสดุเพื่อให้การคำนวณมีค่าเสมือนจริงได้อีกด้วย จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญได้แก่ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณวงปิดฮิสเทอรีซิส ขนาดของเกรนเฉลี่ย และปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุส่งผลกระทบอย่างมากต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้น โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังพบว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายส่งผลกระทบต่อการลดลงของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนมากถึง 60% เมื่อมุมของการกระจายตัวมีค่าเท่ากับ 30 องศา สาเหตุเนื่องมาจากการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกส่งผลให้เกิดการลดลงของผลรวมสุทธิของปริมาณแมกนีไทเซชันในชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

คำสำคัญ: สมการแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต การกระจายตัวของทิศแกนง่าย สนามไบอัสแลกเปลี่ยน

หน่วยวิจัยการคำนวณและการทดลองด้านแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

Effect of Easy Axis Distribution on Exchange Bias Phenomenon in Read Element via the Granular Model

Wassana Daeng-am, Phanwadee Chureemart, and Jessada Chureemart*

Received: 24 May 2018

Revised: 3 August 2018

Accepted: 3 August 2018

ABSTRACT

The granular model at micromagnetic level based on Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation is proposed to investigate the fundamentally magnetic properties in exchange-biased bilayer system comprised of ferromagnetic (FM) and antiferromagnetic (AF) layers which are the main components of hard disk drive. The proposed model can be used to generate the realistic microstructure, including the distribution of grain size as well as the easy axis misorientation in AF layer. Moreover, the intragranular and interlayer exchange interactions are also included into the model for realistic calculation. The results showed that the vital factors such as the calculation time for hysteresis calculation, the magnetic grain size, and the exchange interlayer field significantly affected the exchange bias field, and all calculations gave good agreement with the other experimental works on exchange bias as well. In addition, we found that the effect of easy axis misorientation gave rise to the reduction of exchange bias field over 60 percentages at the dispersion angle of 30 degrees. This is due to the fact that the dispersion of easy axis in AF layer causes the decrease of net AF magnetization used to pin the direction of FM layer. In conclusion, the easy axis misorientation in AF layer is the one of crucial factors affecting on the exchange bias phenomenon of read element in hard disk drive.

Keywords: Landau > Lifshitz > Gilbert equation, easy axis misorientation, exchange bias field

Computational and experimental magnetism group, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

*Corresponding author, email: jessada.c@msu.ac.th

บทนำ

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล (data storage technologies) เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ซึ่งถูกนำมาเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์ ส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดนี้ได้รับการออกแบบและพัฒนาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่มีการนำมาประยุกต์ใช้งาน เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกศึกษาและพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูลของจานแม่เหล็กหรือแผ่นบันทึกข้อมูล (magnetic recording media) โดยการเพิ่มพื้นที่ความจุข้อมูล (areal density) ให้มีค่ามากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbits/in²) [1-2] ตามความต้องการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการลดขนาดของเกรนวัสดุแม่เหล็กในแผ่นบันทึกข้อมูลและเพิ่มค่าความเสถียรทางความร้อน รวมไปถึงการพัฒนาองค์ประกอบอื่น เช่น หัวเขียน และหัวอ่านข้อมูลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการออกแบบลักษณะโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่โดยการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กซึ่งในปัจจุบันได้มีการลดขนาดของเกรนได้น้อยกว่า 7 นาโนเมตร (nm) [3-4] และการพัฒนาโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล (read sensor) หรือโครงสร้างสปีนวาล์ว (spin-valve geometry) ที่ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสองชั้นแบ่งออกเป็นชั้นพิน (pinned layer, PL) และชั้นอิสระ (free layer, FL) ตามลำดับ โดยชั้นทั้งสองจะถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (non-magnet material) หรือเรียกว่าชั้นว่าง (spacer layer, SL) เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance) ได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์ค่าต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magneto-resistance) และปรากฏการณ์ค่าต้านทานเชิงแม่เหล็กจากการทะลุผ่าน (tunneling magneto-resistance) จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาเพื่อให้สามารถตอบโจทย์การพัฒนาเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตามเงื่อนไขข้างต้นได้

โดยทั่วไปแล้วพบว่า ขนาดของหัวอ่านข้อมูลจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดความกว้างของแทร็คแม่เหล็ก (magnetic track width) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเกรนภายในแผ่นบันทึกข้อมูล ดังนั้น การลดขนาดของเกรนเพื่อเพิ่มค่าความจุจึงส่งผลให้มีการพัฒนาหัวอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กลงด้วย โดยในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของหัวอ่านข้อมูล (reader width) จำเป็นต้องมีค่าน้อยกว่า 30 nm [2, 5] เพื่อให้สามารถอ่านข้อมูลที่ถูกบันทึกบนจานแม่เหล็กและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) ได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การลดขนาดของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นำไปสู่ปัญหาในภาคอุตสาหกรรมอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ ความเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของหัวอ่านข้อมูล การลดขนาดของอุปกรณ์มีผลทำให้หัวอ่านข้อมูลขาดเสถียรภาพทางความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นพิน (PL) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นอ้างอิงข้อมูลในหัวอ่าน สาเหตุเนื่องมาจากการลดขนาดของหัวอ่านที่ลดลงในระดับนาโนเมตรจะส่งผลโดยตรงต่อ พลังงานอุปสรรค (energy barrier, ΔE) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการรักษาทิศทางของแมกนีโทเซชันในชั้นพินซึ่งมีค่า $\Delta E = K_u V$ โดยแปรผันตามค่าความเป็นแม่เหล็กหรือค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant) และปริมาตรของเกรนในวัสดุแม่เหล็ก โดยการยึดทิศทางของแมกนีโทเซชันในชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะอาศัยขบวนการที่เรียกว่าปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [6-8] ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกับชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกโดยตรง ดังนั้น การลดขนาดของหัวอ่านจะส่งผลโดยตรงต่อการลดพลังงานกีดกันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมก

เนติกที่ทำหน้าที่ยึดทิศทางแมกนีไทเซชันในชั้นพินเช่นเดียวกัน การพิจารณาความสามารถในการทนต่อความร้อนของวัสดุแม่เหล็กจะถูกระบุโดยค่าสัดส่วนระหว่างพลังงานภายในวัสดุต่อค่าพลังงานความร้อนที่กระทำต่อระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กตามกฎของอาร์เรเนียส-นีลส์ (Arrhenius-Neel's law) [9] แสดงดังสมการที่ (1)

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

เมื่อ τ คือระยะเวลาในการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation time) f_0 คือความถี่ในการสั่นของแมกนีไทเซชันภายในระบบ (attempt frequency) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-9} ต่อวินาที และพลังงานความร้อนเฉลี่ยสามารถพิจารณาได้จากผลคูณระหว่างค่าคงที่บ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant, k_B) และค่าอุณหภูมิของระบบ (ambient temperature, T)

จากปัญหาด้านความเสถียรทางความร้อนนำไปสู่การศึกษาผลกระทบเนื่องจากการขาดเสถียรภาพทางความร้อนต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนทั้งในส่วนของการทดลอง [10-12] และแบบจำลองทางทฤษฎีอย่างต่อเนื่อง [13-16] และได้มีการนำเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในการอธิบายและทำนายผลทางการทดลองเพื่อนำไปเป็นต้นแบบในการผลิตโครงสร้างสปีนาล์วเนื่องจากการลดของขนาดหัวอ่านข้อมูล อาทิเช่น รูปแบบจำลองอย่างง่ายที่ถูกเสนอโดย กอนซาโล เฟอร์นันเดซและคณะ [17] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงผลของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและการกระจายตัวของขนาดของเกรน (grain size distribution) ต่ออัตราการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน แม้ว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการศึกษาปรากฏการณ์ ไบอัสแลกเปลี่ยนได้ในหลากหลายการทดลอง แต่พบว่าแบบจำลองนี้ยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากถูกสร้างขึ้นภายใต้สมมติฐานที่กำหนดให้แมกนีไทเซชันบริเวณรอยต่อภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางแกนง่ายซึ่งจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกันทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอและเป็นระเบียบ มีลักษณะเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (single domain) และได้ละเลยการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing field) ที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนแต่ละเกรนภายในระบบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วลักษณะผิวรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองชั้นจะมีพื้นผิวแบบขรุขระ (roughed interface) เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ขณะปลูกฟิล์ม (crystalline film growth) รวมถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแต่ละตัวจะมีทิศการกระจายตามทิศทางแกนง่าย (easy axis distribution) [15-16] กล่าวคือจะไม่เกิดการจัดเรียงตัวแบบสมบูรณ์ของแมกนีไทเซชันซึ่งมีทิศขนานกับชั้นฟิล์ม จากความไม่สมบูรณ์แบบของแบบจำลองอย่างง่ายข้างต้นนำไปสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการนำเสนอแบบจำลองแบบแกรนูลาร์เสมือนจริง (realistic granular model) โดยการพิจารณาผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่ราบเรียบบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ แบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นนี้คาดว่าจะสามารถอธิบายและทำนายปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองยิ่งขึ้น รวมถึงการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพทางความร้อนในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการนำเสนอแบบจำลองแบบแกรนูลาร์เสมือนจริงเพื่อใช้สำหรับศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบไปด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่เชื่อมติดกัน รวมถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันและคุณสมบัติแม่เหล็กพื้นฐานที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดวิธีการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันเริ่มจากการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันตามเวลาเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยอาศัยสมการแลนดอว์ – ลิฟต์ซิทซ์ – กิลเบิร์ต (Landau – Lifshitz – Gilbert equation of motion, LLG) ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถคำนวณหาลูปปิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางแม่เหล็กของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้

แบบจำลองทางแม่เหล็กแบบแกรนูลาร์

รูปแบบจำลองทางแม่เหล็กแบบแกรนูลาร์หรือแบบจำลองทางแม่เหล็กแบบจุลภาคมาตรฐานเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็กในระดับจุลภาค (microscale) โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองดังกล่าวจะพิจารณาให้จำนวนแมกนีไทเซชัน ซึ่งถูกใช้สำหรับการคำนวณมีขนาดเท่ากับจำนวนเกรนภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งทำให้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กได้อย่างมีความถูกต้อง ในลำดับแรกโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากจะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมโวโรนอย (Voronoi construction) ซึ่งช่วยให้สามารถจำลองลักษณะโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่มีความเสมือนจริง การกำหนดขนาดของเกรนเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองได้ [18] นอกจากนี้ การจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยอาศัยโปรแกรมโวโรนอยยังสามารถคำนวณผลการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน นำไปสู่การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก การศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก จะเริ่มจากการพิจารณาปริมาณค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field, \mathbf{H}_{eff}) ภายในระบบ สำหรับค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะประกอบไปด้วยปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กทั้งหมด ได้แก่ สนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field, \mathbf{H}_{anis}) สนามปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน (exchange field, \mathbf{H}_{exch}) สนามแม่เหล็กหักล้างหรือสนามแม่เหล็กคู่ขั้ว (dipolar field, \mathbf{H}_{exch}) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากปัจจัยภายนอกได้แก่ สนามแม่เหล็กภายนอก (applied field, \mathbf{H}_{app}) และสนามความร้อน (thermal field, \mathbf{H}_{th}) ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กแต่ละชนิดสามารถพิจารณาได้ดังนี้

สำหรับสนามแม่เหล็กประเภทแรกคือ ค่าสนามแอนไอโซโทรปี เป็นค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางแกนง่ายของแมกนีไทเซชัน (easy axis, \hat{e}) ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติภายในวัสดุแม่เหล็กโดยในแบบจำลองนี้ได้มีการพิจารณาการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ตามรูปแบบของฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution function) สำหรับค่าสนามแอนไอโซโทรปีที่ถูกพิจารณาเพื่อใช้ในแบบจำลองในระดับจุลภาคแบบมาตรฐาน มีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{H}_{anis} = \frac{2K}{M_s} (\hat{m}_{FM} \cdot \hat{e}) \quad (2)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก M_s คือ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization) ของวัสดุแม่เหล็ก \hat{m}_{FM} แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) หรือทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก

สำหรับค่าสนามแลกเปลี่ยน \mathbf{H}_{exch}^i ซึ่งแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันหรือเกรนแม่เหล็กที่พิจารณา i และเกรนแม่เหล็กที่อยู่ข้างเคียงกัน (nearest neighbor grains) j จะถูกพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแรงของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเกรนที่อยู่ข้างเคียงกัน (exchange field strength, f_{ij}) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย แสดงดังสมการที่ (3)

$$\mathbf{H}_{exch}^i = \sum_{i \neq j} f_{ij} (\hat{m}_x^j + \hat{m}_y^j + \hat{m}_z^j) \quad (3)$$

เมื่อ \hat{m}_x^j \hat{m}_y^j \hat{m}_z^j แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยหรือทิศทางของแมกนีไทเซชันของเกรนข้างเคียง j ในองค์ประกอบ x y และ z ตามลำดับ และค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุประเภทสุดท้ายคือค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง \mathbf{H}_{dip} ซึ่งเป็นการพิจารณาการลดทอนปริมาณสนามแม่เหล็กภายในตัววัสดุเองสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$\mathbf{H}_{dip}^i = M_s \sum_{i \neq j} \left[\frac{3(\hat{m}_j \cdot \hat{r}_{ij})\hat{r}_{ij} - \hat{m}_j}{|\hat{r}_{ij}|^3} \right] \quad (4)$$

เมื่อ \hat{m}_j คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งแสดงทิศทางของเกรนข้างเคียงและ \hat{r}_{ij} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งแสดงถึงทิศทางระหว่างเกรนที่พิจารณา i และเกรนข้างเคียงที่อยู่ติดกัน j สำหรับปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอก \mathbf{H}_{app} ที่ส่งผลต่อสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (5)

$$\mathbf{H}_{app} = \hat{a}_z \cdot \mathbf{H} \quad (5)$$

เมื่อ \hat{a}_z คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางการป้อนสนามแม่เหล็กด้วยขนาด \mathbf{H} เข้าสู่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กภายนอกชนิดสุดท้ายคือสนามความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิภายนอกที่เป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $\mathbf{H}_{ther}^i(t) = \Gamma(t)\sigma$ [19] เมื่อ σ แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ

$$\sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}} \quad \text{และ } \Gamma(t) \text{ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน}$$

อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ไม่ได้พิจารณาผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้น แบบจำลองนี้จะได้พิจารณาถึงพลังงานปฏิสัมพันธ์การแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชนิด (interlayer exchange energy) [13] เพื่อนำมาใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนโดยที่พลังงานปฏิสัมพันธ์การแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น แสดงดังสมการที่ (6)

$$E_{exch} = J_s ac \hat{m}_{FM} \cdot \hat{m}_{AF} \quad (6)$$

เมื่อ J_s คือ ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนปฏิสัมพันธ์ (interfacial exchange constant) c คือ อัตราส่วนของการเชื่อมติดกันระหว่างเกรน (contact fraction) และ \hat{m}_{AF} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงถึงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อสนามแลกเปลี่ยนที่ชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกกระทำต่อชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกสามารถพิจารณาได้จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพลังงานปฏิสัมพันธ์การแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น E_{exch} เทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก μ_{FM}^v ดังนั้นค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ \mathbf{H}_{FM-AFM} จึงมีค่าดังสมการที่ (7)

$$\mathbf{H}_{FM-AFM} = -\frac{\partial E_{exch}}{\partial \mu_F^v} = \frac{J_s c \hat{m}_{AF}}{M_s t} = H_{int} \hat{m}_{AF} \quad (7)$$

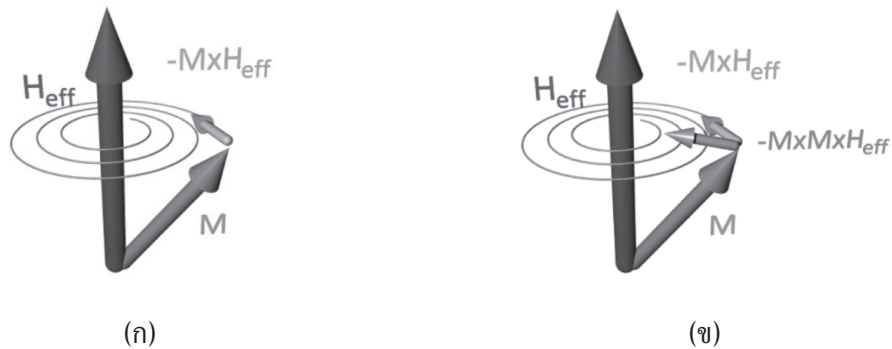
เมื่อ $H_{int} = J_s c / M_s t$ แสดงถึงขนาดความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (interlayer exchange field) ที่ชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกกระทำต่อชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก [14] ดังนั้นปริมาณสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสำหรับการจำลองปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นจึงสามารถคำนวณได้โดยการพิจารณาผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในระบบโครงสร้างวัสดุซึ่งมีค่าดังสมการที่ (8)

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{anis} + \mathbf{H}_{exch} + \mathbf{H}_{dip} + \mathbf{H}_{app} + \mathbf{H}_{th} + \mathbf{H}_{FM-AFM} \quad (8)$$

การคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะเลือกใช้แบบจำลองจุดภาคแบบมาตรฐานบนพื้นฐานการคำนวณของสมการ LLG เพื่ออธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกที่วิวัฒนาการไปตามเวลา เนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลซึ่งกระทำต่อแมกนีไทเซชัน ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1 + \alpha^2)} \left(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \alpha \left[\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \right] \right) \quad (9)$$

เมื่อ \mathbf{M} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก γ คือ ค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโร (absolute gyromagnetic ratio) และ α คือ ค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant) สมการที่ (9) เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาต่างๆ ซึ่งกำหนดให้ช่วงเวลาทีแมกนีไทเซชันเปลี่ยนแปลงทิศทาง (time step) มีค่าเท่ากับ 1×10^{-15} วินาที สมการการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันประกอบด้วยสองเทอมสำคัญ โดยเทอมแรกแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ในขณะที่เทอมที่สองแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบหน่วงเนื่องจากสนามแม่เหล็กประสิทธิผลซึ่งจะเกิดแรงบิดกระทำต่อแมกนีไทเซชันมีผลทำให้เกิดแนวโน้มที่แมกนีไทเซชันจะเคลื่อนที่และมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันทั้งสองรูปแบบแสดงดังรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเนื่องจากแรงบิดของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลแบ่งออกเป็น (ก) การเคลื่อนที่แบบหมุนวน (precession motion) และ (ข) การเคลื่อนที่แบบหน่วง (damping motion)

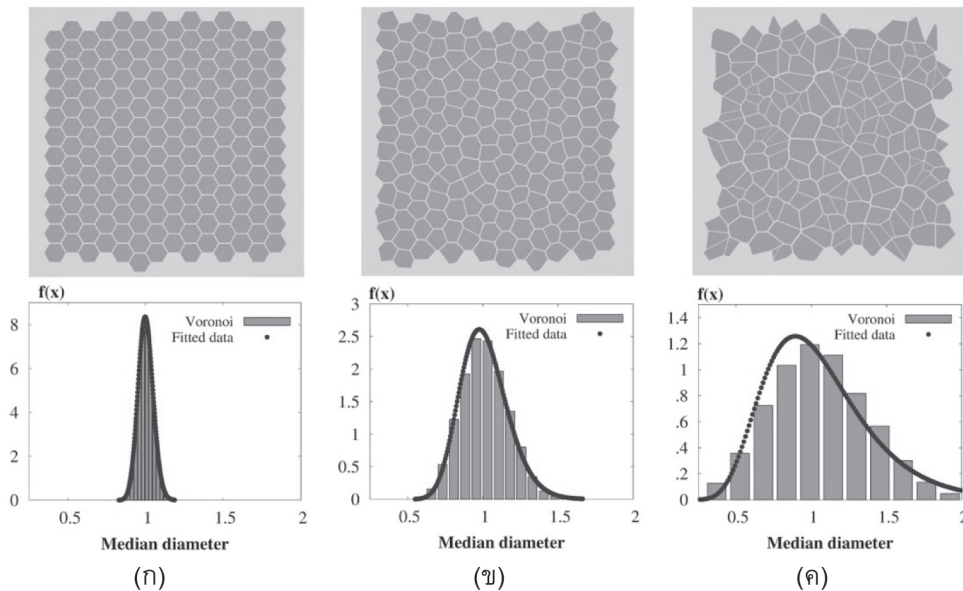
ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงผลของการจำลองโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกหรือชั้นพินซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในลำดับแรกจะได้แสดงผลการจำลองโครงสร้างโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างไวโรนอย เพื่อพิจารณาหาระบบโครงสร้างวัสดุที่มีความเสมือนจริงสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น จากนั้นจะได้อธิบายถึงผลการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างวัสดุสองชั้นเนื่องจากผลกระทบอันเนื่องมาจากระยะเวลาในการคำนวณลูปวงปิด (loop time) ขนาดของเกรนแม่เหล็ก ขนาดความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุและผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย ตามลำดับ

การออกแบบโครงสร้างเสมือนจริงของโครงสร้างวัสดุสองชั้น

เพื่อที่จะศึกษาปัจจัยของโครงสร้างที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นในชั้นพินของหัวอ่านข้อมูล สำหรับการจำลองโครงสร้างวัสดุที่มีความเสมือนจริงเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในระบบจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยรูปแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้นจะถูกออกแบบเป็นลักษณะเกรนแม่เหล็กจำนวนมาก ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมการจำลองโครงสร้างไวโรนอย โดยตำแหน่งของเกรนแม่เหล็กทั้งสองชั้นจะถูกพิจารณาให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันมีลักษณะเป็นแท่งเกรน (columnar stack) นอกจากนี้ โปรแกรมไวโรนอยยังสามารถกำหนดลักษณะการกระจายตัวของเกรนเพื่อให้มีความเสมือนจริงกับลักษณะโครงสร้างของการปลูกฟิล์มของวัสดุแม่เหล็ก โดยสามารถอธิบายได้จากฟังก์ชันการกระจายตัวแบบปกติล็อก (log normal distribution) [20] ลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนจะถูกควบคุมด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, $\sigma_{\ln D}$) โดยขนาดของเกรนแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกแสดงอยู่ในรูปของค่ากลาง (median) ของเกรนซึ่งทำให้สามารถกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่จำลองขึ้นได้ตามต้องการ

ในลำดับแรกจะแสดงลักษณะโครงสร้างแบบสองมิติที่สามารถควบคุมขนาดของเกรนและการกระจายตัวของเกรนที่มีความเหมือนจริงจากโปรแกรมโวโรนอย เพื่อนำไปสู่การกำหนดโครงสร้างเพื่อใช้ในการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนต่อไป โดยจะทำการกำหนดค่ากลางมีค่าเท่ากับ 1 และแสดงผลของการกระจายตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกันผ่านการกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_{lnD} มีค่าเท่ากับ 0.1 0.3 และ 0.5 ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างสองมิติที่มีผลของการกระจายของเกรนที่แตกต่างกัน สำหรับกรณีที่ $\sigma_{lnD} = 0.1$ แสดงดังรูปที่ 2(ก) พบว่าเกรนทุกเกรนภายในระบบจะมีขนาดเหมือน (uniform grains) ทำให้แนวโน้มการกระจายตัวค่อนข้างแคบและมีเส้นกราฟการกระจายตัวตามลักษณะของฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution function) แต่เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ $\sigma_{lnD} = 0.3$ แสดงดังรูปที่ 2(ข) จะเห็นได้ว่าลักษณะของเกรนในระบบที่ถูกออกแบบจะมีความบิดเบี้ยวและขาดความเหมือนส่งผลทำให้ขนาดของเกรนภายในระบบมีค่าแตกต่างกัน (non-uniform grains) และในลำดับสุดท้ายเมื่อทำการกำหนดให้ $\sigma_{lnD} = 0.5$ จะพบว่าขนาดของเกรนจะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน (more non-uniform grains) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2(ค) ลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเกรนจะเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้เส้นกราฟการกระจายตัวของขนาดของเกรนมีค่ามากขึ้นและอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการกระจายตัวแบบปกติสีก้นนั่นเอง



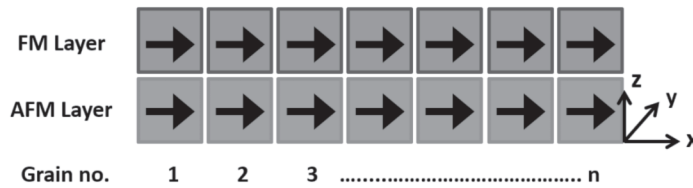
รูปที่ 2 ระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีผลการกระจายตัวของขนาดของเกรนแม่เหล็กภายในระบบแตกต่างกัน (ก) $\sigma_{lnD} = 0.1$ (ข) $\sigma_{lnD} = 0.3$ และ (ค) $\sigma_{lnD} = 0.5$ ตามลำดับ [18]

จากการจำลองโครงสร้างของเกรนแม่เหล็กโดยอาศัยโปรแกรมไวโรนอยทำให้สามารถควบคุมการกระจายตัวของขนาดของเกรนได้นั้น จำเป็นจะต้องนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดขนาดของเกรนแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ดังที่ได้อธิบายไว้ในงานวิจัยของ จูริมาตและคณะ [21] โดยพบว่าขนาดการกระจายตัวที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะมีค่าการกระจายตัวที่มีการกระจายตัวของเกรนเพียงเล็กน้อยซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้กำหนดการกระจายตัวของขนาดของเกรนให้มีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าวเพื่อกำหนดให้เกรนแม่เหล็กภายในระบบมีการกระจายตัวของขนาดของเกรนที่เหมาะสมใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

การศึกษาผลของการออกแบบโครงสร้างสองชั้นระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านรูปแบบจำลองแบบเกรนูลาร์ซึ่งเป็นการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในระดับจุลภาค ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการคำนวณคุณสมบัติแม่เหล็กทางคอมพิวเตอร์คือ การกำหนดระยะเวลาการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันที่เหมาะสมและสอดคล้องกับการทดลองซึ่งระยะเวลาที่ทำการกำหนดนี้คือระยะเวลาที่ใช้ในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิส 1 รอบ หลังจากนั้นจะทำการพิจารณาผลของโครงสร้างและปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน ได้แก่ ผลของการออกแบบขนาดของเกรนในวัสดุแม่เหล็ก ผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ในการปลูกฟิล์มของชั้นวัสดุทั้งสองและในลำดับสุดท้ายจะทำการรวมผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กทั้งสองซึ่งรูปแบบจำลองนี้จะมีความเสมือนจริงและใกล้เคียงกับการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอน (Cobalt Iron, CoFe) และอิริเดียมแมงกานีส (Iridium Manganese, IrMn) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกใช้จริงในหัวอ่านข้อมูล โดยระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ถูกใช้ในการศึกษานี้จะประกอบไปด้วยเกรนภายในระบบจำนวน 200 เกรน ซึ่งแต่ละเกรนถูกกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 8 นาโนเมตร เกรนภายในระบบที่ถูกกำหนดขึ้นนี้จะมีลักษณะการกระจายตัวซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.2 [21-22] โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุแม่เหล็ก CoFe/IrMn มีค่าเท่ากับ 10 นาโนเมตร เมื่อค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชนิดถูกกำหนดดังนี้ วัสดุแม่เหล็ก CoFe มีค่าอุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) 1300 เคลวิน ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว $M_s = 1800$ เอริกต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (emu/cc) และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี $K_{CoFe} = 1.8 \times 10^5$ เอริกต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับวัสดุแม่เหล็ก IrMn จะมีค่าอุณหภูมิวิกฤตหรืออุณหภูมิเนล (Neel temperature) $T_N = 690$ เคลวิน [11, 23] และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี $K_{IrMn} = 5.56 \times 10^6$ เอริกต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [23] ในการศึกษาเบื้องต้นจะทำการกำหนดการกระจายทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในรูปแบบที่ไม่มีมีการกระจายตัวของทิศแกนง่ายบริเวณรอยต่อ แสดงดังรูปที่ 3 โดยจะเห็นว่าแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชั้นจะมีการจัดเรียงตัวไปตามทิศแกนง่ายอย่างสมบูรณ์ตามแนวแกน +y โดยระบบจะถูกใช้พิจารณาค่าระยะเวลาในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชัน อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยของการลดขนาดของโครงสร้าง และอันตรกิริยาระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ในลำดับถัดไป

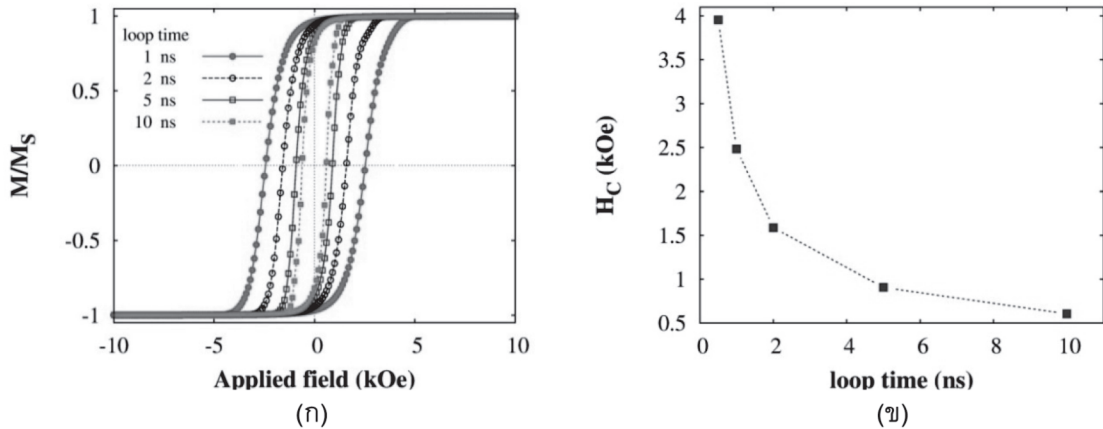


รูปที่ 3 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันที่ชั้นผิวรอยต่อโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก 2 ชั้น

1. ผลของการกำหนดระยะเวลาในการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชัน

การพิจารณาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็กภายในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะถูกแสดงอยู่ในรูปของวงปิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) โดยปัจจัยที่สำคัญสำหรับการศึกษาคูณสมบัติทางแม่เหล็กคือ ปริมาณสนามเคอเออร์ซีวิตี (coercivity field, HC) ซึ่งโดยทั่วไป พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังสนามหมุนกลับคือ ระยะเวลาเฉลี่ยในการพิจารณาผลรวมของแมกนีไทเซชันในระบบสำหรับการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิส 1 รอบ ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาเฉลี่ยในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสสำหรับระบบโครงสร้างสองชั้นที่ไม่ได้คิดผลของการแลกเปลี่ยนอันตรกิริยาระหว่างชั้นวัสดุที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะถูกพิจารณาในลำดับแรกเพื่อพิจารณาหาช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน โดยจะพิจารณาระยะเวลาที่แตกต่างกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 1×10^{-9} , 2×10^{-9} , 5×10^{-9} และ 10×10^{-9} วินาที และกำหนดให้ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุดที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบตามทิศแกนง่ายมีค่าเท่ากับ 10×10^3 เอร์สเตด และมีค่าเปลี่ยนแปลงครั้งละ 100 เอร์สเตด แสดงดังรูปที่ 4(ก)

จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาเฉลี่ยในการคำนวณวงปิดฮิสเทอรีซิสมีผลทำให้ความกว้างของวงปิดฮิสเทอรีซิสลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบขนาดของวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่ใช้ระยะเวลาเฉลี่ยในการคำนวณเท่ากับ 1×10^{-9} และ 10×10^{-9} วินาที แสดงดังรูปที่ 4(ก) และเมื่อทำการวัดค่าสนามเคอเออร์ซีวิตีจากวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ระยะเวลาเฉลี่ยต่างๆ ในรูปที่ 4(ข) พบว่าปริมาณสนามเคอเออร์ซีวิตีจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 1×10^{-9} ถึง 5×10^{-9} วินาที และมีค่าลดลงถึง 20% ที่เวลาเท่ากับ 10×10^{-9} วินาที สอดคล้องกับผลการคำนวณของ จูริมาศและคณะ [24] โดยสาเหตุการลดลงของค่าสนามเคอเออร์ซีวิตีเป็นผลเนื่องมาจากการตอบสนองของแมกนีไทเซชันต่อผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในระบบจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการวัด ซึ่งเป็นตัวกำหนดการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในระบบให้เข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) นั้นเอง อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการคำนวณของแบบจำลองด้วยซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ระยะเวลาเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 5×10^{-9} วินาที สามารถทำให้แมกนีไทเซชันในระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้กำหนดระยะเวลาเฉลี่ยในการคำนวณวงปิดฮิสเทอรีซิสให้มีค่าเท่ากับ 5×10^{-9} วินาที เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการทดลองและลดระยะเวลาในการคำนวณของแบบจำลองนั่นเอง



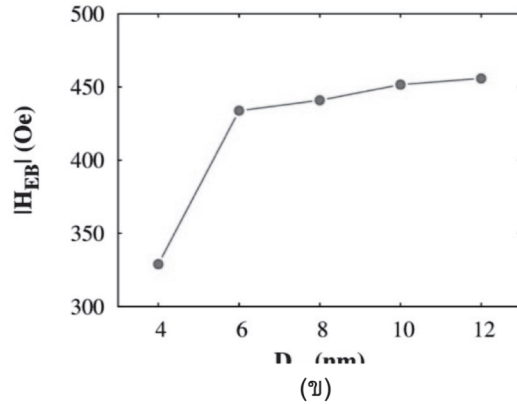
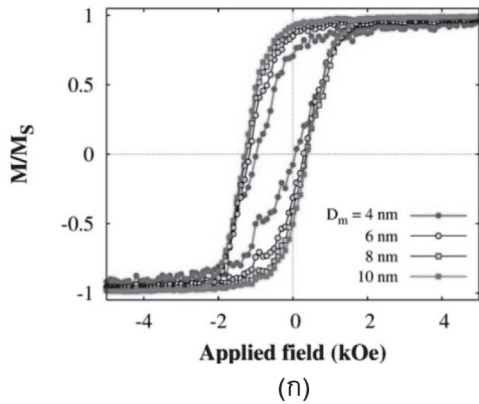
รูปที่ 4 (ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาเฉลี่ยในการวัดและ (ข) ค่าคอเออร์ซิวิตีที่ระยะเวลาเฉลี่ยต่างๆ

2. ผลกระทบของขนาดของเกรนที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

เมื่อสามารถกำหนดระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนและวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสรวมไปถึงเงื่อนไขในการทดลองได้แล้ว ในลำดับต่อไปจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบดังกล่าวเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ส่งผลทำให้คุณสมบัติพื้นฐานทางแม่เหล็ก ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาผลกระทบของขนาดของเกรนเฉลี่ย เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของระบบ ในกรณีศึกษานี้ได้กำหนดให้ปริมาณความแรงของสนามแลกเปลี่ยนหรือค่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนและวัสดุแม่เหล็กอิริเดียมแมงกานีสมีค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น $H_{int} = 500$ เอสเตด (Oersted, Oe) และผลกระทบของขนาดของเกรนเฉลี่ยต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงปิดฮิสเทอรีซิสจะถูกพิจารณาในช่วงอุณหภูมิห้อง 300 เคลวิน และขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่าตั้งแต่ 4 นาโนเมตรถึง 12 นาโนเมตร โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 นาโนเมตร

รูปที่ 5(ก) แสดงลักษณะลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างที่มีผลของค่าขนาดของเกรนที่แตกต่างกันโดยพบว่าลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสของทุกระบบมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรไปด้านซ้ายมือตามแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอก สาเหตุเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่าผลกระทบของขนาดของเกรนจะมีผลทำให้รูปร่างของวงปิดฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างกันและระยะที่เลื่อนออกไปจากแกนสมมาตรโดยเกรนที่มีขนาดเล็ก 4 นาโนเมตร จะมีการเลื่อนออกจากแกนสมมาตรน้อยที่สุด ในทางตรงกันข้ามพบว่าขนาดของเกรนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 10 นาโนเมตร จะมีการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสได้ไกลที่สุด โดยทั่วไปการเลื่อนออกจากแกนสมมาตรจะแสดงถึงความแรงในการยึดทิศทางแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกไม่ให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางนั่นเองหรือสามารถอธิบายอยู่ในรูปของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (H_{EB}) ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่วัดจากแกนสมมาตรไปยังจุดกึ่งกลาง

ของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส สามารถคำนวณได้จาก $H_{EB} = (H_- + H_+)/2$ [7] เมื่อ H_- และ H_+ คือ ค่าเคอเออร์ซิวิตีที่วัดทางด้านซ้ายและขวาของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส ตามลำดับ



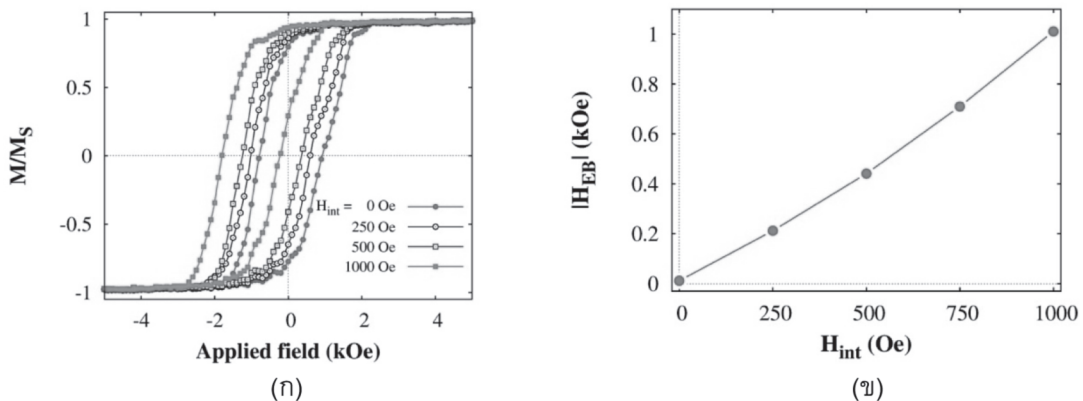
รูปที่ 5 (ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่าตั้งแต่ 4 นาโนเมตรถึง 10 นาโนเมตรและ (ข) ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ขนาดของค่า D_m มีค่าแตกต่างกัน

รูปที่ 5 (ข) แสดงค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเฉลี่ยซึ่งพบว่าขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็กค่า H_{EB} จะมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 325 เอสเตด ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูงขึ้น ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนจะมีค่าสูงมากขึ้นและมีค่าเริ่มคงที่ ผลการศึกษาให้ผลที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและผลการทดลองในการวัดค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนต่อผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง [10] ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับพลังงานอุปสรรค (energy barrier) เนื่องจากอันตรกิริยาของชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าแปรผันตาม $E_{AF} \propto K_{AF} V_{AF}$ เมื่อ K_{AF} แทน ค่าคงที่เอนไอโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก และ V_{AF} คือปริมาตรของเกรนแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่มีค่าเท่ากับผลคูณของขนาดของเกรนเฉลี่ย D_m และความหนาของชั้นฟิล์ม t_{AF} ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนที่มีค่าน้อยจึงส่งผลให้ปริมาตรของระบบลดลงและส่งผลให้ค่าพลังงานอุปสรรคมีค่าน้อยซึ่งจะส่งผลต่อการรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันได้น้อยเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่ต่ำ ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการลดลงของขนาดของเกรนที่มีขนาดเล็กมากจะส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพทางความร้อน เนื่องจากพลังงานอุปสรรคที่รักษาทิศทางในชั้นอ้างอิงมีค่าต่ำเกินไป ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของเกรนที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มความเสถียรทางความร้อนแต่เมื่อทำการเพิ่มขนาดของเกรนถึงจุดหนึ่งจะพบว่าผลของการเพิ่มขนาดของเกรนจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนนั่นเอง ดังนั้นการลดขนาดของเกรนในหัวอ่านเพื่อตอบสนองต่อการลดขนาดที่เล็กลงของอุปกรณ์ในหัวอ่านข้อมูลจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความเสถียรทางความร้อนและมีการเลือก

ขนาดของเกรนที่เหมาะสมนั่นเอง

3. ผลกระทบของค่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงระหว่างชั้นที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ปัจจัยอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินของหัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์คือผลของความราบเรียบที่ผิวรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งมีผลต่อค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับการพิจารณาปัจจัยนี้ผ่านรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ระดับจุลภาคจะทำการพิจารณาผ่านพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ปริมาณสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงระหว่างชั้น H_{int} ซึ่งใช้แสดงถึงความแรงของสนามแม่เหล็กที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกใช้ในการบังคับทิศทางหรือควบคุมลักษณะการผันกลับของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกนั่นเอง โดยในการศึกษานี้จะทำการจำลองลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาทั้ง 2 ชั้น ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา โดยทำการศึกษาผลเนื่องจากปริมาณสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงระหว่างชั้นแม่เหล็กทั้งสองซึ่งจะทำการกำหนดความแรงของ H_{int} มีค่าตั้งแต่ 0, 250, 760 และ 1000 เออร์สเตด



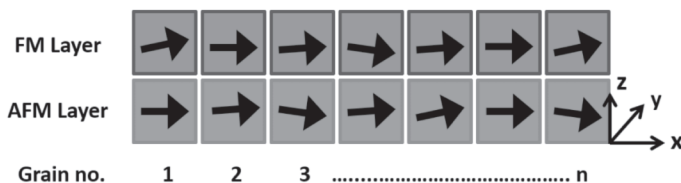
รูปที่ 6 (ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงระหว่างชั้นและ (ข) ขนาดของค่า H_{EB} ที่สามารถคำนวณได้จากวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า H_{int}

ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสในกรณีที่ค่า H_{int} มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 0-1000 เออร์สเตด เพื่อคำนวณหา H_{EB} ที่เหมาะสมและสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดขนาดของค่า H_{EB} ได้จริง แสดงดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีความสมมาตรและไม่มีการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอกในกรณีที่ไม่ได้คิดผลของค่า H_{int} กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยึดทิศทางของชั้นแมกนีไทเซชันในชั้นเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จะมีลักษณะคล้ายกับลูปวงปิดของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเพียงชั้นเดียว ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มค่าปริมาณสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง H_{int} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของวงปิดฮิสเทอรีซิสจะมีแนวโน้มที่เลื่อนออกจากแกนสมมาตร

เพิ่มสูงขึ้น แต่ขนาดความกว้างของวงปิดฮิสเทอรีซิสยังคงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง สาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มค่า H_{int} ส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติกกับชั้นเฟอร์โรแมกเนติกที่สูงขึ้นทำให้การเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นเฟอร์โรแมกเนติกเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นถ้าต้องการวัดลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสจำเป็นต้องใช้ปริมาณสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูงขึ้นเพื่อที่เอาชนะอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นแม่เหล็กทั้งสอง เนื่องจากปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกเกิดการหมุนกลับทิศทางตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกได้ โดยรูปที่ 6(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} กับปริมาณสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้น H_{int} พบว่าค่า H_{EB} จะมีค่าเป็น 0 เนื่องจากไม่เกิดการเลื่อนของลูปวงปิดและเมื่อทำการเพิ่มค่า H_{int} จะส่งผลให้ H_{EB} มีค่าสูงถึง 1000 เออร์สเตด ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี

4. ระบบที่พิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย

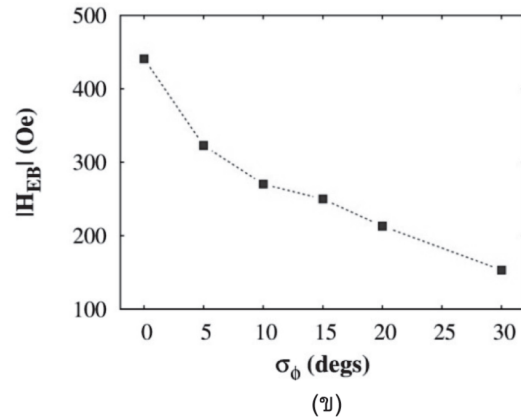
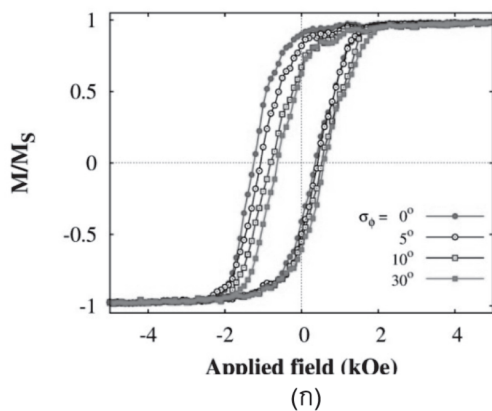
เพื่อความสมบูรณ์ของรูปแบบจำลองแบบแกรนูลาร์ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบจำลองให้มีความเสมือนจริง ตามลักษณะการปลูกฟิล์มบางของชั้นวัสดุแม่เหล็ก 2 ชั้น ซึ่งจากความไม่สมบูรณ์ของชั้นรอยต่อนี้จะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยทั่วไปรูปแบบจำลองจะทำการกำหนดให้ลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบสมบูรณ์หรือไม่เกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่าย แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาผลของการกระจายตัวโดยกำหนดให้แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีการจัดเรียงทิศทางไปในแนวแกน $+y$ และมีการกระจายตัวรอบทิศแกนง่ายในระนาบ xy แสดงดังรูปที่ 7 เนื่องจากอัตราการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก [15-16, 21]



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเกิดการกระจายตัวของแมกนีไทเซชันที่ชั้นผิวรอยต่อโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก 2 ชั้น

สำหรับการพิจารณาผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็ก จะทำการพิจารณาการกระจายตัวตามรูปแบบฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนซึ่งสามารถกำหนดมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่าย σ_ϕ ได้ดังที่อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ แบบจำลองทางแม่เหล็กแบบแกรนูลาร์ โดยระบบจะทำการกำหนดโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็ก CoFe/IrMn ตามรายละเอียดข้างต้นและพิจารณาผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายโดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่า σ_ϕ มีค่า 0, 5, 10 และ 30 องศา จากการพิจารณาผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายต่อปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน รูปที่ 8(ก) ซึ่งแสดงลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิสต่อผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายพบว่า สำหรับกรณีที่ไม่นับผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายลักษณะของลูปวงปิดมีการเลื่อนออกจากทิศแกนง่ายมากที่สุด ในขณะที่เมื่อ

ทำการเพิ่มค่า σ_ϕ ให้มีค่าสูงขึ้นพบว่าลักษณะการเลื่อนของลูปวงปิดมีการเลื่อนเข้าหาแกนสมมาตรหรือไม่เกิดการเลื่อนของลูปวงปิดฮิสเทอรีซิส นอกจากนี้สามารถแสดงผลของค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนกับผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายได้ดังรูปที่ 8 (ข) โดยพบว่าค่า H_{EB} มีค่าสูงที่สุดที่ 450 เอร์สเตด ในขณะที่เมื่อเพิ่มค่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเป็น $\sigma_\phi = 30$ องศา พบว่าค่า H_{EB} มีค่าลดลงถึง 60% เทียบกับระบบที่ไม่พิจารณาผลของการกระจายของทิศแกนง่าย $\sigma_\phi = 0$ องศา สาเหตุการลดลงของค่า H_{EB} เนื่องมาจากการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีผลทำให้ผลรวมของแมกนิไทเซชัน (net magnetisation) ในชั้นดังกล่าวซึ่งทำหน้าที่ในการบังคับทิศทางของแมกนิไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าลดลงตามไปด้วย [15-16] นอกจากนี้ผลของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายมีผลต่อการลดลงของปริมาณ เคอเออร์ซีวิตี ตามทฤษฎี Stoner-Wohlfarth [25] ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการลดค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นและในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล



รูปที่ 8 (ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีแมกนิไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกถูกกำหนดให้มีการกระจายตัวตั้งแต่ 0 องศาถึง 30 องศาและ (ข) ค่า H_{EB} ที่มุมการกระจายตัวมีค่าต่างๆ

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนารูปแบบจำลองระดับจุลภาคแบบมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการศึกษาพลศาสตร์ของแมกนีไทเซชันที่ส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนและอิริเดียมแมกนีต ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ปัจจัยที่สำคัญซึ่งเป็นตัวกำหนดพลศาสตร์ของแมกนีไทเซชันภายในระบบทั้งที่เป็นลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติภายในวัสดุแม่เหล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบของการปลูกฟิล์มแม่เหล็กได้รับการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการทางฟิสิกส์ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไปในอนาคต โดยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกใช้ในการอธิบายพลศาสตร์ของแมกนีไทเซชันโดยอาศัยสมการ LLG ที่สามารถพิจารณาผลของค่าสนามแม่เหล็กภายในตัววัสดุแม่เหล็กเองและค่าสนามแม่เหล็กภายนอกรวมทั้งสนามแม่เหล็กระหว่างชั้นวัสดุที่กำหนดผลของการเกิดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนหรือปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนของระบบโดยอาศัยแบบจำลองในระดับจุลภาคซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขนี้จะช่วยให้สามารถเข้าใจกระบวนการทางฟิสิกส์ได้อย่างแม่นยำซึ่งนำไปสู่การพัฒนาและเพิ่มศักยภาพของหัวอ่านข้อมูล

การคำนวณพลศาสตร์ของแมกนีไทเซชันโดยอาศัยแบบจำลองระดับจุลภาคแบบมาตรฐาน พบว่าปัจจัยที่ถูกเลือกมาพิจารณาได้แก่ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ขนาดของเกรนเฉลี่ยและปริมาตร H_{int} เป็นต้นแล้วแต่ส่งผลกระทบบ่อยมากต่อคุณสมบัติของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นและปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยพื้นฐานเหล่านี้สำหรับการพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันในระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก นอกจากนี้ ยังพบว่าการลดลงของค่า H_{EB} ในระบบที่พิจารณาผลของการกระจายตัวเท่ากับ 30 องศา มีค่ามากถึง 60% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่พิจารณาผลการกระจายตัวของทิศแกนง่าย โดยสาเหตุการลดลงของค่า H_{EB} เนื่องมาจากการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกมีผลทำให้ปริมาณแมกนีไทเซชันสุทธิในชั้นดังกล่าว ซึ่งทำหน้าที่ในการบังคับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าผลการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า H_{EB} ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาลำสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนในระบบวัสดุแม่เหล็กสองชั้นเพื่อนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไปในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

1. Tham, K. K., Kushibiki, R., Kamada, T., Hinata, S., & Saito, S. (2018). Ru alloy-oxide buffer layer for intergranular exchange decoupling of CoPt-B₂O₃ granular media. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(2), 1-4.
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. Chureemart, J., Chureemart, P., Evans, R., Chantrell, R. W., & O'Grady, K. (2011). Magnetic orientation in advanced recording media. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(45), 455002.
4. Chureemart, J., Lari, L., Nolan, T. P., & O'Grady, K. (2013). The effect of SiO₂ content on activation volumes in exchange coupled composite media. *Journal of Applied Physics*, 114(8), 083907.
5. Barry, J. R., Vasić, B., Khatami, M., Bahrami, M., Nakamura, Y., Okamoto, Y., & Kanai, Y. (2016). Optimization of bit geometry and multi-reader geometry for two-dimensional magnetic recording. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(2), 1-7.
6. Meiklejohn, W. H., & Bean, C. P. (1956). New magnetic anisotropy. *Physical Review*, 102(5), 1413.
7. Kiwi, M. (2001). Exchange bias theory. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 234(3), 584-595.
8. 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.
9. Néel, L. (1949). Théorie du Traénage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites. *Annales geophysicae*, 5, 99-136.
10. 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.
11. 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.
12. Vallejo-Fernandez, G., Aley, N. P., Fernandez-Outon, L. E. & O'Grady, K. (2008). Control of the setting process in CoFe/IrMn exchange bias systems. *Journal of Applied Physics*, 104(3), 033906.

13. Choo, D., Chantrell, R. W., Lambertson, R., Johnston, A., & O'Grady, K. (2007). A model of the magnetic properties of coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers. *Journal of Applied Physics*, 101(9), 09E521.
14. Craig, B., Lambertson, 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. Geshev, J., Nicolodi, S., Pereira, L. G., Schmidt, J. E., Skumryev, V., Suriñach, S., & Baró, M. D. (2008). Impact of magnetization easy-axis distributions on the ferromagnet-antiferromagnet exchange-coupling estimation. *Physical Review B*, 77(13), 132407.
16. Hu, Y., Wang, X., Jia, N., Liu, Y., & Du, A. (2015). Effect of misaligned unidirectional and uniaxial anisotropies on angular dependence of exchange bias. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 388-393.
17. Fernandez-Outon, L. E., Vallejo-Fernandez, G., Manzoor, S., & O'Grady, K. (2006). Thermal instabilities in exchange biased materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 303(2), 296-301.
18. Chureemart, P., Chureemart, J., & Chantrell, R. W. (2016). Model of advanced recording media: The angular dependence of the coercivity including the effect of exchange interaction. *Journal of Applied Physics*, 119(6), 063903.
19. Brown, W. F. (1963). Thermal fluctuations of a single-domain particle. *Physical Review*, 130(5), 1677.
20. O'grady, K., & Bradbury, A. (1983). Particle size analysis in ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 39(1-2), 91-94.
21. Chureemart, J., Chureemart, P., Pressesky, J., Nolan, T., & O'Grady, K. (2013). Media design and orientation in perpendicular media. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 3592-3595.
22. Aley, N. P., Kroeger, R., Lafferty, B., Agnew, J., Lu, Y., & O'Grady, K. (2009). Tuning of anisotropy in IrMn/CoFe exchange bias systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 3869-3872.
23. Barker, J., Craig, B., Lambertson, 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.
24. Saengmart, O., Daeng-am, W., Chureemart, P., & Chureemart, J. (2017). The effect of media design in advanced recording media by the atomistic spin dynamics simulation. *Srinakharinwirot Science Journal*, 33(2), 86-106. (in Thai)
25. Stoner, E. C., & Wohlfarth E. P. (1948). A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 240, 599-642.

