



## เทคนิคการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูล แบบตั้งฉาก ตอนที่ 1

### A Technique of the Easy Axis Distribution Measurement in Perpendicular Recording Media Part I

เจษฎา จูรีมาศ

หน่วยวิจัยการคำนวณและการทดลองด้านแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม 44150

E-mail: jessada.c@msu.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะนำเสนอเทคนิคการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นความจุของแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กซึ่งมีค่าสูงถึง 1 เทระบิต/ตารางนิ้ว โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การวัดการเบี่ยงเบนของรูปร่างผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการวัดเส้นโค้งเอ็กซ์เรย์ร็อกกิ้ง (X-ray rocking curve) และ การวัดทางแม่เหล็ก (magnetic measurement) โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของทิศแกนง่ายคือผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนและปริมาณแม่เหล็กสถิตซึ่งจะไม่ถูกรวมเข้าไปในการวัดด้วยวิธีการเบี่ยงเบนของโครงสร้างผลึก ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายคือ วิธีการวัดทางแม่เหล็กซึ่งสามารถรวมผลทั้งสองส่วนนั่นเอง ในช่วงแรกการวัดการเปลี่ยนแปลงค่ารีมานนท์จะถูกนำมาใช้สำหรับการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบเดิมหรือแบบขนาน แต่พบว่าผลของสนามหักล้างปริมาณมากซึ่งมีผลต่อสนามแม่เหล็กภายนอกยกต่อการคำนวณให้ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าเค-ออร์ซิวิตีจึงได้ถูกเสนอขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการวัดการกระจายตัวเนื่องจากที่จุดนี้สนามหักล้างจะมีค่าเป็นศูนย์

#### ABSTRACT

This paper is to purpose the technique for the measurement of the easy axis distribution of perpendicular recording media (PRM) which is capable of supporting a high areal density of 1 Tbit/in<sup>2</sup>. The several techniques which have been investigated the distribution can

be separated into 2 methods by the crystallography texture using X-ray rocking curve and the magnetic measurement. The important factors affecting the easy axis distribution are exchange interactions and magnetostatic which are not evident in the variation of crystalline technique. Hence, the magnetic measurement is preferred for the measurement of easy axis distribution. In the past, the traditional remanence method used to measure the distribution for longitudinal recording media has been applied for PRM. But this method cannot be used due to the effect of large demagnetising field which is the most difficult to correct. Therefore, the variation of coercivity technique has been proposed to measure the easy axis distribution. The advantage of this technique is that the large demagnetising field is zero at the coercivity.

**คำสำคัญ:** การกระจายตัวทิศแกนง่าย รีมาเนนซ์ เคออร์ซิวิตี สนามหักล้าง

**Keywords:** Coercivity, Demagnetising, Easy axis distribution, Field, Remanence

## บทนำ

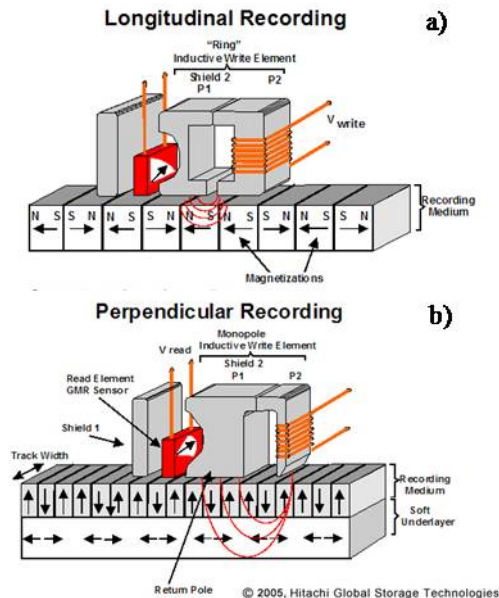
ตลอดระยะเวลากว่า 60 ปี หลังจากได้มีการผลิตอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording media) หรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ขึ้นมาใช้ในการเก็บข้อมูลเป็นครั้งแรก พบว่าอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้ความต้องการที่ลดขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การเพิ่มความหนาแน่นความจุของข้อมูล (areal density) และ ราคาที่ถูกลง ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูล (recording media) กันอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการวิเคราะห์ทางแม่เหล็ก (magnetic characterization) ของแผ่นบันทึกข้อมูลถือว่าเป็นส่วนสำคัญในการทดสอบประสิทธิภาพทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูล โดยช่วงเริ่มต้นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่าข้อมูลจะถูกบันทึกลงบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยอาศัยทิศทางของแมกนีไทเซชัน (magnetisation) ซึ่งมีทิศขนานกับแผ่นบันทึกข้อมูลในการเก็บข้อมูลดังรูปที่ 1a) โดยเรียกว่าแผ่นบันทึกข้อมูลแบบขนาน (longitudinal recording media) และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแผ่นบันทึก

ข้อมูลโดยให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันมีทิศตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูลดังรูป 1b) ซึ่งเรียกว่าแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (Iwasaki and Takemura, 1975) (perpendicular recording media) การเปลี่ยนทิศของแมกนีไทเซชันมีส่วนสำคัญต่อการลดขนาดของบิท (bit size) (Varghaese et.al, 2014) ในการเก็บข้อมูลซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความหนาแน่นความจุในแผ่นบันทึกข้อมูล (Piramanayagam, 2007; Piramanayagam and Srinivasan, 2009)

การพัฒนาแผ่นบันทึกข้อมูลในภาคอุตสาหกรรมโดยการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันจากแบบขนานไปยังแบบตั้งฉากนำไปสู่ปัญหาในการวิจัยเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางแม่เหล็กพื้นฐานของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ (O' Grady, 1990; Chantrell and O' Grady, 1992) เช่น การวัดลูฟฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) การกระจายตัวของสนามหมุนกลับ (switching field distribution) การวัดเส้นโค้งของรีมาเนนซ์ (remanence curve) และ การกระจายตัวของทิศแกนง่าย (easy axis distribution) เป็นต้น สาเหตุหลัก

เนื่องมาจากการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันให้มีทิศตั้งฉากนำไปสู่การเกิดสนามแม่เหล็กหักล้างตัวเอง (Wu et al., 2002) (self-demagnetizing field,  $H_D$ ) ขนาดสูงซึ่ง  $H_D$  มีค่าแปรผันตามแมกนีไทเซชัน  $H_D = -4\pi M$  จากผลของปริมาณ  $H_D$  จะส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำในการวัดสนามแม่เหล็กภายนอก

ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่จำเป็นต้องการการวิเคราะห์คุณลักษณะทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่สามารถกำจัดผลที่เกิดจาก  $H_D$  เพื่อทราบถึงคุณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ต้องการ



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของแผ่นบันทึกข้อมูล a) แบบขนาน b) แบบตั้งฉาก (Hitachi, 2005)

การเพิ่มประสิทธิภาพ (recording performance) ของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก ตัวแปรที่สำคัญคือทิศทางของแมกนีไทเซชันจะต้องมีทิศตั้งฉากกับแผ่นบันทึกข้อมูลอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการเบี่ยงเบนทิศทางของแมกนีไทเซชันเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้สนามหมุนกลับ (switching field) มีค่าลดลงอย่างมาก เช่น ถ้าทิศทางของแมกนีไทเซชันเบี่ยงเบนออกจากแกนตั้งฉากเป็นมุมเพียง 10 องศาจะส่งผลให้สนามหมุนกลับลดลงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ตามทฤษฎีของสโตนเนอร์และวูล์ฟาร์ท (Stoner-Wolhfarth theory) (Stoner and Wolhfarth, 1948) ดังนั้นการ

กระจายตัวของทิศแมกนีไทเซชันจะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นของสนามหมุนกลับในแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งเป็นสาเหตุหลักต่อการลดสัญญาณ SNR (signal to noise ratio) (Papusoi et al., 2002; Varghese et. Al, 2014) นำไปสู่การลดประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูล

สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงนิยามของทิศแกนง่าย ความสำคัญและจุดกำเนิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากในตอนต้นที่ 1 ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของสนามหมุนกลับในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่งผลต่อการลด

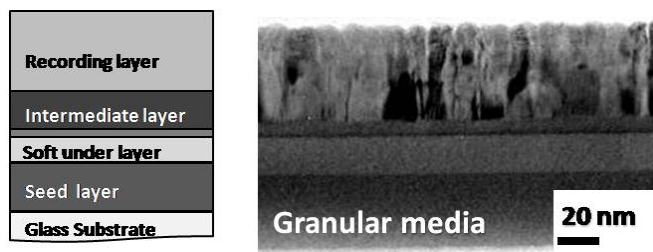
ประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในภาคอุตสาหกรรมการผลิต นำไปสู่การนำเสนอวิธีการวัดของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายซึ่งสามารถแบ่งวิธีการวัดออก 2 วิธี คือ การวัดด้วยวิธีผลึกวิทยา และการวัดด้วยวิธีทางแม่เหล็กในตอนต้นที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และสุดท้ายจะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการใช้วิธีการวัดแบบทางแม่เหล็กแบบดั้งเดิมและการนำเสนอเทคนิคการวัดแบบใหม่โดยสามารถกำจัดผลของสนามหักล้างซึ่งเป็นปัญหาหลักสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม ส่วนขั้นตอนและวิธีการวัดอย่างละเอียดจะถูกล่ามถึงในตอนต่อไป

### 1. การกระจายตัวของทิศแกนง่าย

ทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุแม่เหล็กพบว่ามีผลต่อความสำคัญต่อการเกิดสภาพค้ำแม่เหล็กและมีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก (susceptibility) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของวัสดุ เช่น โคบอลต์ (Co) ซึ่งมีโครงสร้างแบบ hcp พบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศ [0001] หรือทิศ *c*-axis จะมีผลทำให้วัสดุสามารถเข้าสู่จุดอิ่มตัว (saturation

point) ได้รวดเร็วเพียงให้สนามภายนอกเพียงเล็กน้อย โดยจะเรียกทิศทางนี้ว่า ทิศแกนง่าย (easy direction) ในขณะที่ให้สนามภายนอกในทิศ [1010] พบว่าวัสดุจะไม่สามารถเข้าสู่จุดอิ่มตัวได้แม้ว่าจะให้สนามแม่เหล็กภายนอกมากเพียงใดก็ตามและไม่แสดงสภาพค้ำแม่เหล็กโดยเรียกทิศทางนี้ว่า ทิศแกนยาก (hard axis) ซึ่งคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างวัสดุจะเรียกว่า ผลของแอนไอโซโทรปีผลึก (crystal anisotropy)

สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมจะประกอบด้วยชั้นฟิล์มหลายชั้นเพื่อใช้ในการควบคุมทิศแกนง่ายของชั้นเก็บข้อมูล (recording layer, RL) ให้มีตั้งฉากกับผิวฟิล์มอย่างสมบูรณ์ โดยรูปที่ 2 (Chureemart et al., 2013) แสดงโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ใช้จริงซึ่งประกอบด้วยชั้นที่สำคัญได้แก่ชั้นเก็บข้อมูลซึ่งวัสดุที่ถูกเลือกใช้คือ CoCrPt-SiO<sub>2</sub> โดยมีทิศแกนง่ายคือ Co [0001] และชั้น intermediate layer ซึ่งเป็นชั้นที่กำหนดทิศทางการปลูกผลึกในชั้น RL ให้ทิศ Co [0001] มีทิศตั้งฉากอย่างสมบูรณ์กับระนาบของแผ่นฟิล์ม



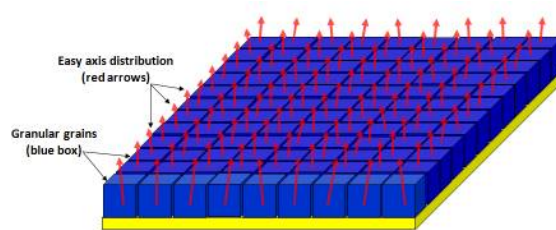
รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างและภาพตัดขวาง TEM ของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิม (Chureemart et al., 2013)

จากความไม่สมบูรณ์ของการปลูกผลึกและการเบี่ยงเบนของโครงสร้างในชั้นฟิล์มรวมถึงผลที่เกิด

จากอันตรกิริยาแลกเปลี่ยน (exchange interaction) และ ผลของปริมาณแม่เหล็กสถิตของแมกนีไทเซชันที่

เกิดขึ้นขณะให้สนามภายนอกหรือขบวนการเขียนข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูล สามารถก่อให้เกิดการเบี่ยงเบนของทิศแกนง่ายในแผ่นบันทึกข้อมูลหรือเรียกว่า

การกระจายตัวของทิศแกนง่าย (easy axis distribution) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูล

จากการกระจายตัวของทิศแกนง่ายจะส่งผลให้เกิดการลดประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นคือการเกิดการกระจายตัวของสนามหมุนกลับหรือสนามเขียน (switching field distribution) สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีพลังงานกีดกัน (energy barrier,  $\Delta E$ ) คือพลังงานที่จะพยายามรักษาทิศทางของแมกนิไทเซชันไม่ให้มีเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามภายนอก (Cullity and Graham, 2009)

$$\Delta E = K_U V \left( 1 - \frac{H}{H_K} \right)^2 \quad (1)$$

เมื่อ  $V$  คือ ขนาดปริมาตรของเกรน  $H$  คือ สนามภายนอก และ  $H_K$  คือสนามเอนไอโซโทรปี จะเห็นว่าเมื่อให้สนามเขียนเท่ากับสนามเอนไอโซโทรปีพลังงานกีดกันจะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งส่งผลให้แมกนิไทเซชันสามารถเปลี่ยนทิศทางและนำไปสู่การเกิดขบวนการเขียนข้อมูล (writing process) ขึ้นในแผ่นบันทึกข้อมูล ในกรณีอุดมคติพบว่าค่าสนามเอนไอโซโทรปีจะมีค่าเท่ากับ  $2K_U/M_S$  เมื่อ  $M_S$  คือแมกนิไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetisation) แสดงว่าสนามหมุนกลับหรือสนามเขียนจะมีเพียงค่าเดียวนั่นเอง แต่พบว่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าพลังงานกีดกัน เช่น ความไม่

คงที่ของค่าคงที่เอนไอโซโทรปี  $K_U$  เนื่องจากข้อบกพร่องของการปลูกฟิล์ม ผลของการกระจายตัวของปริมาตรและการกระจายตัวของทิศแกนง่าย เป็นต้น แต่พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความไม่คงที่ของพลังงานกีดกันหลักคือ การกระจายตัวของทิศแกนง่าย ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสนามเอนไอโซโทรปีมีค่าไม่คงที่โดยมีค่าเท่ากับ

$$H_K = \frac{\alpha K_U}{M_S} \quad (2)$$

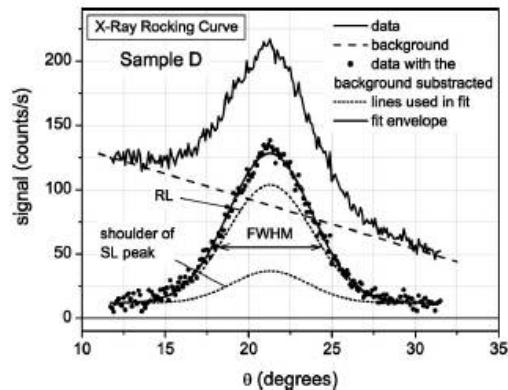
เมื่อ  $\alpha$  คือปัจจัยเนื่องมาจากการกระจายตัวของทิศแกนง่ายมีค่าตั้งแต่ 0.96 ถึง 2 (Luborsky, 1961) ซึ่งส่งผลให้ค่า  $H_K$  ไม่คงที่ทำให้สนามเขียนมีหลายค่าหรือการกระจายตัวของสนามเขียน นำไปสู่การลดประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากจากผลจากการกระจายของทิศแกนง่ายเพียงมุลเล็กน้อยจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสนามเขียนปริมาณมาก (Stoner and Wolthfarth, 1948) ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องทำการทดสอบการกระจายตัวของทิศแกนง่ายเพื่อวิเคราะห์ลักษณะความกว้างหรือแคบของการกระจายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลสูงสุคนั่นเอง

## 2. การวัดค่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายวิทยา

สำหรับการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีการวัดการกระจายตัวเป็นจำนวนมากซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 วิธีคือ การพิจารณาจากลักษณะของรูปร่างผลึกวิทยา (crystallographic texture) และ วิธีการวัดทางแม่เหล็ก (magnetic measurement)

สำหรับวิธีการวัดรูปร่างผลึกวิทยาจะเป็นการเทียบเคียงลักษณะการกระจายตัวของทิศแกนง่ายกับการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของฟิล์ม โดยพิจารณาจากการวัดด้วยวิธี X-ray rocking curve ซึ่งอาศัยหลักการ

พื้นฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในวัสดุ โดยจะทำการกำหนดมุมของรังสีเอกซ์ ที่แน่นอนเพื่อทราบลักษณะระนาบของโครงสร้าง (hkl) ที่ต้องการโดยวัสดุแม่เหล็กในแผ่นบันทึกข้อมูลคือ  $\text{CoCrPt-SiO}_2$  จะมีมุม  $2\theta = 44^\circ$  สำหรับระนาบของโครงสร้าง (0001) ในทิศตั้งฉาก เมื่อความยาวคลื่น  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  เพื่อที่จะทำการวัดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างผลึก วัสดุจะทำการโยกหรือเคลื่อนที่ไปมาที่มุมแคบเพื่อทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการทดลองการวัดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (Wu et al., 2004) ด้วยวิธี X-ray rocking curve



รูปที่ 4 ลักษณะตัวอย่างผลการทดลองการเบี่ยงเบนโครงสร้างด้วยวิธี X-ray rocking curve (Voznyuk et al., 2005)

จากผลการทดลองจะแสดงผลระหว่างความเข้มของการเลี้ยวเบน (diffraction intensity) และมุมที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถวิเคราะห์ความกว้างของการกระจายตัวของทิศแกนง่ายได้จากการวัดของความกว้างเต็มที่ครึ่งสูงสุด (full width half maximum, FWHM) ของความเข้มของการเลี้ยวเบน ซึ่งค่ามุมที่วัดได้จาก FWHM ( $\sim 6.1^\circ$ ) เทียบเท่ากับการกระจายตัวของทิศแกนง่ายในแผ่นบันทึกข้อมูล

## 3. เทคนิคการวัดด้วยวิธีทางแม่เหล็กแบบดั้งเดิม

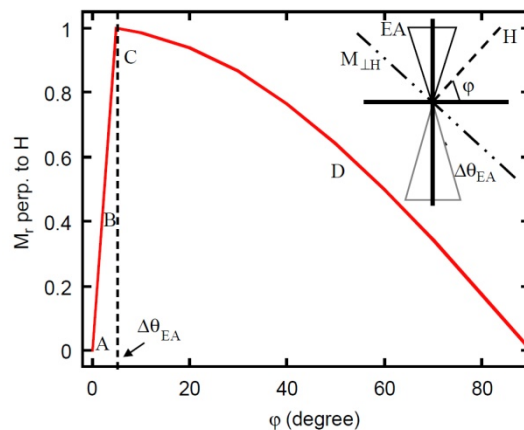
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายนอกจากผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (crystal texture) แล้วผลที่เกิดจากอันตรกิริยาทางแม่เหล็กก็ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่ง เช่น อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนและปริมาณแม่เหล็กสถิต (intergranular magnetostatic) ระหว่างเกรน

วัสดุแม่เหล็ก ซึ่งปริมาณทั้งสองจะไม่ถูกรวมในการวัดด้วยวิธี X-ray rocking curve เนื่องจากเป็นการศึกษาเฉพาะความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการวัดด้วยวิธีการทดลองทางแม่เหล็กจึงน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากเนื่องจากได้รวมผลทางแม่เหล็กเข้าไปด้วย

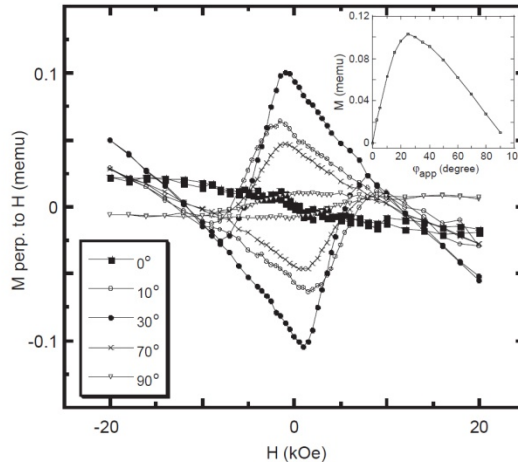
สำหรับวิธีการวัดทางแม่เหล็กที่ผ่านมาพบว่าได้มีการเสนอวิธีการวัดทั้งทางทฤษฎีและการทดลองจำนวนมากเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (Voznyuk et al., 2005; Wu et al., 2004; Wu et al., 2006; Carter et al., 2008; Chantrell et al., 2000; Lee et al., 2011.; Plumer et al., 2014) โดยวิธีแบบดั้งเดิมจะอาศัยเทคนิคการวัดค่ารีมานนซ์ (remanence technique,  $M_R$ ) (Prutton, 1964) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกใช้หาค่าการกระจายตัวของทิศแกนง่ายสำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบขนานและวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic material)

โดยมีหลักการวัดดังนี้ ทำการให้สนามแม่เหล็กภายนอกตามทิศแกนยากแล้วทำการวัดค่ารีมานนซ์ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กภายนอกหลังจากนั้นทำการเปลี่ยนทิศทางของทิศสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นและทำการวัดค่ารีมานนซ์ในทิศตั้งฉากจนกระทั่งค่ารีมานนซ์มีค่าสูงสุดซึ่งมุมที่สนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำกับทิศแกนยากและให้ค่า  $M_R$  มีค่าสูงสุดนี้คือค่ามุมการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ของทิศแกนง่ายของแผ่นบันทึกข้อมูลนั่นเอง

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ผลการทดลองอย่างง่ายโดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $M_R$  และค่ามุมซึ่งจากรูปพบว่ามุมที่ให้ค่า  $M_R$  มีค่าสูงสุดคือมุมของการกระจายตัวของทิศแกนง่าย  $\Delta\theta_{EA}$  ส่วนรูปที่ 6 แสดงผลการทดลองจากการวัดค่าวัดลูฟฮีสเทอรีซิสด้วยเครื่องมือ vibrating sample magnetometer (VSM) เพื่อใช้ในการหาค่า  $M_R$  ที่มุมต่างๆ



รูปที่ 5 แสดงผลของมุมการกระจายตัวของทิศแกนง่ายด้วยวิธีรีมานนซ์  $\Delta\theta_{EA}$  (Wu et al., 2004)



รูปที่ 6 แสดงผลการวัดลูปฮีสเทอรีซิสเพื่อใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงของค่ารีมานนท์ที่มุมต่างๆ (Wu et al., 2004)

จากรูปพบว่าลักษณะของลูปฮีสเทอรีซิสจะมีการบิดเอียงไปเนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็กหักล้างปริมาณมากในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก (Deakin et al., 2008; Deakin et al., 2009) ซึ่งสนามภายนอกจะต้องถูกแก้ไขทุกครั้งที่ทำกรวัดค่ารีมานนท์ดังสมการ

$$H_T = H_A - 4\pi M \quad (3)$$

เมื่อ  $H_T$  และ  $H_A$  แทนสนามภายนอกจริงและสนามภายนอกที่ให้แก่วัดตามลำดับ ดังนั้นในการวัดค่าสนามจริงที่ถูกหักผลของสนามหักล้าง  $H_0$  ออกถือว่าเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะวัดค่าได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีหลายงานวิจัยเสนอวิธีการวัดด้วยวิธีรีมานนท์รวมถึงขบวนการแก้ไขสนามหักล้าง  $H_0$  แต่พบว่าเมื่อนำค่าการกระจายไปเปรียบเทียบกับผลการวัดการกระจายด้วยวิธีทางผลึกวิทยายังเกิดข้อขัดแย้งอยู่เช่น ผลการทดลองของ Wu และคณะ (Wu et al., 2004; Wu et al., 2006) พบว่าการกระจายด้วยวิธีรีมานนท์ให้ค่าการกระจายตัวที่แคบกว่าการวัดด้วยวิธี X-ray rocking curve ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยของ Voznyuk และคณะ (Voznyuk et al., 2005) ได้ใช้วิธีรีมานนท์ผ่าน

การคำนวณทางคอมพิวเตอร์ภายใต้สมการ Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG formulation) ผลการศึกษาพบว่ากรวัดด้วยวิธีรีมานนท์ให้ค่าการกระจายตัวแกนนางที่มีค่ากว้างกว่าวิธีการศึกษาทางโครงสร้างผลึก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการวัดทางแม่เหล็กด้วยวิธีรีมานนท์ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงสาเหตุหลักเนื่องมาจากข้อจำกัดในการวัดและแก้ไขค่าสนามหักล้างให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นในปี ค.ศ. 2008 Carter และคณะ (Carter et al., 2008) ได้เสนอเทคนิคการวัดแบบใหม่เพื่อใช้ในการวัดการกระจายตัวของทิศแกนนางซึ่งวิธีนี้จะสามารถกำจัดผลของสนามแม่เหล็กหักล้างได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าเคออร์ซิวิตี ( $H_C$ ) ซึ่งค่าแมกนิไทเซชันที่ตำแหน่ง  $H_C$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $H_0$  จะมีค่าเป็นศูนย์นั่นเอง ในส่วนของรายละเอียดขั้นตอนการวัดและการทดลองของเทคนิคใหม่นี้จะถูกกล่าวในตอนต่อไป

## สรุป

จากการศึกษาถึงความสำคัญของการกระจายตัวแกนนางของแผ่นบันทึกข้อมูลพบว่ามีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งนำไปสู่การ



นำเสนอวิธีการวัดการกระจายตัวทั้งแบบทฤษฎีและปฏิบัติ โดยพบว่าวิธีการวัดการกระจายตัวของทิศแกนง่ายด้วยวิธีการวัดทางแม่เหล็กจะให้ผลที่แม่นยำเนื่องจากการรวมผลของ อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนอันตรกิริยาแบบขั้วและผลของสนามแม่เหล็กสถิตซึ่งเกิดขึ้นขณะมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่แผ่นบันทึกข้อมูล แต่สำหรับแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการวัดแบบใหม่ที่สามารถกำจัดผลของสนามแม่เหล็กข้างได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีแบบดั้งเดิมได้

### เอกสารอ้างอิง

- Carter, A., Fernandez-Outon, L. E., Inaba, Y., Greaves, S. J., Muraoka, H. and O'Grady, K. (2008). Anisotropy dispersion in  $(\text{CoCrPt})_{1-x}(\text{SiO}_2)_x$  perpendicular recording media. *J. Magn. Mater.* 320: 2269-2272.
- Chantrell, R. W. and O' Grady, K. (1992). Magnetic characterisation of recording media. *J. Phys. D: Phys.* 25: 1-23.
- Chantrell, R. W., Walmsley, N., Gore, J. and Maylin, M. (2000). Calculations of the susceptibility of interacting superparamagnetic particles. *Phys. Rev. B* 63: 024410.
- Chureemart, J., Chureemart, P., Pressesky, J., Nolan, T. and O'Grady, K. (2013). Media design and orientation in perpendicular media. *IEEE Trans. Magn.* 49(7): 3592-3595.
- Cullity, B.D. and Graham, C.D. (2009). Introduction to magnetic materials. 2<sup>nd</sup> ed., Hoboken, New Jersey: John Willey and Sons Ltd., Inc.
- Deakin, T., Bunce, C., Wu, S. and O'Grady, K., (2008). Remanence and Coercivity measurements of perpendicular ECC media. *IEEE Trans. Magn.* 44:3515.
- Deakin, T., Garcia-Sanchez, F., Wu, S., Chubyklo-Fesenko, O. and O'Grady, K. (2009). Magnetization reversal in exchange coupled composite media experiment and modeling, *IEEE Trans. Magn.* 45: 856.
- Hitachi global storage technologies (2005)
- Iwasaki, S. and Takemura, K. (1975). An analysis for the circular mode of magnetisation in short wavelength recording. *IEEE Trans. Magn.* 11: 1173-1175.
- Lee, J., Brombacher, C., Fidler, J., Dymerska, B., Suess, D. and Albrecht, M., (2011). *J. Appl. Letts.* 99: 10N508.
- Luborsky, F. E. (1961). Development of elongated particle magnets. *J. Appl. Phys.* 32(3): S171-S183.
- O'Grady, K. (1990). Magnetic characterisation of recording media. *IEEE Trans. Magn.* 26(5): 1870-1875.
- Papuso, Jr. C. and Suzuki, T. (2002). Magnetic anisotropy field dispersion characterisation of advanced perpendicular and longitudinal media. *IEEE Trans. Magn.* 38(4): 1687-1692.
- Piramanayagam, S. N. (2007). Perpendicular recording media for hard disk drives. *J. Appl. Phys.* 102: 011301.
- Piramanayagam, S. N. and Srinivasan, K. (2009). Recording media research for future hard disk drives. *J. Magn. Mater.* 321: 485-494.
- Plumer, M. L., Van Ek, J., Whitehead, J. P., Fai, T. J. and Mercer, J. I. (2014). Simulations of magnetic hysteresis loops at high temperatures. *J. Appl. Phys.* 116: 123910.
- Prutton, M. (1964). Thin ferromagnetic films. Washington: Butterworths. pp. 87.
- Stoner E. C. and Wolhfarth E. P. (1948). *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A* 240: 599.
- Varghese, B., Piramanayagam, S., Lee, W. K. and Tan, H. K. (2014). Noise characterization of

- perpendicular recording media by cluster size measurements. IEEE Trans. Magn. 50(5): 1-6.
- Voznyuk, V. G., Misra, A., Doyle, W. D., Visscher P. B. and Chantrell, R. W. (2005). Angular dispersion of the anisotropy in perpendicular media. J. Appl. Phys. 97: 10N508-1-10N508-3.
- Wu, J., Holloway, L., Laidler, H., O'Grady, K., Khirzoev, S., Howard, J. K., Gustafson, R. W. and Litvinov, D. (2002). Magnetic characterisation of perpendicular recording media. IEEE Trans. Magn. 38(4): 1682-1686.
- Wu, X. W., Zhou, H., Veerdonk, van de R. J. M., Clemer, T. J. and Weller, D. (2004). Measurement of the magnetic easy axis dispersion in perpendicular media. J. Magn. Magn. Mater. 278: 285-288.
- Wu, X. W., Zhou, H., Weller, D. and Richter, H. J. (2006). Measurement of angular-dependent hysteresis loops in perpendicular magnetic recording media. J. Magn. Magn. Mater. 303: 5-8.

