

การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์แรงสลับ Design and Construction of Alternating Gradient Force Magnetometer

วิศัลย์ วีรสาร¹ และ พงศกร จันทรรัตน์¹

Visan Verasan¹ and Pongsakorn Jantaratana¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์แรงสลับ สำหรับใช้ในการตรวจวัดสมบัติของวัสดุที่โมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สร้างขึ้นโดยใช้ขดลวดสองชุดที่เหมือนกันต่อกันแบบอนุกรมและวนในทิศกลับกัน ขดลวดจะถูกขับเคลื่อนโดยส่วนขยายในย่านความถี่เสียงซึ่งถูกป้อนด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากเอาต์พุตจากสัญญาณอ้างอิงภายในเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินอีกต่อหนึ่ง ขดลวดทั้งสองถูกติดตั้งและจัดให้อยู่กึ่งกลางระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบตรวจวัดการสั่นประกอบด้วยแท่งแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ยาว 70 mm ติดตั้งอยู่บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแบบสองชั้นโดยตัวอย่างที่ต้องการทดสอบจะถูกติดตั้งอยู่บนปลายแท่งแก้วและนำไปติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดเกรเดียนท์ ความต่างศักย์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุถูกตรวจวัดโดยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน ค่าคงตัวความไวของระบบที่พัฒนาขึ้นถูกกำหนดโดยใช้ทรงกลม yttrium iron garnet (YIG) รุ่น SRM 2853 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm มวล 2.812 mg) ประสิทธิภาพของระบบถูกทดสอบโดยการวัดสมบัติแม่เหล็กของทรงกลม nickel รุ่น LakeShore 651-465 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm) พบว่า ค่าแมกนีโตเซชันเมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอก 5.0 kOe มีค่า 0.2499 emu โดยมีค่าความไม่แน่นอน 0.06247 %.

ABSTRACT

In this paper we present the development of an alternating gradient force magnetometer for characterize properties of low magnetic moment materials. The alternating gradient field was generated by a pair of similar coils connected in series and opposite direction. The gradient coils were powered by an audio frequency amplifier, fed from the internal sine wave output of a lock-in amplifier. The coils were attached, and centered on the pole caps of the electromagnet. The vibration monitoring system consisted of a glass rod 1 mm in diameter, 70 mm in length was attached to a piezoelectric bimorph. The samples under test were mounted onto the end of glass rod and installed within the center of gradient coils. The induced voltage, in principle, is directly proportional to magnetic moment of the material was measured by a lock-in amplifier. The sensitivity constant of the developed system was determined by using yttrium iron garnet (YIG) sphere, SRM 2853 (1 mm

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

diameter, 2.812 mg). Performance of the fabricated system was tested by measuring magnetic properties of a nickel sphere, LakeShore 651-465 (1 mm diameter). Magnetization of the material was found to be 0.2499 emu at the external field strength of 5.0 kOe, contributing an uncertainty of 0.06247 %.

Key Words: Alternating Gradient Magnetometer, Gradient coils, Magnetization, Hysteresis loop

e-mail address: v_verasan@hotmail.com

คำนำ

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์เป็นวัสดุที่สามารถนำไปประยุกต์งานได้หลากหลายที่สุดประเภท โดยอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในการสังเคราะห์วัสดุในปัจจุบัน ทำให้สามารถสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กมากๆ ระดับนาโนได้ และจากการศึกษาในขั้นต้นพบว่าวัสดุแม่เหล็กนาโนมีสมบัติหลายอย่างที่น่าสนใจและแตกต่างจากคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างปกติ รวมทั้งการนำวัสดุประเภทนี้ไปประยุกต์ใช้นั้นสามารถลดข้อด้อยได้เป็นอย่างมาก จึงส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยวัสดุประเภทนี้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันอย่างไรก็ตามในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของวัสดุนาโนนั้นจำเป็นต้องพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องมือวัดให้มีความไวมากยิ่งขึ้นควบคู่ไปด้วย โดยเครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (Vibrating sample magnetometer; VSM) เนื่องจากไม่ต้องการการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก และสามารถเก็บรวบรวมและประมวลผลการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในการใช้ VSM วัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุนั้นจะใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่หรือต้องใช้ตัวอย่างในปริมาณที่ค่อนข้างมาก และใช้เวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ค่อนข้างนาน

แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์แรงสลับ (Alternating gradient force magnetometer; AGFM) เป็นแมกนีโตมิเตอร์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความไวในการตรวจวัดดีกว่า VSM ถึง 100 เท่า โดยใช้เวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่น้อยกว่า AGFM ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Zijlstra (1970) โดยให้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์อยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีโตสตัวอย่าง และใช้กลองจุลทรรศน์ในการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัสดุตัวอย่างที่ติดอยู่ที่ปลายของก้านขนาดเล็กซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนได้ และในเวลาต่อมา Flanders (1990) ได้เปลี่ยนการจัดวางขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ โดยให้สนามเกรเดียนท์อยู่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทำให้สามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 77 ถึง 900 K ด้วยความไวในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กที่ดีเยี่ยม ทำให้แมกนีโตมิเตอร์แบบ AGFM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นเป็นอย่างมากในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กน้อยๆ เช่นการใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของเนื้อเยื่อสมอง โดย Hirt *et al.* (2006) หรือการใช้เพื่อศึกษาสมบัติของอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโน โดย Pike และ Fernandez (1999)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแบบ AGFM ให้สามารถวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุได้ โดยมีการประมวลผลและแสดงผลการวัดแบบกราฟฮีสเทอรีซิสด้วยคอมพิวเตอร์ ในระดับที่สามารถใช้ในการวิจัยและบริการวิชาการแก่หน่วยงานต่างๆ ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดการสั่น

การตรวจวัดการสั่นของตัวอย่างเนื่องจากแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์สลับ อาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของแผ่นเพียโซเซรามิกโดยในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ Non-magnetic PZT bimorph รุ่น T220-A3NM-303X ผลิตโดย Piezo System โดยแผ่นเพียโซเซรามิกจะถูกนำไปต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดความต่างศักย์ที่ปลายด้านหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะติดแท่งแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 mm ยาวประมาณ 60 mm โดยใช้กาวอีพ็อกซี โดยวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบจะติดที่บริเวณปลายของแท่งแก้วอีกทีหนึ่งแผ่นเพียโซเซรามิกพร้อมแท่งแก้วจะถูกยึดติดกับแขนกลและตัวเลื่อนเพื่อปรับตำแหน่งตัวอย่างให้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับสัญญาณที่เกิดจากการสั่นของแผ่นเพียโซเซรามิกจะถูกตรวจวัดโดยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (รุ่น SR830 ผลิตโดย Stanford Research Systems) เมื่อทราบความต่างศักย์ที่ตรวจวัดได้ (V_{meas}) จะสามารถคำนวณหาโมเมนต์แม่เหล็ก (m) ของวัสดุได้จากความสัมพันธ์

$$m = \frac{V_{meas}}{SG} \quad (1)$$

เมื่อ G แทนสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ซึ่งขึ้นกับเวลา และ s เป็นค่าคงตัวความไว (Sensitivity constant) ของระบบตรวจวัด

การออกแบบและสร้างระบบกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับถูกออกแบบโดยประยุกต์ใช้หลักการของขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ซึ่งประกอบด้วยขดลวดที่เหมือนกันทุกประการสองขดวางห่างกันเป็นระยะทางเท่ากับรัศมีของขดลวด โดยจะต่อขดลวดแบบอนุกรมและวนในทิศกลับกัน (แทนที่จะต่อแบบอนุกรมและวนในทิศเดียวกัน) ซึ่งจะได้สนามแม่เหล็ก B ในแนวแกนของขดลวดเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในแนวแกนดังสมการ

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2 \left(R^2 + \left(\frac{R}{2} + x \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\mu_0 I R^2}{2 \left(R^2 + \left(\frac{R}{2} - x \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

เมื่อ x เป็นตำแหน่งในแนวแกนของขดลวด เมื่อวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขดลวดทั้งสอง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ได้จากอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็กเทียบกับ x ได้ดังสมการ

$$\frac{dB}{dx} = -\frac{3}{2} \mu_0 I R^2 \left(\frac{\frac{R}{2} + x}{\left(R^2 + \left(\frac{R}{2} + x \right)^2 \right)^{\frac{5}{2}}} + \frac{\frac{R}{2} - x}{\left(R^2 + \left(\frac{R}{2} - x \right)^2 \right)^{\frac{5}{2}}} \right) \quad (3)$$

ดังนั้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขดลวดทั้งสอง ($x = 0$) สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์เมื่อขดลวดแต่ละขดประกอบด้วยขดลวดจำนวน n รอบ จะมีค่าดังสมการ

$$\frac{dB}{dx} = -\frac{3}{2} \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{\mu_0 I n}{R^2} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) สามารถนำไปคำนวณมิติของขดลวดที่ต้องการได้ โดยในการออกแบบครั้งนี้จะกำหนดรัศมีเฉลี่ยของขดลวดเป็น 23.000 mm โดยขดลวดแต่ละขดจะพันด้วยลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.102 mm จำนวน 644 รอบ โดยแกนสำหรับพันขดลวดจะใช้วัสดุพลาสติกโพลีอะซีทัล (Polyacetal)

สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ของขดลวดถูกตรวจวัดโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0.05 และ 0.10 A จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (รุ่น E3645 ผลิตโดย Agilent Technologies) ให้แก่ขดลวด จากนั้นจึงทำการตรวจวัดสนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวดที่ตำแหน่งต่างๆ (เทียบกับกึ่งกลางขดลวด) โดยเกาส์มิเตอร์ (รุ่น 455 DSP ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics)

การออกแบบและสร้างวงจรขยายกระแส

วงจรสำหรับขยายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับถูกออกแบบโดยใช้วงจรรวม DMOS Audio amplifier หมายเลข TDA7294 (STMicroelectronics) โดยส่วนขยายกระแสนี้จะรับสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์จากเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน เพื่อควบคุมขนาดของกระแสที่จ่ายออกที่หัวเอาต์พุต เพื่อจ่ายให้กับขดลวดต่อไป

การออกแบบและสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์

เครื่องวัดสนามแม่เหล็กถูกออกแบบโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) รุ่น HGT2100 ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics โดยใช้ไอซี Programmable Current Source หมายเลข LT3092 เพื่อสร้างเป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงตัวให้แก่เซ็นเซอร์ สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกขยายโดยใช้ไอซีแบบ Instrumentation amplifier หมายเลข INA 128 ก่อนที่จะป้อนให้แก่ส่วนวัดความต่างศักย์ซึ่งใช้ไอซีแบบ $3\frac{1}{2}$ digit A/D converters หมายเลข ICL7107 โดยพร้อมกันนี้ สัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วจะถูกตรวจวัดโดยดิจิตอลมัลติมิเตอร์รุ่น Agilent 34401A ผลิตโดย Agilent Technologies ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปประมวลผลเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีโตสวิตซ์ตัวอย่างต่อไป เครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างเสร็จจะถูกปรับ และสอบเทียบโดยการวัดสนามแม่เหล็กที่จ่ายโดยเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า (รุ่น EM4-HVA ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics) เทียบกับเกาส์มิเตอร์ (รุ่น 455 DSP ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics)

การทดสอบระบบแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ

หลังจากการทดสอบและปรับแต่ละส่วนแล้วเสร็จ ส่วนประกอบต่างๆ จะถูกนำไปติดตั้งลงชั้นวางแม่เหล็กและอุปกรณ์ที่ทำจากอลูมิเนียม จากนั้นจึงปรับตำแหน่งในการจัดวางอุปกรณ์ตรวจวัดให้อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ การทำงานของเครื่องวัดและอุปกรณ์ต่างๆ จะถูกควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยใช้การเชื่อมต่อผ่านพอร์ต IEEE-488 และใช้โปรแกรม VEE OneLab Version 6.01 ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบกราฟิก เพื่อควบคุมการทำงานและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด รวมถึงการประมวลผลประสิทธิภาพในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุจะถูกสอบเทียบโดยใช้วัสดุอ้างอิงโมเมนต์แม่เหล็กมาตรฐาน (magnetic moment standard reference materials) โดยในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในครั้งนี้จะตรวจวัดในรูปแบบของกราฟฮิสเทอรีซิสภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก ± 5.25 kOe โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกครั้งละ 25 Oe จากนั้นจึงรอเป็นเวลา 1 วินาทีเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่ผ่านตัวอย่างเสถียร จากนั้นจึงทำการวัดความต่างศักย์ที่ได้จากแผ่นเพียโซเซรามิกโดยจะหาความไม่แน่นอนในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (uncertainty; u_n) ซึ่งนิยามโดย da Silva *et al.* (2003) ดังสมการ

$$u_n = \frac{1}{SNR} \quad (5)$$

เมื่อ SNR คืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio; SNR) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$SNR = \frac{2m_s}{\sqrt{\langle \delta_m^2 \rangle}} \quad (6)$$

เมื่อ m_s แทนค่าเฉลี่ยของขนาดโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อวัดด้วยการอิมิตัวทางแม่เหล็ก ($2m_s$ แทนแอมพลิจูดของกราฟฮิสเทอรีซิส) และ δ_m แทนผลต่างของค่าโมเมนต์แม่เหล็กกับโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยในช่วงที่มีการอิมิตัวส่วนความสามารถในการวัดซ้ำ (repeatability) ของระบบถูกตรวจสอบโดยการวัดกราฟฮิสเทอรีซิสของทรงกลม निकิล เมื่อสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์มีค่าเป็น $1 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1}$ ซ้ำ 5 ครั้ง โดยไม่นำตัวอย่างออกจากโพรบ แต่จะเว้นช่วงเวลารวบรวมระหว่างแต่ละวงฮิสเทอรีซิสประมาณ 15 นาทีและมีการปรับค่าความถี่โรแนนซ์ใหม่ทุกครั้ง จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีขนาด 5 kOe ของแต่ละวงฮิสเทอรีซิส ($m_{5\text{kOe}}$) โดยจะนิยามความสามารถในการวัดซ้ำเป็นหนึ่งความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $m_{5\text{kOe}}$ เฉลี่ยจากการวัดวงฮิสเทอรีซิสของทรงกลม निकิลซ้ำ 5 ครั้ง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตำแหน่งแบบเป็นเชิงเส้น (Figure 1) โดยค่าของสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ในช่วง $\pm 5.000 \text{ mm}$ จากตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวด ที่ได้จากกราฟคือ $128.92 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ เมื่อกระแสผ่านขดลวด 0.10 A และ $128.58 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ เมื่อกระแสผ่านขดลวด 0.05 A ซึ่งมีความแตกต่างกัน 0.26% และมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณในทางทฤษฎีเล็กน้อย (ค่าที่ได้จากการคำนวณ $127.37 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$) ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจจะเกิดจากการพันขดลวดที่ไม่เป็นระเบียบ และความไม่สมมาตรในการพันขดลวด

จากการทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นกระแสไฟฟ้าของวงจรขยายกระแสในช่วงความต่างศักย์ 0.100 ถึง 0.900 V ความถี่ 55.00 ถึง 90.00 Hz พบว่ามีสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นกระแส $0.0661 \pm 0.0007 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$ หรือคิดเป็นสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก $0.0830 \pm 0.0009 \text{ V} \cdot \text{cm} \cdot \text{Oe}^{-1}$

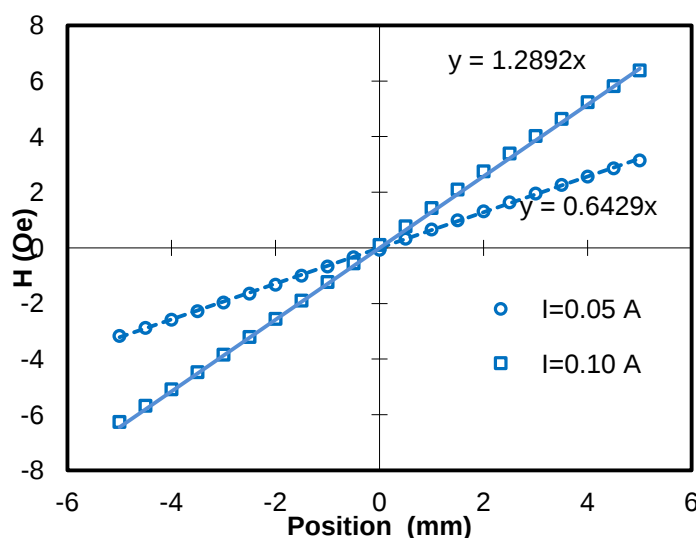


Figure 1 Axial magnetic field generated by the gradient coils.

สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็กในช่วงสนามแม่เหล็ก ± 1.000 T โดยค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น (ความต่างศักย์ 1 V เทียบเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้ 1000 mT) มีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเกาส์มิเตอร์อยู่ประมาณ 5.8% และมีความคลาดเคลื่อนชี้ดศูนย์ 0.7 mT

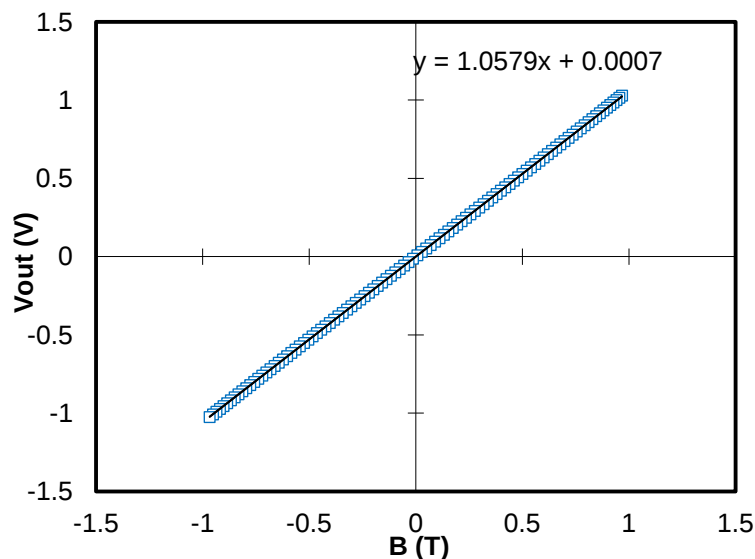


Figure 2 Magnetic field dependence of gaussmeter output voltage.

ผลการสอบเทียบระบบโดยใช้วัสดุอ้างอิงโมเมนต์แม่เหล็กมาตรฐานชนิด Yttrium Iron Garnet (YIG) รุ่น SRM 2853 ขนาด 1 mm มวล 2.812 mg ผลิตโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็ก $27.6 \pm 0.1 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$ พบว่าค่าคงตัวความไวของระบบซึ่งสอบเทียบที่สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ $1 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1}$ มีค่าเป็น $0.7367 \text{ V} \cdot \text{emu}^{-1} \cdot \text{Oe}^{-1}$ และจากการทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของระบบโดยการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของทรงกลมนิเกิล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm (รุ่น 651-465 ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics) พบว่าระบบสามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุได้โดยมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดี (Figure 3)

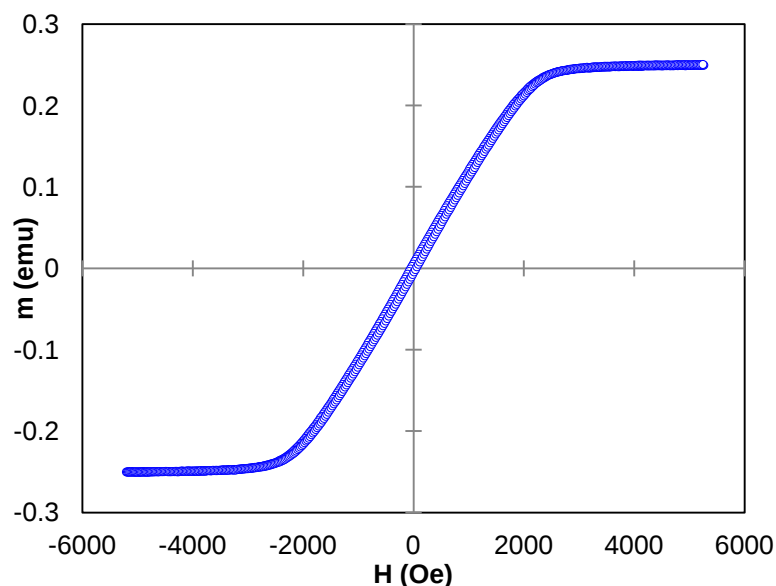


Figure 3 Hysteresis loop of 1 mm Ni sphere measured by using gradient file of 1 Oe cm^{-1}

จากการคำนวณหาค่าของปริมาณที่เกี่ยวข้องซึ่งได้จากกราฟฮิสเทอรีซิส พบว่าทรงกลมนิเกิลมีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก 0.2499 emu โดยมีความไม่แน่นอนในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กเพียง 0.06247% (Table 1)

Table 1 Uncertainty and related quantities

Quantities	Magnitude
Amplitude of the total curve ($2m_s$)	0.4999 emu
Standard uncertainty of noise ($\sqrt{\langle \delta_m^2 \rangle}$)	3.123×10^{-3} emu
Signal-to-noise ratio (SNR)	1601
Uncertainties in the magnetic moment (u_n)	0.06247 %

การทดสอบความสามารถในการวัดค่าซ้ำของระบบโดยการวัดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุอ้างอิงมาตรฐานทรงกลมนิเกิลซ้ำ 5 ครั้งพบว่าค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ย และความไม่แน่นอนในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กภายนอก 5.0 kOe มีค่าเป็น 0.2508 emu และ 0.001084 emu (หรือ 0.43%) ตามลำดับ (Table 2)

Table 2 Resonance frequency and magnetic dipole moment under external field of 5 kOe for 5 repeated measurement hysteresis loops.

Hysteresis loop No.	Resonance frequency (Hz)	Average magnetic moment (emu)
1	63.96	0.2500
2	64.00	0.2507
3	64.00	0.2514
4	64.00	0.2523
5	64.01	0.2496

สรุป

แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์แรงสลับถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ ระบบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยจากการทดสอบวัดสมบัติแม่เหล็กของทรงกลมนิเกิลขนาด 1 mm พบว่าค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่วัดได้มีความไม่แน่นอนเพียง 0.06247 % นอกจากนี้ระบบยังมีค่าความสามารถในการวัดซ้ำที่ดี โดยมีความคลาดเคลื่อนของโมเมนต์แม่เหล็กจากการวัดซ้ำห้าครั้งเพียง 0.43 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

da Silva, F.C.S., C.M. Wang and D.P. Pappas. 2003. Interlaboratory comparison of magnetic thin film measurements. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 108: 125-134.

- Flanders, P. J. 1990. A vertical force alternating gradient magnetometer. **Rev. Sci. Instrum.** 61: 839-847.
- Hirt, A. M., F. Brem, M. Hanzlik, and D. Faivre. 2006. Anomalous magnetic properties of brain tissue at low temperature: The 50 K anomaly. **J. Geophys. Res.** III, B12S06 1-10.
- Pike C. and A. Fernandez. 1999. An investigation of magnetic reversal in submicron-scale Co dots using first order reversal curve diagrams. **J. Appl. Phys.** 85: 6668-6676
- Zijlstra, H. 1970. A vibrating reed magnetometer for microscopic particles. **Rev. Sci. Instrum.** 41: 1241-1243.