



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์  
โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2556

โครงการวิจัยรหัส ว-ท(ด)10.56

การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับสำหรับตรวจวัด  
สมบัติแม่เหล็กของวัสดุนาโน

**Design and construction of alternating gradient magnetometer for magnetic  
properties characterization of nanomaterials**

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.พงศกร จันทรัตน์  
หน่วยงานสังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน  
หน่วยงานหลัก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ บางเขน

## สารบัญ

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	2
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	2
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
<b>บทที่ 3 วิธีวิจัย</b>	6
ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	6
วัสดุและอุปกรณ์	14
วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	19
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	20
ตารางสรุปผลการดำเนินงานของโครงการที่ดำเนินไปแล้ว	20
รายละเอียดผลการวิจัย	21
<b>บทที่ 5 สรุป วิจัยาณณ์ และข้อเสนอแนะ</b>	45

## บทที่ 1 บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์เป็นวัสดุที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์งานอย่างหลากหลายที่สุดชนิดหนึ่ง การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และการวัดสมบัติทางแม่เหล็กเพื่อค้นหาวัสดุแม่เหล็กที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในการสังเคราะห์วัสดุในปัจจุบัน ช่วยให้สามารถสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กมากๆ ระดับนาโนได้ และจากการศึกษาในขั้นต้นพบว่าวัสดุแม่เหล็กนาโนมีสมบัติหลายอย่างที่น่าสนใจและแตกต่างจากคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างปกติ รวมทั้งการนำวัสดุประเภทนี้ไปประยุกต์ใช้นั้นสามารถลดต้นทุนได้เป็นอย่างมาก จึงส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยวัสดุประเภทนี้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

ในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของวัสดุนาโนนั้นจำเป็นต้องพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องมือวัดให้มีความไวมากยิ่งขึ้น โดยเครื่องวัดที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (vibrating sample magnetometer, VSM) เนื่องจากไม่ต้องการการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก สามารถเก็บรวบรวมและประมวลผลการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในการใช้ VSM วัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุนั้นจะใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่หรือต้องใช้ตัวอย่างในปริมาณที่ค่อนข้างมาก อีกทั้งเสถียรภาพในการสั่นตัวอย่างไม่ดีเท่าที่ควรด้วยข้อจำกัดดังกล่าว จึงทำให้ไม่สามารถใช้ VSM วัดสมบัติของวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนได้ หรือถ้าวัดได้ก็จะให้ผลการวัดที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นในกรณีที่ต้องการความถูกต้องในการวัด จำเป็นต้องใช้แมกนีโตมิเตอร์แบบ SQUID ที่มีความไวในการวัดโมเมนต์แม่เหล็กโดยประมาณ  $10^{-12} \text{ Am}^2$  แต่อย่างไรก็ตามความไวที่ได้มาต้องแลกกับค่าใช้จ่ายในการวัดแต่ละครั้งที่สูงมากเนื่องจาก SQUID ต้องการระบบหล่อเย็นที่อุณหภูมิต่ำมากๆ จึงจำเป็นต้องใช้ฮีเลียมเป็นระบบหล่อเย็น อีกทั้งต้องมีการปิดกั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมอย่างดี

แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนต์สลับ (Alternating gradient magnetometer, AGM) เป็นแมกนีโตมิเตอร์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความไวในการตรวจวัดประมาณ  $10^{-11} \text{ Am}^2$  ใกล้เคียงกับ SQUID magnetometer (มีความไวประมาณ  $10^{-12} \text{ Am}^2$ ) และสามารถวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุได้โดยไม่ต้องอาศัยระบบหล่อเย็น จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการวัดแต่ละครั้งไม่สูงนัก อย่างไรก็ตามเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันนั้นต้องสั่งผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ราคาสูงมากๆ โดย VSM ที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กให้แก่ตัวอย่างประมาณ 1-2 T จะมีราคาสูงกว่า 4 ล้านบาท ส่วน SQUID magnetometer จะมีราคาสูงกว่า 10 ล้านบาท สำหรับแมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM นั้นพบว่าในขณะนี้มีการผลิตและจำหน่ายโดย Princeton Measurements Corp. เพียงบริษัทเดียวเท่านั้น โดยจากการสอบถามราคาไปยังบริษัทผู้ผลิต พบว่าในกรณีที่สามารถตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุภายใต้สนามแม่เหล็กให้แก่ตัวอย่างสูงสุด 2.2 T นั้นจะมีราคาประมาณ 8 ล้านบาท

ด้วยราคาเครื่องมือวัดสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงมาก ทำให้การวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กในประเทศของเรานั้นไม่สามารถแข่งขันกับนานาประเทศได้ ในโครงการวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กแบบ AGM ความไวสูง โดยจะออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่างๆ เพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กขนาด 1.2 T ของห้องปฏิบัติการวิจัย

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างระบบวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแบบ AGM สำหรับใช้ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุนาโน โดยมีการประมวลผลและแสดงผลการวัดแบบกราฟฟิสิกส์ด้วยคอมพิวเตอร์ ในระดับที่สามารถใช้ในการวิจัยและบริการวิชาการแก่หน่วยงานต่างๆ ได้

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแบบ AGM ซึ่งประกอบด้วยส่วนย่อยต่างๆ ดังนี้

- 1) ระบบสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับซึ่งประกอบด้วยขดลวด และแหล่งจ่ายกระแสสลับ
- 2) ระบบตรวจวัดสัญญาณการสั่นของเพียโซอิเล็กทริกที่ขึ้นกับโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุและสนามแม่เหล็กภายนอก
- 3) เครื่องวัดสนามแม่เหล็กปรากฏการณ์ฮอลล์
- 4) เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน
- 5) ชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้าและระบบ AGM
- 6) โปรแกรมควบคุม รวบรวมข้อมูล ประมวลผล และแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

**ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดลิตธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์**

ถึงแม้ว่าระบบที่สร้างขึ้นมาในครั้งนี้จะไม่สามารถเผยแพร่ในวารสารหรือจดลิตธิบัตรได้ระบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโน ช่วยพัฒนางานวิจัยทางด้านวัสดุได้อย่างมาก โดย

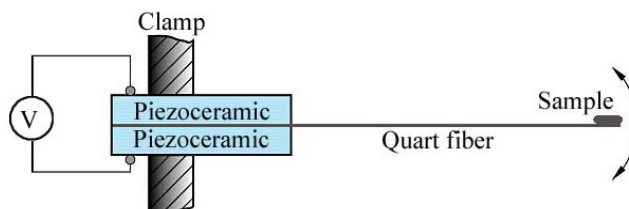
- 1) ในเชิงวิชาการ เครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กที่ได้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยทางด้านวัสดุแม่เหล็ก เป็นการเพิ่มองค์ความรู้ทางด้านวัสดุให้แก่นิสิต นักศึกษา และนักวิจัย ของสถาบัน และหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำให้สามารถเข้าใจสมบัติต่างๆ ของวัสดุนาโนได้ดียิ่งขึ้น และทำให้เกิดองค์ความรู้อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องตามมาอีกมากมาย และองค์ความรู้ดังกล่าวสามารถนำไปเผยแพร่ในวารสารหรือจดลิตธิบัตรได้
- 2) ด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแม่เหล็กจำนวนมากต้องการเครื่องมือวัดสมบัติทางแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ เครื่องมือที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแม่เหล็ก

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นใช้งานเป็นครั้งแรกในปี 1970 โดย Zijlstra [1] โดยแสดงผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กในลักษณะของกราฟฮีสเทอรีซิส ซึ่งระบบประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้แมกนีโตซ์วัสดุ
- 2) ขดลวดและระบบสำหรับใช้สร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ที่ขึ้นกับเวลา
- 3) เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (gauss meter)
- 4) เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินสำหรับวัดความต่างศักย์ที่เกิดจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก - ทริก
- 5) คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล และแสดงผล

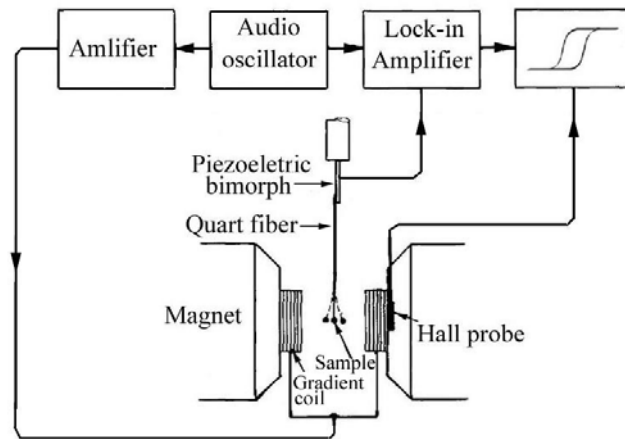
ในการตรวจวัดแรงที่กระทำต่อวัสดุชิ้นนั้นสามารถทำได้โดยการติดตั้งวัสดุลงบนปลายของแท่งควอทซ์ โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของแท่งควอทซ์จะยึดติดกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ที่ยึดจับตัวอย่างและระบบตรวจวัดการสั่นของวัสดุในแมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM

วัสดุซึ่งติดตั้งอยู่ที่ปลายของแท่งควอทซ์จะถูกนำไปวางระหว่างขั้วแม่เหล็กสำหรับการแมกนีโตซ์ และระหว่างขั้วแม่เหล็กดังกล่าวจะมีขดลวดชุดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา ซึ่งส่งผลให้แรงที่กระทำต่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา จึงทำให้ปลายของแท่งควอทซ์สั่นตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงของสนามเกรเดียนท์ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กซึ่งกระทำต่อวัสดุจึงสามารถวัดได้จากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดย Flander [2] พบว่าประสิทธิภาพในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของเครื่อง AGM สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการปรับความถี่ของสนามเกรเดียนท์ที่ให้แก่วสดุ ให้มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (lock-in amplifier) ถูกนำมาใช้เพื่อวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยเครื่องจะทำการล็อกสัญญาณที่วัดกับสัญญาณอ้างอิง (ซึ่งมีความถี่เดียวกับความถี่ของสนามเกรเดียนท์) และวัดเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์เท่านั้น จึงสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัญญาณที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริก จะถูกวัดที่สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีโตซ์ค่าต่างๆ กัน เพื่อนำไปใช้แสดงผลในลักษณะกราฟฮีสเทอรีซิส และนำไปประมวลผลเพื่อหาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพส่วนประกอบและการทำงานของแมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM

เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ให้แก่วัสดุแม่เหล็กที่ศึกษานั้นมีสองส่วน คือสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีไทซ์วัสดุ และสนามเกรเดียนท์สำหรับทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัสดุ โดยสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางแม่เหล็กที่วัดได้ แต่จากการศึกษาโดย O'Grady และ คณะ [3] รวมทั้งจากการศึกษาของ Harell [4] แล้วพบว่าโดยการกำหนดสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ที่เหมาะสมแล้วสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

ด้วยความไวในการตรวจวัดโมเมนต์แม่เหล็กที่ดีเยี่ยม ทำให้แมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นเป็นอย่างมากในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กน้อยๆ (โมเมนต์แม่เหล็กมีค่าน้อย) เช่นการใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของเนื้อเยื่อสมอง [5] อนุภาคแม่เหล็กระดับนาโน [6]

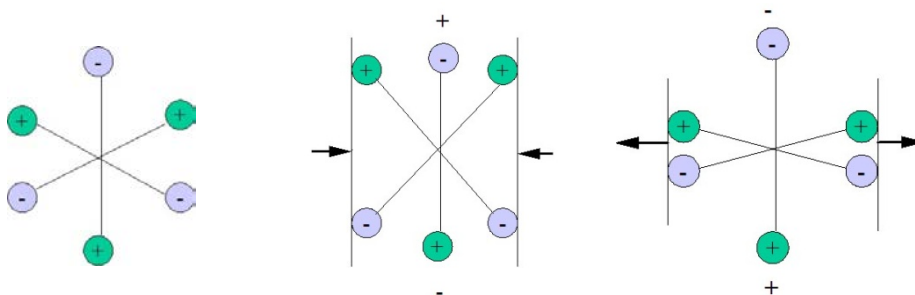
## บทที่ 3 วิธีวิจัย

### ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

#### 1. ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

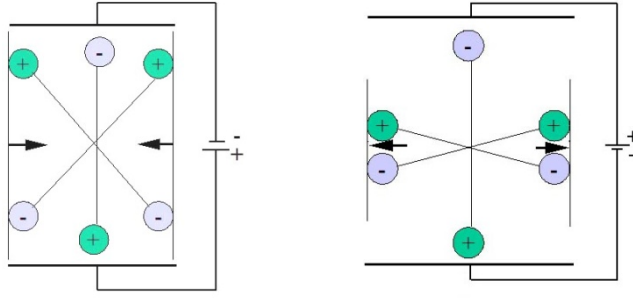
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในผลึกและวัสดุจำพวกเซรามิกบางชนิด เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกแรงเค้นกระทำจะสามารถสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นมาได้ ในทางกลับกันเมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบโดย Pierre Curie ในปี ค.ศ. 1880 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น โดยมีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ได้แก่ เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต (Lead zirconia titanate) ซึ่งนิยมเรียกว่า PZT เลดไททาเนต เซอร์โคเนต (Lead titanate zirconate) และแบเรียมไททาเนต (Barium titanate)

การเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกซิลิกอนไดออกไซด์สามารถแสดงดังภาพที่ 3 โดย  $\oplus$  แทนอะตอมซิลิกอน และ  $\ominus$  แทนอะตอมของออกซิเจน เมื่อออกแรงกดด้านข้างของผลึกดังภาพ ทำให้ด้านบนของผลึกมีศักย์ไฟฟ้าสุทธิเป็นบวกและด้านล่างมีศักย์ไฟฟ้าสุทธิเป็นลบ แต่เมื่อออกแรงดึงผลที่ได้จะกลับกัน ผลของการโพลารไรซ์ทางไฟฟ้าของวัสดุทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ



ภาพที่ 3 การเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ )

เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแรงทางไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกควอตซ์ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนรูปร่างของผลึกควอทซ์เนื่องจากแรงทางไฟฟ้า

## 2. แรงแม่เหล็ก

เมื่อวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็ก  $m$  อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์  $dH_{ac}/dx$  ส่งผลให้มีแรงทางแม่เหล็ก  $F$  กระทำต่อวัสดุ โดยแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุและเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กดังสมการ

$$F_x = m\mu_0 \frac{dH_{ac}}{dx}$$

พิจารณาวัสดุที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กสถิต  $H_{dc}$  และสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา  $H_{ac} = h_{ac} \sin \omega t$  ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุมีค่าเป็น

$$F_x = m\mu_0 \frac{dh_{ac}}{dx} \sin \omega t$$

เนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุขึ้นกับแม่เหล็กสุทธิในบริเวณที่วัสดุวางอยู่ ดังนั้นในกรณีที่สนามแม่เหล็ก  $H_{ac}$  น้อยกว่า  $H_{dc}$  สามารถกระจายโมเมนต์แม่เหล็กได้ดังสมการ

$$m_{H_{tot}} = m_{H_{dc} + H_{ac}} = m_{H_{dc}} + \frac{dm}{dH_{dc}} G \Delta x \sin \omega t + \frac{1}{2} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} (G \Delta x \sin \omega t)^2 + \dots$$

เมื่อ  $G = \frac{dh_{ac}}{dx}$  แทนแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุ จึงมีค่าดังสมการ

$$F_x = m_{H_{dc}} \mu_0 G \sin \omega t + \frac{dm}{dH_{dc}} \mu_0 G^2 \Delta x \sin^2 \omega t + \frac{1}{2} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} \mu_0 G^3 \Delta x^2 \sin^3 \omega t + \dots$$

เมื่อกระจาย  $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$  และ  $\sin^3 \omega t = \frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \sin 3\omega t$  จะได้

$$F_x = \left[ \frac{1}{2} \frac{dm}{dH_{dc}} \mu_0 G^2 \Delta x \right] + \left[ m_{Hdc} + \frac{3}{8} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} (G \Delta x)^2 \right] \mu_0 G \sin \omega t$$

$$- \left[ \frac{1}{2} \frac{dm}{dH_{dc}} \mu_0 G^2 \Delta x \right] \cos 2\omega t - \left[ \frac{1}{8} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} \mu_0 G^3 \Delta x^2 \right] \sin 3\omega t + \dots$$

โดยทั่วไประบบตรวจวัดของแมกนีโตมิเตอร์จะออกแบบให้ตรวจวัดสัญญาณที่ความถี่เดียวกับความถี่ของสนามแม่เหล็ก  $H_{ac}$  ดังนั้นโมเมนต์แม่เหล็กที่ตรวจวัดได้จะมีค่าดังสมการ

$$m_{meas} = K \left[ m_{Hdc} + \frac{3}{8} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} (G \Delta x)^2 \right] G$$

$$= K [m_{Hdc} + \Delta m] G$$

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงตัว และ  $\Delta m$  แทนค่าผิดเพี้ยนของโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$\Delta m = \frac{3}{8} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} (G \Delta x)^2 = \frac{3}{8} \frac{d^2 m}{dH_{dc}^2} h_{ac}^2$$

ค่าความผิดเพี้ยนของโมเมนต์แม่เหล็กสามารถทำให้น้อยลงได้โดยใช้สนามแม่เหล็กสลับที่มีค่าน้อยๆ โดยการละทิ้งผลของค่าความผิดเพี้ยนของโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา และใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกในการวัดแรงที่กระทำต่อตัวอย่างซึ่งติดตั้งอยู่บนแท่งแก้วที่ยึดติดอยู่ที่ปลายจะได้ความต่างศักย์ดังสมการ

$$V_{meas} = S(m_{Hdc} G)$$

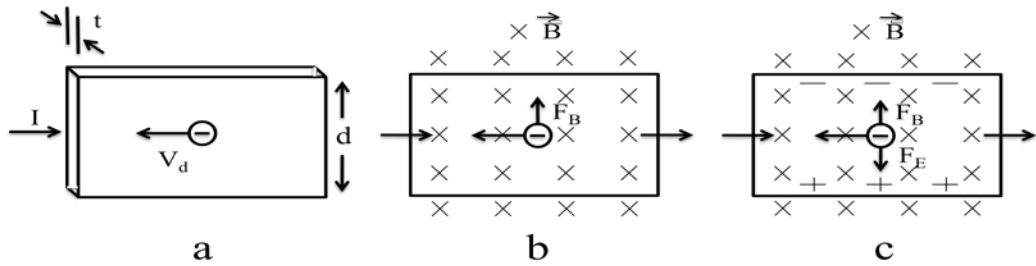
หรือ

$$m_{Hdc} = \frac{V_{meas}}{S(G)}$$

โดยการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดจากแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง และทราบค่าเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา ก็สามารถคำนวณหาค่าคงตัว  $S$  ของระบบตรวจวัดได้

### 3. ปรากฏการณ์ฮอลล์

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) พบว่าเมื่อแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ประจุพาหะในตัวนำจะเบนไปจากแนวทางเดิม ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขอบตัวนำซึ่งมีทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์



ภาพที่ 5 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

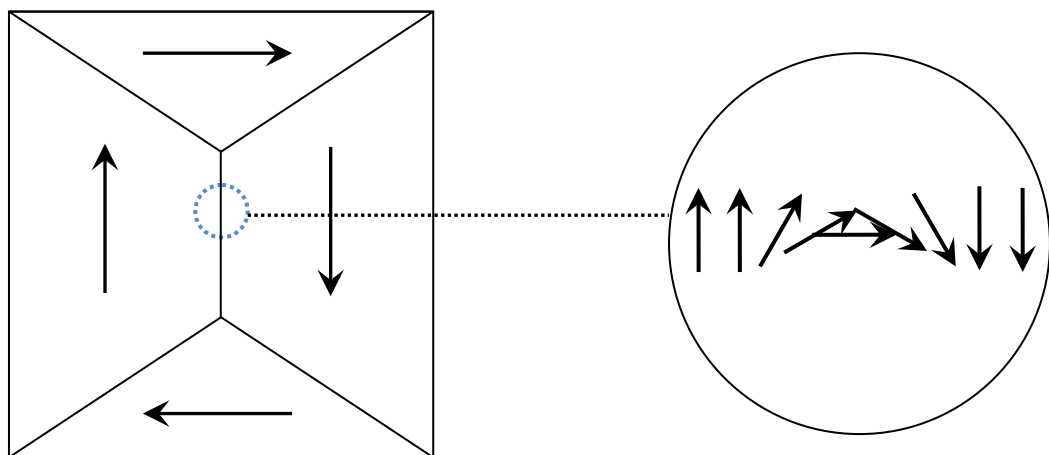
โดยความต่างศักย์ฮอลล์ที่ขอบของตัวนำจะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ดังสมการ

$$V_H = \frac{IB}{nqt}$$

โดย  $I$  แทนกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแผ่นวัสดุ  
 $B$  แทนสนามแม่เหล็ก  
 $n$  แทนความหนาแน่นประจุพาหะ  
 $q$  แทนประจุของพาหะ  
 $t$  แทนความหนาของแผ่นวัสดุ

#### 4. สารแม่เหล็กเฟอร์โร

สมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรเกิดจากความเป็นระเบียบทางแม่เหล็กภายในวัสดุ โดยภายในวัสดุที่แสดงสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรนั้นจะประกอบไปด้วยบริเวณที่อนุภาคแม่เหล็กย่อยๆ หรือโมเมนต์แม่เหล็กจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเรียกว่าโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain) ซึ่งภายในวัสดุชิ้นหนึ่งอาจจะประกอบด้วยโดเมนแม่เหล็กหลายโดเมน โดยที่โมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละโดเมนจะจัดเรียงตัวในทิศทางที่ต่างๆ กัน บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศของโมเมนต์จากทิศทางหนึ่งไปเป็นอีกทิศทางหนึ่งเรียกว่าผนังโดเมน (domain wall) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โดเมนแม่เหล็ก และผนังโดเมน

ในสถานะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอกแล้ว จะพบว่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิของวัสดุทั้งก้อนจะมีค่าน้อยมากๆ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  แก่วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแล้วจะส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กภายในแท่งวัสดุตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุสามารถบ่งบอกโดยใช้ค่าแมกนีไทเซชัน  $M$  ซึ่งมีค่าเท่ากับไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดย  $H$  และ  $M$  จะมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$M = \chi H$$

เมื่อ  $\chi$  แทนสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของวัสดุ และสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นภายในวัสดุ  $B$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$B = \mu_0(H + M)$$

หรือ

$$B = \mu_0(1 + \chi)H$$

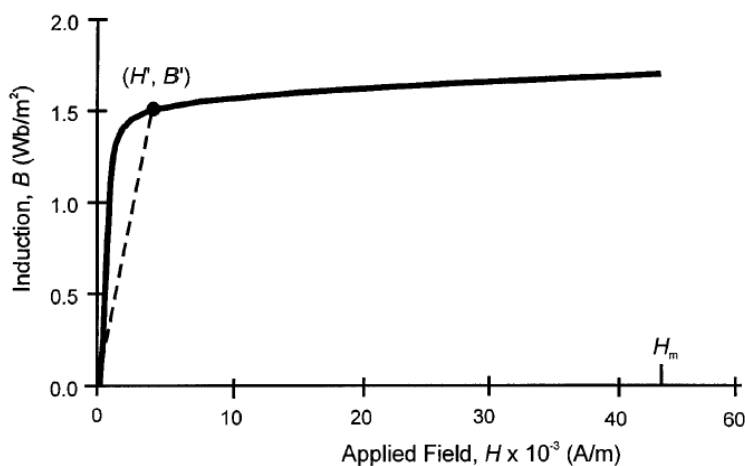
หรือ

$$B = \mu_0\mu_r H$$

เมื่อ  $\mu_0$  และ  $\mu_r$  แทนสภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability) ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ และสภาพให้ซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ของวัสดุ

### 5. กราฟฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

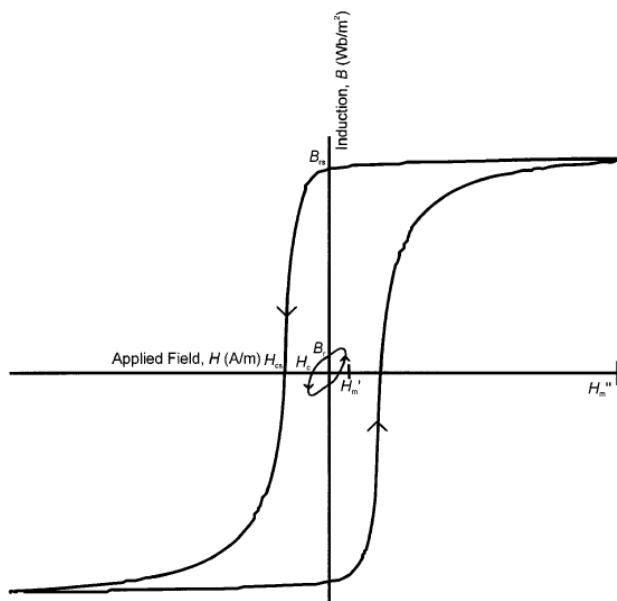
เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่สารแม่เหล็กเฟอร์โร (เรียกว่าการแมกนีไทซ์) โดเมนแม่เหล็กในทิศที่แมกนีไทเซชันชอบจัดแรงตัว และอยู่ในทิศใกล้เคียงกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก จะมีขนาดเพิ่มขึ้นในขณะที่โดเมนที่แมกนีไทเซชันชี้ในทิศอื่นๆ มีขนาดลดลง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  ของสารแม่เหล็กเฟอร์โรต่างๆ ไปแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  กับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  ของสารแม่เหล็กเฟอร์โร

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  กับ  $H$  ไม่เป็นเชิงเส้นยกเว้นในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำและสูงมากๆ ดังนั้นในการระบุค่าสภาพให้ซึมได้ของแม่เหล็กเหล็กเฟอร์โรนั้น จะต้องระบุค่าของสนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  ด้วย ค่าสภาพให้ซึมได้เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าใดๆ คือความชันของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุดดังกล่าวบนกราฟ  $B-H$  กับจุดกำเนิด ลักษณะเฉพาะอีกอย่างหนึ่งของสารแม่เหล็กเฟอร์โรที่สังเกตได้ในภาพที่ 7 คือการอิ่มตัว เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงเกินค่าที่แน่นอนค่าหนึ่งแล้วจะทำให้ความชันของกราฟแมกนีโตเซชันมีค่าคงตัว ซึ่งที่จุดดังกล่าวค่า  $M$  มีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่โมเมนต์แม่เหล็กทั้งหมดในสารแม่เหล็กเฟอร์โรจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกเรียกว่าสารแม่เหล็กเฟอร์โรมีการอิ่มตัวนั่นเอง

จากภาพที่ 8 เมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้อัตราเร็วให้ช้าลงน้อยกว่า  $H_M$  พบว่าเส้นกราฟของค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำจะไม่ซ้อนทับกับเส้นกราฟของค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงช้าระหว่าง  $H_M$  กับ  $-H_M$  เส้นกราฟของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กภายนอกจะซ้อนทับกัน แต่จะไม่ซ้อนทับกับเส้นกราฟของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดจากลดของสนามแม่เหล็กภายนอก ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  กับสนามแม่เหล็กภายนอก  $H$  แบบวนรอบสำหรับสารแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถแสดงโดยกราฟฮิสเทอรีซิสดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงฮิสเทอรีซิสในสารแม่เหล็กเฟอร์โร

กราฟในภาพที่ 8 จะประกอบด้วยกราฟฮิสเทอรีซิสสองกราฟซึ่งได้จากการวัดที่เป็นอิสระต่อกัน โดยวงที่อยู่ด้านในนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอกในช่วง  $H_M'$  ถึง  $-H_M'$  ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กในช่วงที่ยังไม่มากพอที่จะทำให้สารแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว ส่วนวงนอกนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกในช่วง  $H_M''$  ถึง  $-H_M''$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการอิ่มตัว กราฟฮิสเทอรีซิสทั้งสองจะมีความสมมาตรรอบจุดกำเนิดเมื่อ  $H_M = |-H_M|$  ในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้สารแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวนั้น เมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกจากค่าสูงสุดลงให้เป็นศูนย์นั้น ค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำของวัสดุจะไม่

เป็นศูนย์ เรียกค่าสนามแม่เหล็กดังกล่าวว่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เหลือ (residual induction,  $B_r$ ) และสำหรับกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากพอที่จะทำให้สนามแม่เหล็กมีการอ้อมตัวนั้น จะเรียกค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ว่าสภาพค้าง (retentivity,  $B_{rs}$ ) อย่างไรก็ตามทั้ง  $B_r$  และ  $B_{rs}$  เป็นค่าที่สังเกตได้ในช่วงเวลาสั้นๆ ในขณะที่แมกนีไทซ์สนามแม่เหล็ก แต่เมื่อนำสนามแม่เหล็กที่ให้แก่ตัวอย่างออกไปแล้ว  $B_r$  และ  $B_{rs}$  จะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าที่ค่าหนึ่งเรียกว่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำคงอยู่ (remanent induction) ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้วัดความเป็นแม่เหล็กถาวรของสารแม่เหล็กเฟอร์โร ในการลดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เป็นศูนย์นั้นสามารถทำได้โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศตรงกันข้าม เรียกสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ว่าสนามลบล้าง (coercive field) ในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งให้กับตัวอย่างมีค่ามากพอที่จะทำให้ตัวอย่างมีการอ้อมตัวจะเรียกสนามลบล้างดังกล่าวว่าสภาพลบล้างทางแม่เหล็ก (coercivity)

## 6. การตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน

เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน (lock-in amplifier) เป็นเครื่องวัดที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าน้อยๆ ในระดับนาโนโวลต์ได้อย่างแม่นยำ ถึงแม้ว่าสัญญาณที่ตรวจวัดจะเต็มไปด้วยสัญญาณรบกวนที่มีขนาดสูงกว่าสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดเป็นพันเท่าก็ตาม โดยขีดความสามารถดังกล่าวได้จากส่วนตรวจจับที่ไวต่อเฟสของสัญญาณ (phase-sensitive detector; PSD) เพื่อทำให้ได้อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่เดียวกับความถี่ของสัญญาณอ้างอิง และกำจัดสัญญาณความถี่อื่นๆ ออกไปไม่ให้ส่งผลต่อการวัด

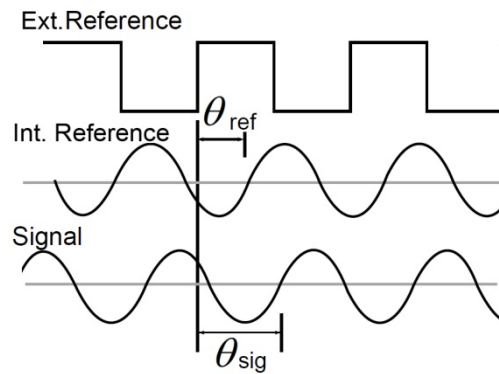
ในการตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินนั้น จำเป็นต้องจ่ายสัญญาณอ้างอิงให้กับเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินควบคู่ไปด้วย โดยสัญญาณดังกล่าวจะมีความถี่เดียวกับสัญญาณที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้แก่วงจร หรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ (ทั้งนี้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินบางรุ่นสามารถกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตสำหรับนำไปจ่ายให้กับวงจร หรืออุปกรณ์ได้) โดยสัญญาณดังกล่าวอาจจะได้จากซิว sync เอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณก็ได้ ถ้าหากสัญญาณรูปคลื่น sine จากเข้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณถูกจ่ายให้แก่วงจร ดังนั้นสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดจะเป็นรูปคลื่น sine เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจจะเขียนได้ดังสมการ

$$V_m = V_{sig} \sin(\omega_r t + \theta_{sig})$$

เมื่อ  $V_{sig}$  แทนแอมพลิจูดของสัญญาณ  $\omega_r$  แทนความถี่ และ  $\theta_{sig}$  แทนเฟสของสัญญาณ เมื่อได้รับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอกแล้ว เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินจะสร้างสัญญาณอ้างอิงภายในขึ้นอีกสัญญาณหนึ่งโดยอาศัยเทคนิคการล็อกเฟสของสัญญาณแบบป้อนกลับ (phase-locked-loop; PLL) ทำหน้าที่ล็อกสัญญาณที่สร้างขึ้นกับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอก ทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงภายในเครื่องเป็น

$$V_{in\_ref} = V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref})$$

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสาม จะได้ดังภาพ



ภาพที่ 9 แผนภาพเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงภายนอก สัญญาณที่ต้องการตรวจวัด และสัญญาณอ้างอิงภายในเครื่องวัด

เมื่อสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดผ่านขั้วอินพุทของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินเข้ามา สัญญาณดังกล่าวจะถูกขยายและคูณด้วยสัญญาณอ้างอิงที่สร้างขึ้นภายในเครื่องโดยอาศัยส่วนตรวจจับที่ไวต่อเฟสของสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุทจากส่วน PSD นี้จะมีค่าดังสมการ

$$V_{\text{psd}} = GV_{\text{sig}} V_L \sin(\omega_r t + \theta_{\text{sig}}) \sin(\omega_L t + \theta_{\text{ref}})$$

เมื่อ  $G$  แทนอัตราขยายสัญญาณ โดยอาศัยการกระจาย

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)]$$

จะได้

$$V_{\text{psd}} = \frac{1}{2} GV_{\text{sig}} V_L \cos[(\omega_r - \omega_L)t + \theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}}] - \frac{1}{2} GV_{\text{sig}} V_L \cos[(\omega_r + \omega_L)t + \theta_{\text{sig}} + \theta_{\text{ref}}]$$

จากสมการ สัญญาณเอาต์พุทจากส่วน PSD จะประกอบด้วยสัญญาณที่มีความถี่สองค่าคือ  $(\omega_r - \omega_L)$  และ  $(\omega_r + \omega_L)$  ถ้าหากให้สัญญาณจากส่วน PSD ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) และ  $\omega_r = \omega_L$  แล้ว สัญญาณที่ผ่านส่วนกรองสัญญาณจะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการ

$$V = \frac{1}{2} GV_{\text{sig}} V_L \cos(\theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}})$$

ในกรณีที่สัญญาณตรวจวัดไม่เป็นรูปคลื่น sine เพียงความถี่เดียว แต่ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย ส่วน PSD และส่วนกรองสัญญาณจะยังคงให้สัญญาณเอาต์พุทที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของสัญญาณอ้างอิงของล็อก-อิน ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ต่างไปจากความถี่ของสัญญาณอ้างอิงจะไม่ส่งผลต่อสัญญาณที่ตรวจวัดได้



4. เครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 13 เครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า (EM4-HVA; Lake Shore Cryogenics)

5. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์



ภาพที่ 14 (ก) เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก (455DSP; Lake Shore Cryogenics) และ (ข) หัววัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (HMMT-6J04-VR; Lake Shore Cryogenics) (ค) หัววัดสนามแม่เหล็กในแนวแกนแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (HMMA-2502-VR; Lake Shore Cryogenics)

6. แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น



ภาพที่ 15 แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

## 7. เครื่องล้างความถี่สูง



ภาพที่ 16 เครื่องล้างความถี่สูง (CMT-50H; Storehouse Intertrade Ltd.)

## 8. เครื่องชั่งความละเอียดสูง



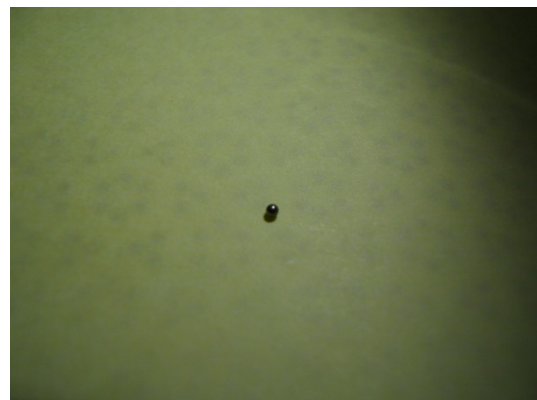
ภาพที่ 17 เครื่องชั่งความละเอียดสูง (105 XP; Mettler Toledo)

### 9. วัสดุอ้างอิงมาตรฐานโมเมนต์แม่เหล็ก



ภาพที่ 18 ทรงกลม Yttrium Iron Garnet (SRM 2853; National Institute of Standards and Technology) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm มวล 2.812 mg โมเมนต์แม่เหล็ก  $27.6 \pm 0.1$  emu/g ที่สนามแม่เหล็กภายนอก 5 kOe

### 10. ทรงกลมนิเกิล



ภาพที่ 19 ทรงกลมนิเกิลความบริสุทธิ์ 99 % ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm (651-465; Lake Shore Cryogenics)

11. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก



ภาพที่ 20 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก (A45V; Asus)

12. โปรแกรมสำหรับเชื่อมต่อเครื่องมือวัดกับคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 21 โปรแกรมสำหรับเชื่อมต่อเครื่องมือวัดกับคอมพิวเตอร์ VEE OneLab Version 6.01 (Agilent Technologies)

## วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

โครงการนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กเทคนิค AGM โดยมีขั้นตอนหลักๆ ในการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์ตรวจวัดการสั่นแบบเพียโซอิเล็กทริก เพื่อนำข้อมูลไปประกอบในการออกแบบวงจรสำหรับตรวจวัดการสั่นของวัสดุที่ขึ้นกับสมบัติทางแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุดังกล่าว
2. ออกแบบและสร้างขดลวดรวมทั้งวงจรสำหรับขยายสัญญาณเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ ระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุ
3. ออกแบบและสร้างแท่งควอตซ์สำหรับติดตั้งวัสดุแม่เหล็กที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นจึงประกอบแท่งแก้วควอตซ์กับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
4. ออกแบบและสร้างชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้อลูมิเนียม
5. ติดตั้งขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์สลับ เซ็นเซอร์พร้อมแท่งควอตซ์ เข้ากับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า-แม่เหล็กของวัสดุ
6. ทดสอบการทำงานของระบบ โดยการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กที่ทราบสมบัติที่แน่นอนโดยใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินTEGRAL สั่นของเพียโซอิเล็กทริก และใช้เกาส์มิเตอร์วัดสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่วัสดุ
7. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องวัด เพื่อวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยการแสดงผลการวัดในรูปแบบของกราฟสีทเทอรีซิส
8. วัดและวิเคราะห์ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุอ้างอิง เทียบมาตรฐานปริมาณที่วัดได้โดยระบบที่สร้างขึ้นกับปริมาณที่ระบุของวัสดุอ้างอิง และทดสอบประสิทธิภาพในการวัดของแมกนีโตมิเตอร์แบบ AGM ที่สร้างขึ้น โดยวัดสมบัติเฉพาะต่างๆ ของระบบ
  - 1) ช่วงของการทำงาน (range)
  - 2) ความคลาดเคลื่อน (error)
  - 3) ความละเอียด (resolution)
  - 4) ความซ้ำ (repeatability)
  - 5) ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

**สถานที่ทำการวิจัย** ห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก และห้องพัฒนาอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### ตารางสรุปผลการดำเนินงานของโครงการที่ดำเนินไปแล้ว

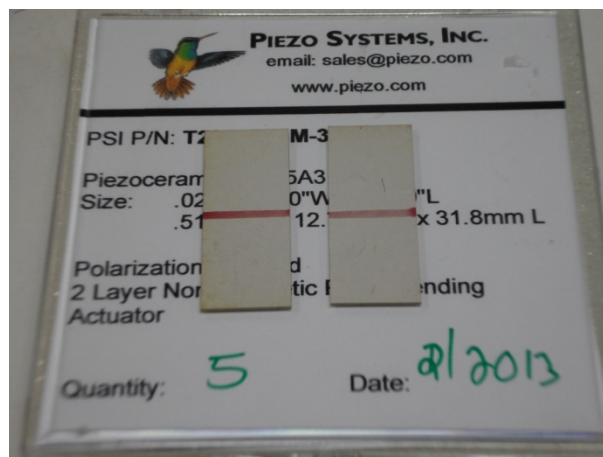
กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน (%)
1) จัดหาวัสดุเพียโซ ออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดการสั่นและระบบสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์	- วัสดุเพียโซสำหรับตรวจวัดแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุ - ระบบสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์	- ได้แผ่นวัสดุเพียโซชนิดที่ไม่มีสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์เป็นส่วนประกอบ (100%) - ได้ระบบสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์ประกอบด้วยขดลวดแหล่ง และเครื่องขยายกระแสไฟฟ้า (100%)
2) ออกแบบและสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์	เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ	เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำที่มีขั้วเอ๊าท์พุทสามารถต่อเข้ากับดิจิตอลมัลติมิเตอร์เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ (100%)
3) ออกแบบและสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน	เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน	ปรับใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน รุ่น SR830
4) ออกแบบและสร้างชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้า	ชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม	ชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม (100%)
5) ติดตั้งแม่เหล็กไฟฟ้าและส่วนประกอบต่างๆ ลงบนชั้นวางแม่เหล็ก	ผลการติดตั้งอุปกรณ์บนชั้นวาง	แม่เหล็กไฟฟ้า ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ โพรบตรวจวัดการสั่นของวัสดุ สามารถติดตั้งบนชั้นแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์ (100%)
6) เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลสัญญาณ	โปรแกรมควบคุมการทำงานประมวลผล และแสดงผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็ก	โปรแกรมควบคุมการทำงานประมวลผล และแสดงผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็ก (100%)
7) วัดและวิเคราะห์ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุอ้างอิงเพื่อปรับเทียบระบบ	ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุอ้างอิง เพื่อปรับเทียบระบบ	ความไวของระบบ และประสิทธิภาพในการตรวจวัดของระบบ (100%)
8) สรุปและทำรายงานผลการวิจัย	รายงานการวิจัย	รายงานการวิจัย (100%)

## รายละเอียดผลการวิจัย

### 1. จัดหาวัสดุเพียโซ ออกแบบ และสร้างระบบตรวจวัดการสั่น และระบบสร้างสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์

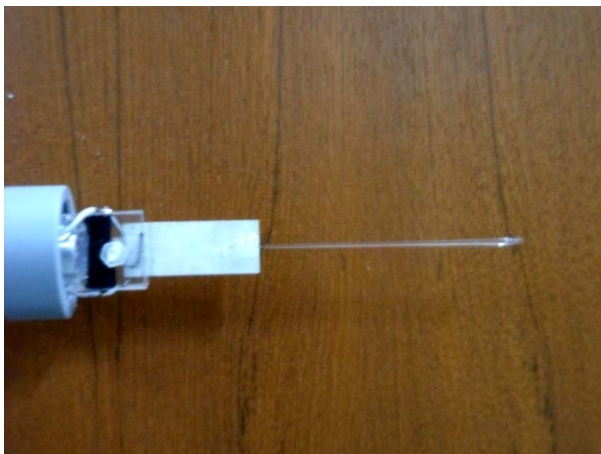
#### 1.1 ระบบตรวจวัดการสั่น

วัสดุที่ใช้ในการตรวจวัดการสั่นของตัวอย่างที่ขึ้นกับสมบัติแม่เหล็กของวัสดุใช้หลักการเปลี่ยนรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเมื่อมีแรงกระทำต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง และเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งเคลือบอยู่ที่ผิวทั้งสองด้าน เนื่องจากจะต้องติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเลือกใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ไม่มีส่วนประกอบที่เป็นสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ในการทำโพรงตรวจวัดการสั่นของตัวอย่าง โดยมีขนาด  $12.7 \times 31.8 \times 0.51 \text{ mm}^3$  ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 Non-magnetic PZT bimorph (T220-A3NM-303X; Piezo System) สำหรับตรวจวัดการสั่นของตัวอย่าง

แผ่นเพียโซเซรามิกถูกนำไปต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดความต่างศักย์ที่ปลายด้านหนึ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งแกว้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 mm ยาวประมาณ 6 cm โดยใช้กาวอีพ็อกซี เพื่อใช้ในการติดตั้งวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 23



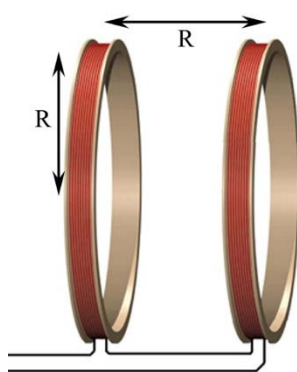
ภาพที่ 23 โพรบตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุโดยอาศัยแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวอย่าง

## 1.2 ระบบสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ

ประกอบด้วยขดลวด และวงจรขยายกระแสที่มีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

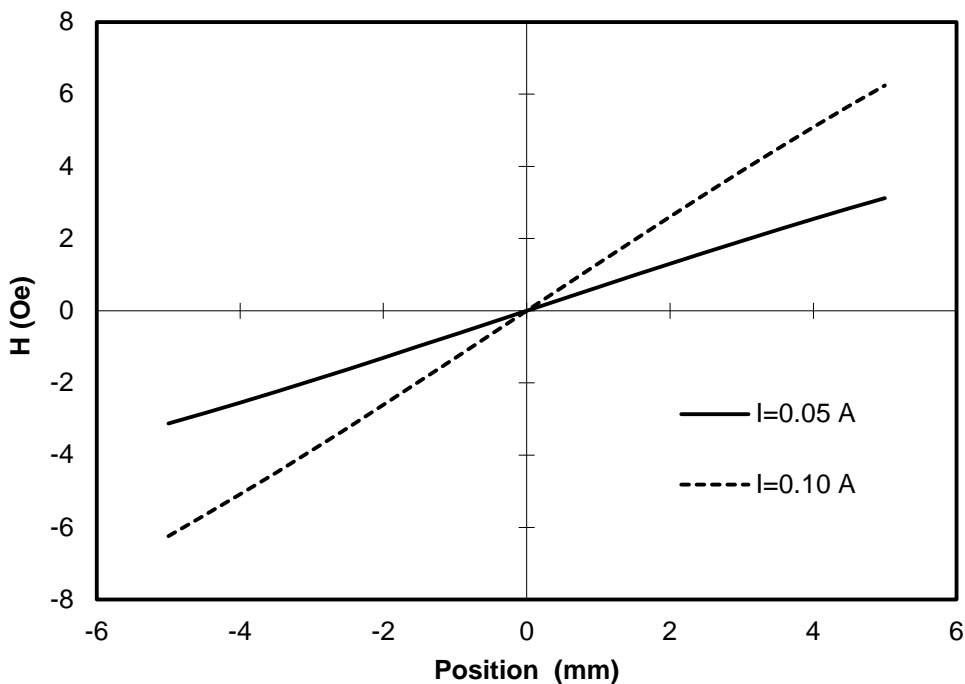
### 1.2.1 ขดลวด

ขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ประกอบด้วยขดลวดสองขดที่มีขนาดและจำนวนรอบเท่ากัน ต่อกันแบบอนุกรมในลักษณะที่ทำให้กระแสในขดลวดทั้งสองวนในทิศที่สวนกัน ทำให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตำแหน่งในแนวแกนของขดลวดแบบเชิงเส้น หรือเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กในแนวแกนมีค่าคงตัวนั่นเอง



ภาพที่ 24 ขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ

เพื่อให้สามารถติดตั้งขดลวดบนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าขนาด 3 นิ้วได้ จึงพันขดลวดแต่ละขดด้วยลวดทองแดงอาบน้ำยาเบอร์ AWG เป็นจำนวน 644 รอบ มีรัศมีเฉลี่ย 2.30 cm เมื่อคำนวณสนามแม่เหล็กในแนวแกนที่ตำแหน่งต่างๆ จะเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งดังภาพที่ 25



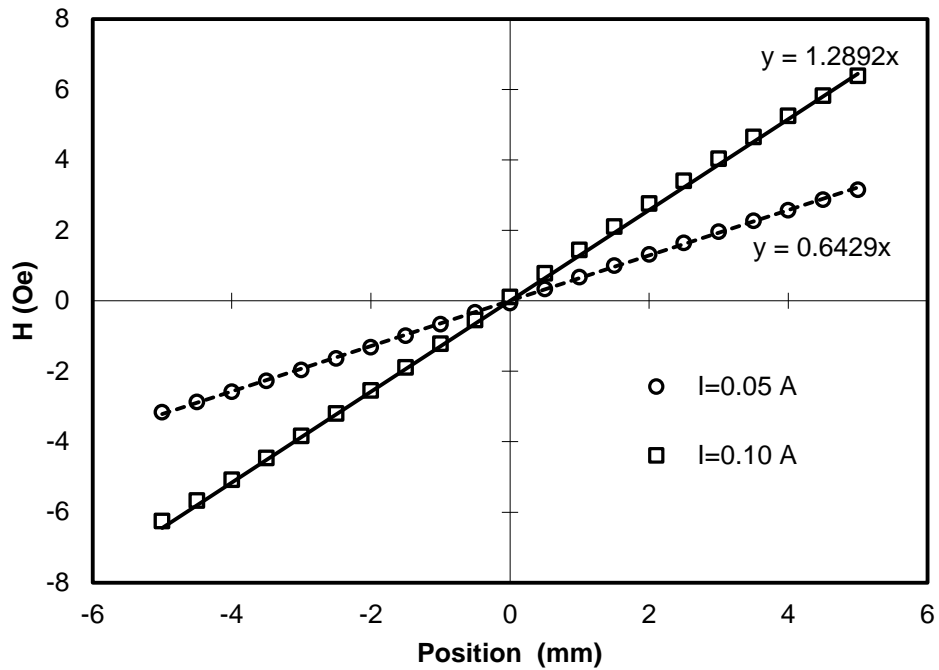
ภาพที่ 25 สนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ เมื่อรัศมี  $R=2.30$  cm แต่ละขดมีจำนวนรอบ 644 รอบ

เพื่อกำจัดผลกระทบที่อาจเกิดจากแกนขดลวดต่อสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่ต้องการตรวจวัด ในการสร้างขดลวดเกรเดียนท์ครั้งนี้จึงใช้ Polyacetel (POM) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความคงทน และขึ้นรูปได้ง่ายเป็นแกน โดยขดลวดที่ได้มีลักษณะดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ภาพขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์

ในการทดสอบสมบัติของขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ กระแสไฟฟ้า DC จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าถูกจ่ายให้แก่ขดลวด และสนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวดที่ตำแหน่งต่างๆ (เทียบกับกึ่งกลางขดลวด) ถูกตรวจวัดโดยโพรบวัดสนามแม่เหล็กในแนวแกนแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ร่วมกับเกาส์มิเตอร์ ได้ผลดังภาพที่ 27

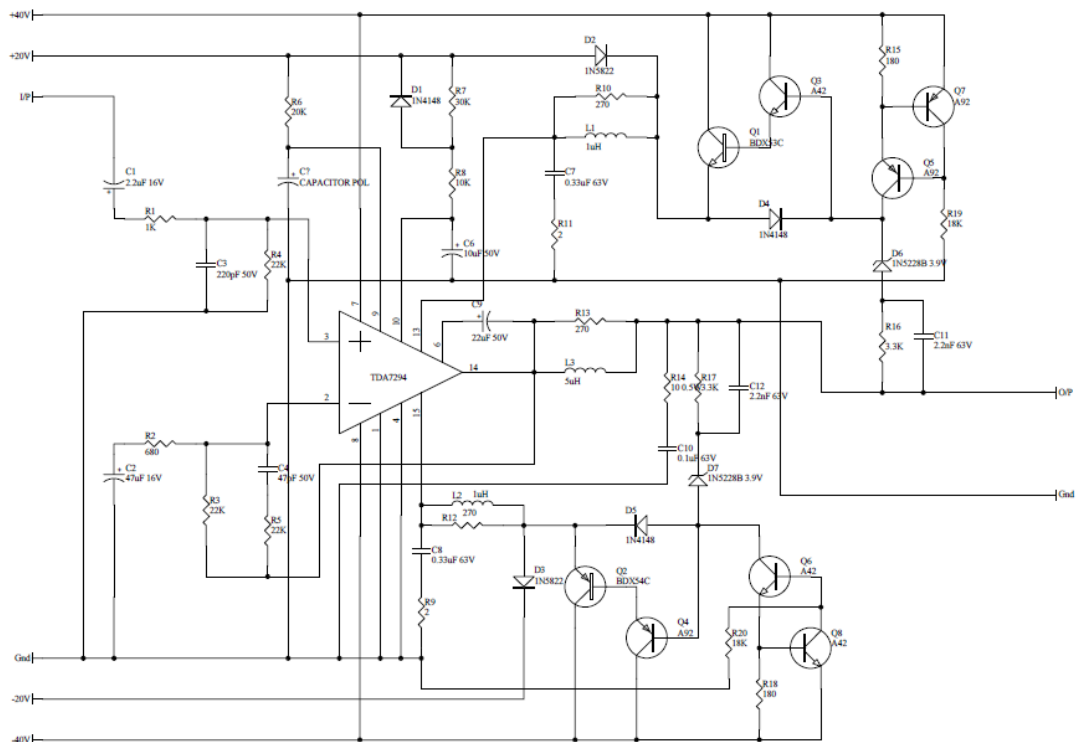


ภาพที่ 27 สนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์

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

### 1.2.2 วงจรขยายกระแส

วงจรสำหรับขยายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับถูกออกแบบโดยใช้วงจรรวม DMOS Audio amplifier หมายเลข TDA7294 (STMicroelectronics) และอุปกรณ์สำหรับต่อประกอบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แผนภาพวงจรส่วนเครื่องขยายกระแสไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ



ภาพที่ 29 เครื่องขยายกระแสไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ

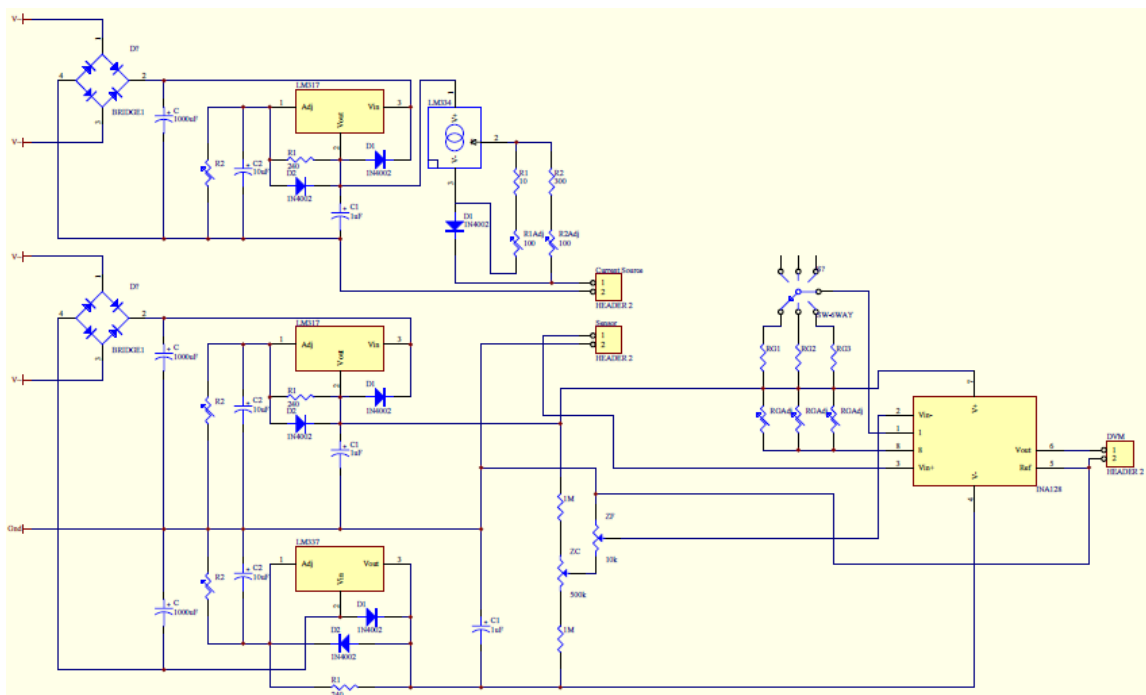
จากการทดสอบเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นกระแสไฟฟ้าของวงจรขยายกระแสในช่วงความต่างศักย์ 0.100 - 0.900 V ความถี่ 55.00 - 90.00 Hz พบว่ามีสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นกระแส  $0.0661 \pm 0.0007 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$  หรือคิดเป็นสัมประสิทธิ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็ก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

## 2. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์

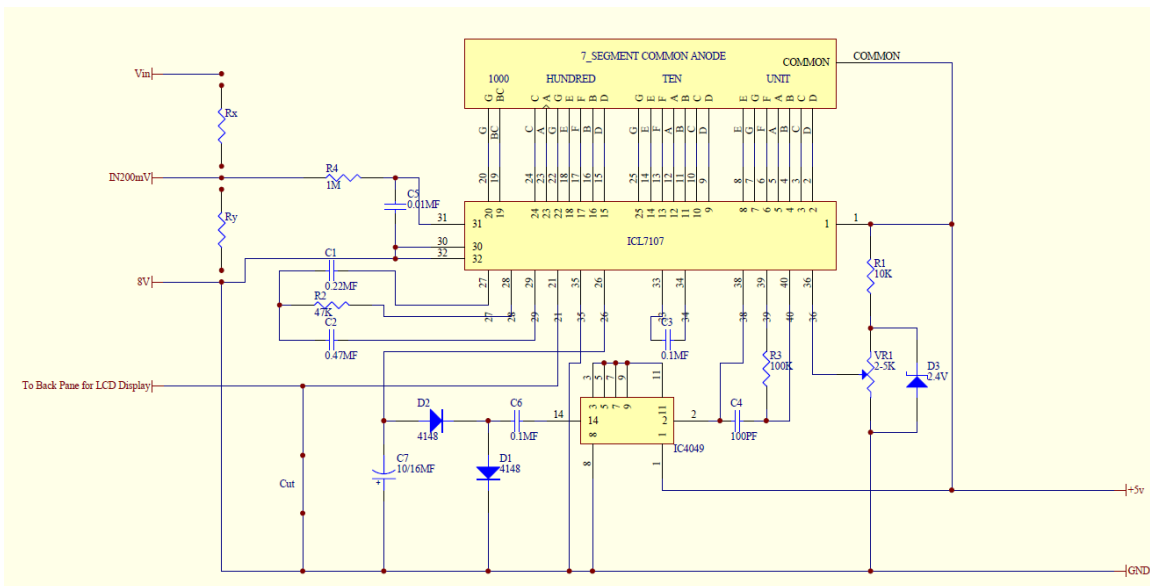
เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- 1) โพรบวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น HGT2100 (Lake Shore Cryogenics)
- 2) แหล่งจ่ายกระแสคงตัวโดยใช้วงจรรวม Programmable Current Source หมายเลข LT3092
- 3) วงจรขยายโดยใช้วงจรรวม Instrumentation amplifier หมายเลข INA128
- 4) ส่วนวัดความต่างศักย์จากเซ็นเซอร์โดยใช้วงจรรวม 31/2 digit A/D converters หมายเลข ICL7107

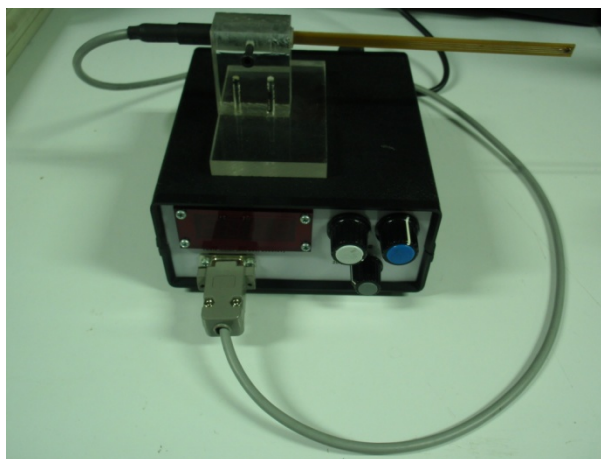
โดยแผนภาพวงจรของส่วนแหล่งจ่ายความต่างศักย์ แหล่งจ่ายกระแส และส่วนขยายสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 30 ส่วนวัดและแสดงผลความต่างศักย์แสดงดังภาพที่ 31 และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างแล้วเสร็จพร้อมโพรบแสดงดังภาพที่ 32 ตามลำดับ



ภาพที่ 30 แผนภาพวงจรส่วนแหล่งจ่ายความต่างศักย์ ส่วนแหล่งจ่ายกระแส และส่วนขยายสัญญาณของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

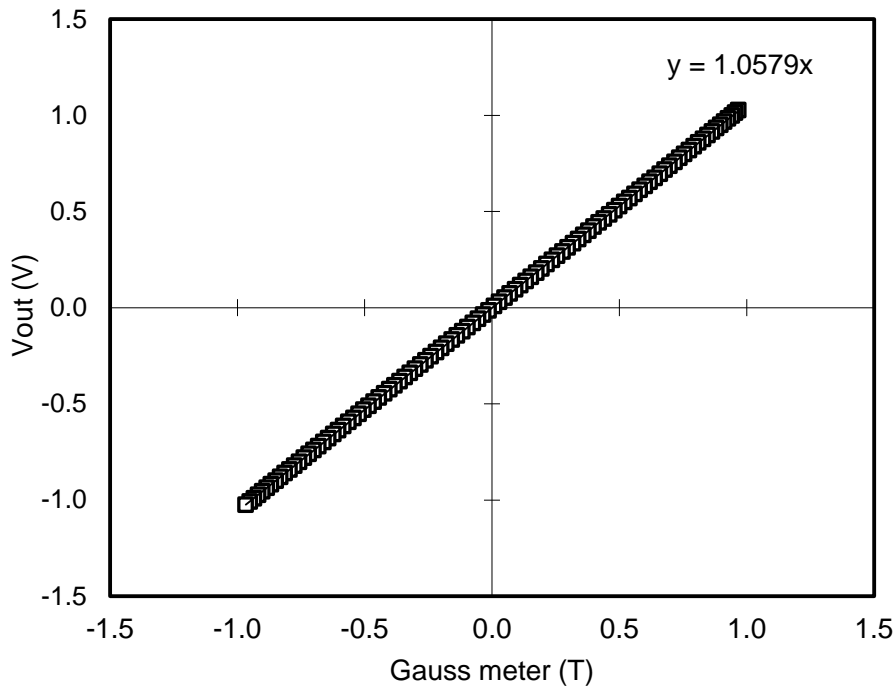


ภาพที่ 31 แผนภาพวงจรส่วนวัดและแสดงผลความต่างศักย์ ของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 32 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมโพรบ

เมื่อทดสอบสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น โดยการวัดสนามแม่เหล็กที่กำเนิดโดยเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง 1 T เทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเกาส์มิเตอร์รุ่น 455DSP ซึ่งใช้โพรบวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก ได้ผลดังภาพที่ 33

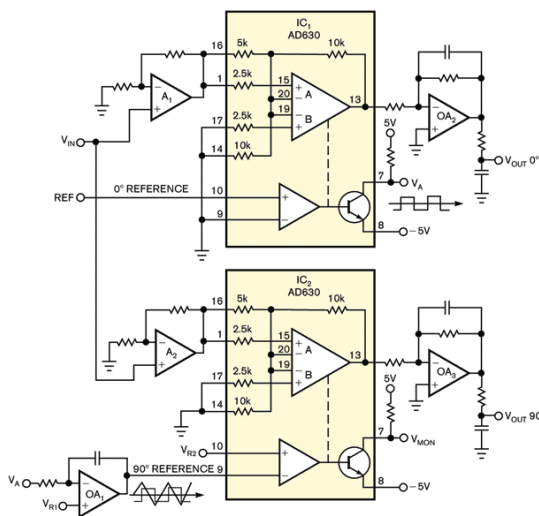


ภาพที่ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์เอาท์พุทกับสนามแม่เหล็กที่ตรวจวัด

จากผลการวัดที่ได้พบว่าความต่างศักย์เอาท์พุทจากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเกาส์มิเตอร์อยู่ประมาณ 5.8% ซึ่งสามารถปรับให้มิต่ำกว่านี้ได้โดยการปรับส่วนขยายของสัญญาณเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น (จะดำเนินการในลำดับต่อไป)

### 3. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน

เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินถูกออกแบบโดยใช้วงจรรวม หมายเลข AD630 (Analog devices) แผ่นภาพวงจรที่ใช้แสดงดังภาพที่ 34

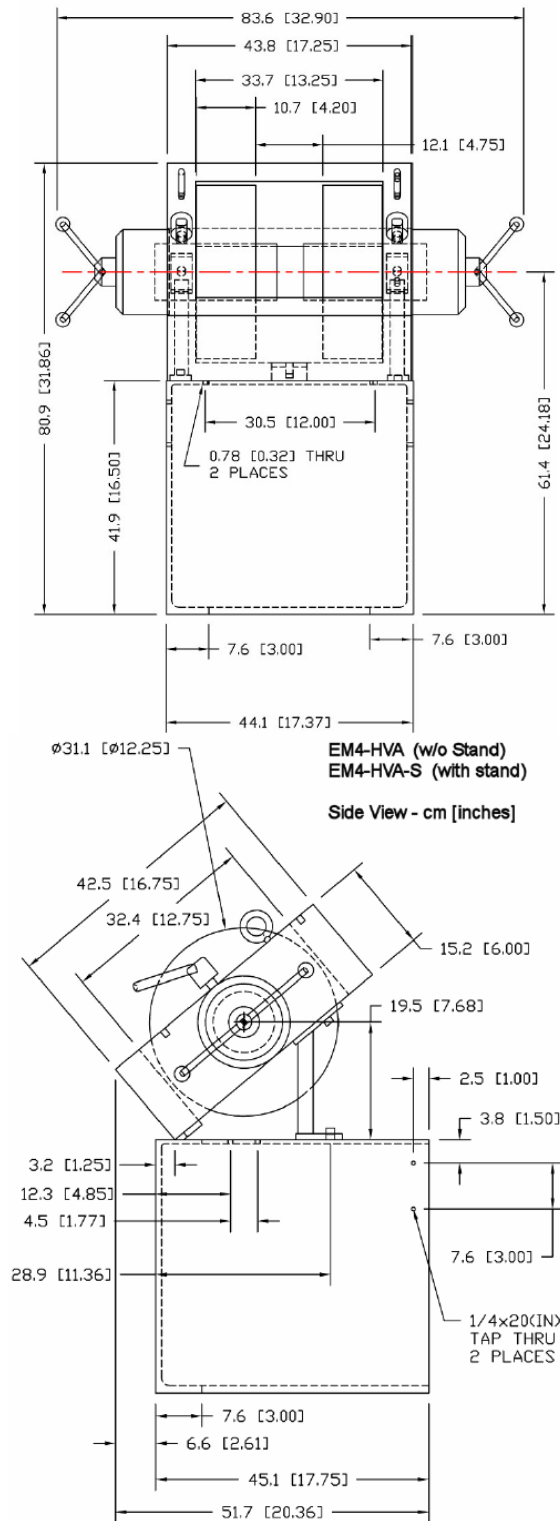


ภาพที่ 34 แผ่นภาพวงจรเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน

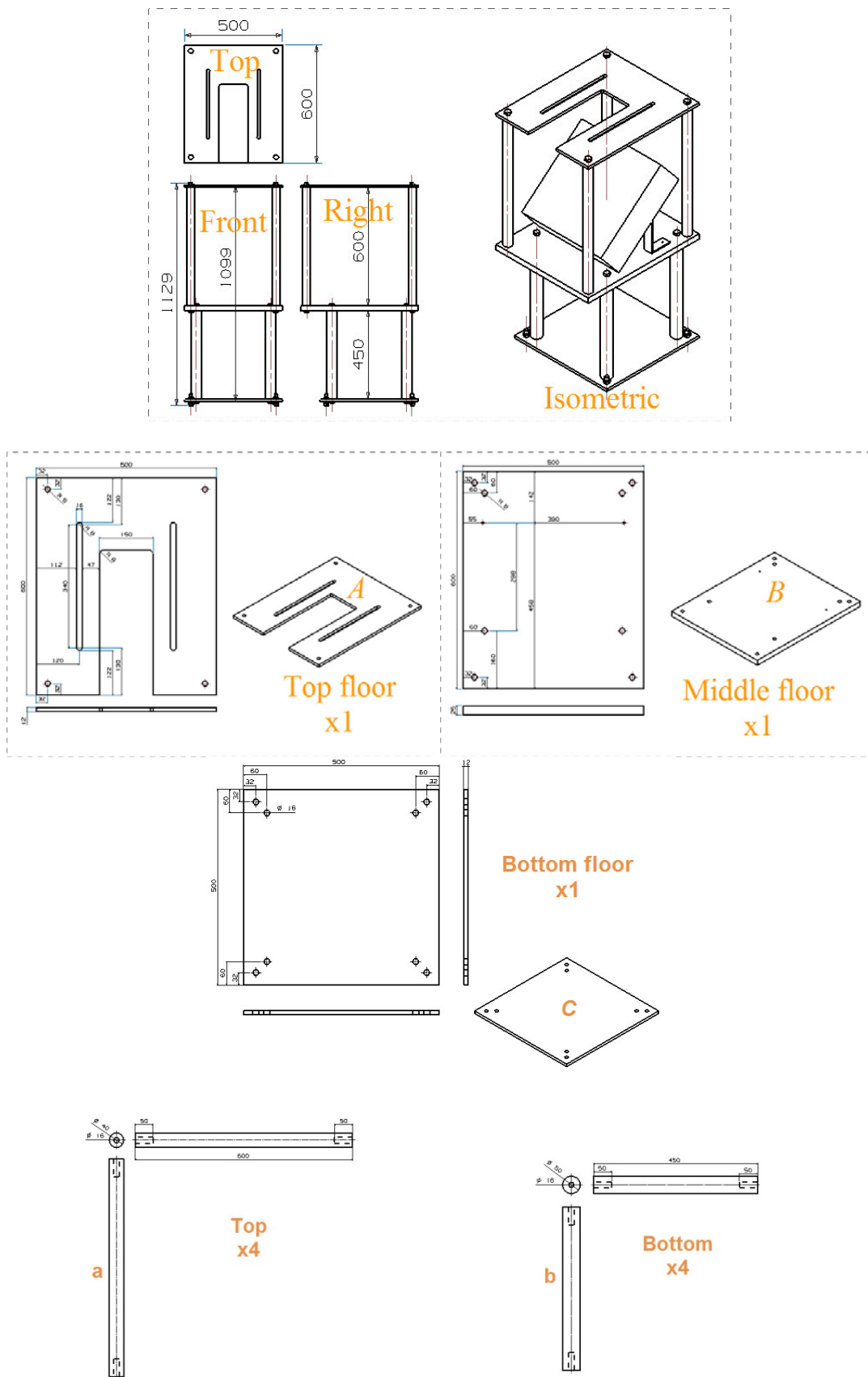
เนื่องจากเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินที่สร้างขึ้นยังไม่สามารถตรวจวัดได้ถูกต้องตามที่วางแผนไว้ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อแผนการวิจัยโดยรวม ผู้วิจัยจึงได้ใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบ ล็อก-อิน รุ่น SR830 (Stanford Research) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของระบบเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็ก ac susceptometer ของภาควิชาฟิสิกส์ทดแทน

#### 4. ออกแบบและสร้างชั้นวางแม่เหล็กไฟฟ้า

ชั้นวางแม่เหล็กและอุปกรณ์ถูกออกแบบให้มีขนาดและความแข็งแรงสามารถวางเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า และโพรบตรวจวัดการสั่นของวัสดุแม่เหล็กได้ โดยขนาดของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 แผนภาพแสดงขนาดของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่น EM4-HVA (LakeShore)



ภาพที่ 36 แผนภาพแสดงรายละเอียดส่วนประกอบของชั้นวางแม่เหล็ก

แผ่นและแท่งอลูมิเนียมถูกตัดและกลึงจนได้ขนาดตามที่ออกแบบ และประกอบด้วยกันโดยใช้น็อตอลูมิเนียมดังแสดงในภาพที่ 37



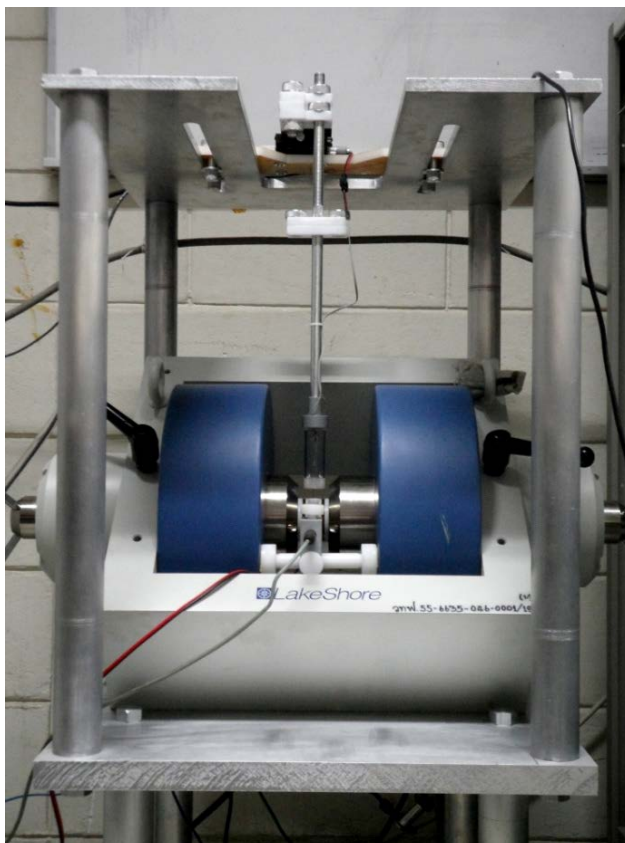
ภาพที่ 37 ภาพชั้นวางแม่เหล็กที่สร้างจากอลูมิเนียม

#### 5. ติดตั้งแม่เหล็กไฟฟ้าและส่วนประกอบต่างๆ ลงบนชั้นวางแม่เหล็ก

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกติดตั้งลงบนชั้นวางแม่เหล็กประกอบด้วย

- 1) เครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ
- 3) โพรบตรวจวัดการสั่นของวัสดุแม่เหล็ก
- 4) ตัวเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x-y
- 5) โพรบวัดสนามแม่เหล็ก

โดยอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวสามารถติดตั้งลงบนชั้นวางได้ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ ดังแสดงในภาพที่ 38



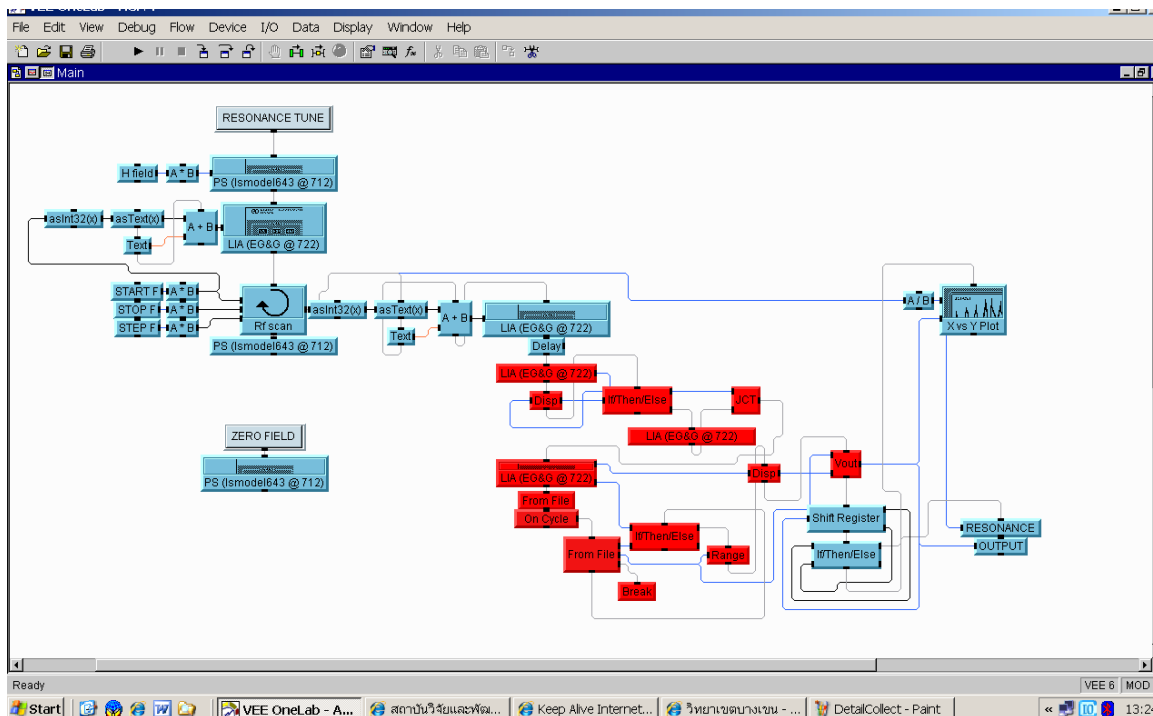
ภาพที่ 38 ภาพแม่เหล็กไฟฟ้าและส่วนประกอบต่างๆ ที่ถูกติดตั้งลงบนชั้นวางแม่เหล็ก

## 6. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลสัญญาณ

การตรวจวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับจำเป็นต้องมีการควบคุมการทำงานของส่วนต่างๆ ดังนี้

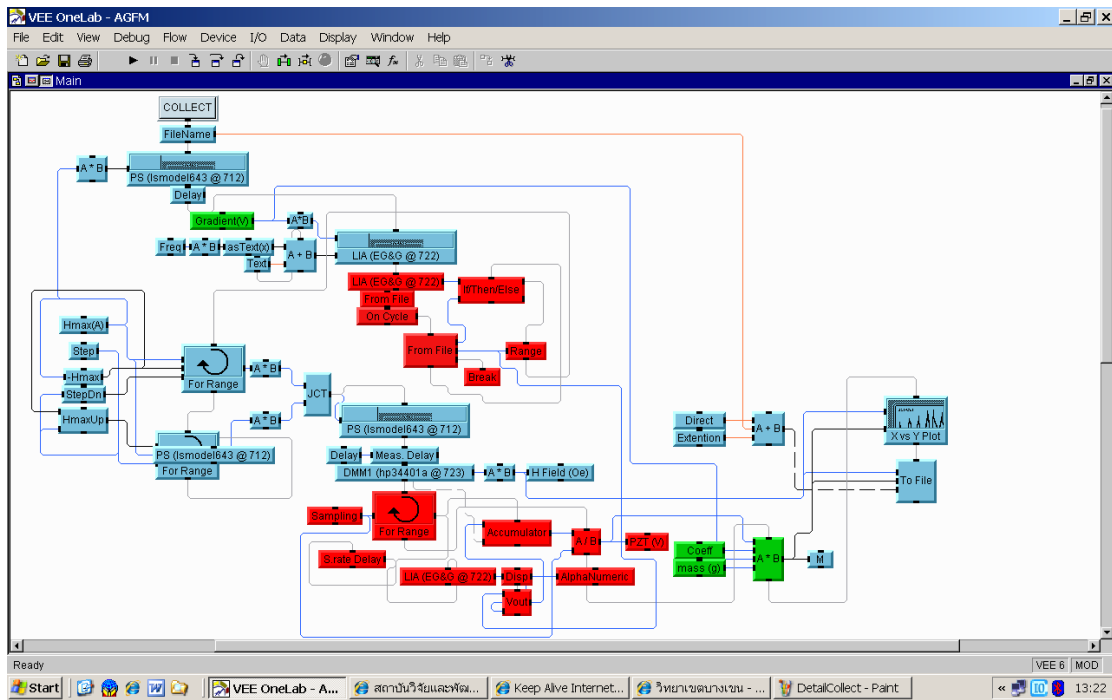
- 1) เครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2) ระบบกำเนิดแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ
- 3) ระบบตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ผ่านวัสดุตัวอย่าง
- 4) ระบบตรวจวัดความต่างศักย์ที่เกิดจากการสั้นของแผ่นเพียโซเซรามิก

เครื่องวัดจะถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต IEEE-488 และใช้โปรแกรม VEE OneLab Version 6.01 ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบกราฟิกในการควบคุมเครื่องวัด การประมวลผล และการแสดงผลการวัด โดยในการตรวจวัดจะแบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ กล่าวคือการปรับหาความถี่เรโซแนนซ์ในการสั้นของตัวอย่าง และการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุซึ่งจะตรวจวัดที่ความถี่เรโซแนนซ์โดยรายละเอียดของโปรแกรม และหน้าต่างโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 41



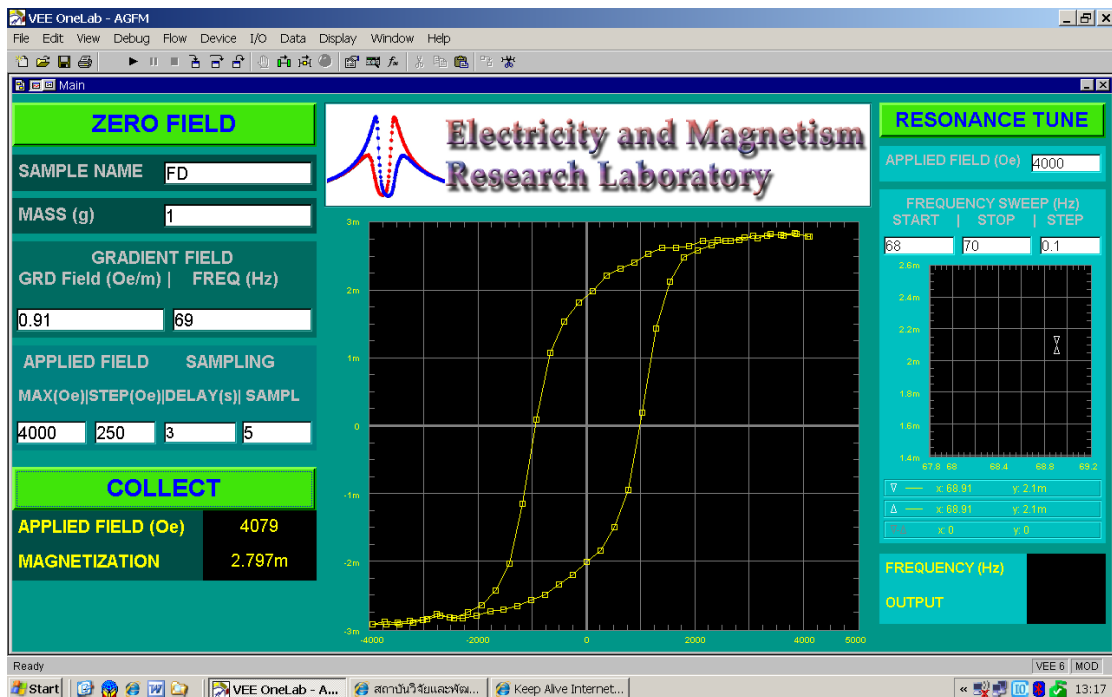
ภาพที่ 39 รายละเอียดโปรแกรมสำหรับปรับหาความถี่เรโซแนนซ์

ในการทำงานของโปรแกรม แอมพลิจูดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบ ล็อก-อิน ถูกกำหนดเพื่อจ่ายให้กับเครื่องขยายกระแสที่ต่ออยู่กับขดลวดเพื่อสร้างสนามเกรเดียนท์ สลับตามที่ต้องการ จากนั้นจะกำหนดช่วงความถี่ของสัญญาณที่ต้องการตรวจวัดเพื่อตรวจหาความถี่ที่ ทำให้ตัวอย่างสั้นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด ความต่างศักย์ที่ขั้วของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเกิดจากการสั่น ของวัสดุตัวอย่างภายใต้สนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนท์สลับถูกตรวจวัดได้ด้วยเครื่องวัดและขยาย สัญญาณแบบล็อก-อินเพื่อหาความถี่ที่มีการสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด (ความต่างศักย์มีค่าสูงสุด) เมื่อได้ ความถี่เรโซแนนซ์แล้ว ความถี่ดังกล่าวถูกนำไปกำหนดให้กับโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจวัดสมบัติ แม่เหล็กของวัสดุ เพื่อทำการวัดค่าแมกนีไทเซชันที่สนามแม่เหล็กภายนอกต่างๆ กันดังโปรแกรมใน ภาพที่ 40



ภาพที่ 40 รายละเอียดโปรแกรมสำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล ประมวลผลและแสดงผลการวัดสมบัติแม่เหล็ก

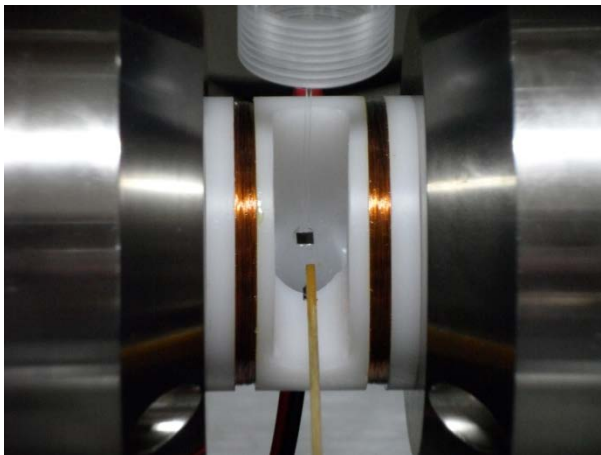
เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และหลีกเลี่ยงการแก้ไขโปรแกรมโดยมิได้ตั้งใจของผู้ใช้งาน จึงกำหนดให้ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นเฉพาะส่วนของโปรแกรมที่ผู้ใช้ต้องป้อนให้กับโปรแกรม และส่วนแสดงผลเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 หน้าต่างโปรแกรมแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ

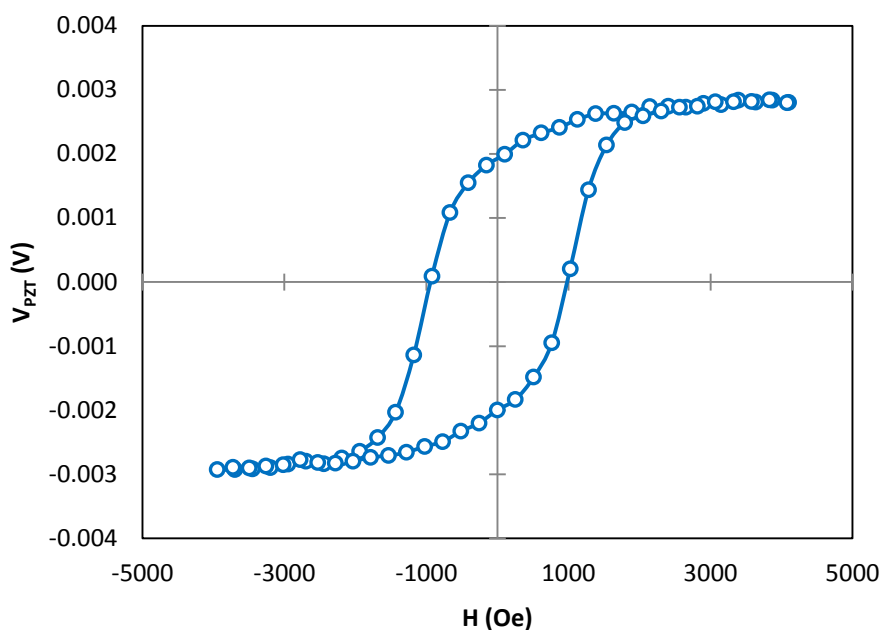
## 8. วัดและวิเคราะห์ผลการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระบบ

การทำงานของระบบตรวจวัดถูกทดสอบในเบื้องต้นโดยการวัดสมบัติแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk โดยแผ่นบันทึกข้อมูลถูกตัดให้มีขนาดประมาณ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  และติดตั้งลงบนแท่งแก้วของโพรบตรวจวัด จากนั้นจึงนำโพรบไปติดตั้งระหว่างขดลวดและแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อตรวจวัดสมบัติแม่เหล็ก

โดยในเบื้องต้นจะวัดความต่างศักย์ที่ได้จากส่วนตรวจวัดการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุโดยใช้เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H$ ) ที่ใช้ในการแมกนีไทซ์วัสดุ มีค่าต่างๆ กันเมื่อนำผลการวัดที่ได้ซึ่งถูกบันทึกเอาไว้ในไฟล์นามสกุล xls ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ ได้ผลดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk

จากกราฟฮิสเทอริซิสที่ได้ในภาพที่ 43 พบว่าในเบื้องต้นระบบสามารถตรวจสอบแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk ซึ่งมีชั้นของสารแม่เหล็กที่มีความหนา 1.2 ถึง 3.0  $\mu\text{m}$  ได้เป็นอย่างดี

### 8.1 การหาค่าคงตัวของระบบ

ระบบตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่สร้างขึ้นถูกสอบเทียบกับวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน (standard reference materials) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ หรือค่าคงตัวของระบบ ( $S$ ) เพื่อใช้ในการแปลงความต่างศักย์ที่ตรวจวัดได้โดยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินเป็นค่าโมเมนต์แม่เหล็ก หรือค่าแมกนีไทเซชัน (ในกรณีที่ทราบปริมาตร หรือมวล) ของวัสดุที่ตรวจวัด ซึ่งจากผลการสอบเทียบระบบโดยใช้วัสดุอ้างอิงมาตรฐานชนิด Yttrium Iron Garnet (YIG) รุ่น SRM 2853 ขนาด 1 mm มวล 2.812 mg ผลิตโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ซึ่งมีโมเมนต์แม่เหล็ก  $27.6 \pm 0.1$  emu/g พบว่าค่าคงตัวของระบบซึ่งสอบเทียบที่สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ  $1 \text{ Oe cm}^{-1}$  มีค่าเป็น  $0.7367 \text{ V emu}^{-1} \text{ Oe}^{-1}$

### 8.2 ทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ

ประสิทธิภาพในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุถูกทดสอบโดยการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของทรงกลมนิเกิล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm รุ่น 651-465 ผลิตโดย Lake Shore Cryogenics โดยในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในครั้งนี้จะตรวจวัดในรูปแบบของกราฟฮิสเทอริซิสภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก  $\pm 5.25 \text{ kOe}$  โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกครั้งละ  $25 \text{ Oe}$  กำหนดช่วงเวลารอก่อนการวัด 1 s (หลังจากเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก) และค่าคงตัวของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบ ล็อก-อินถูกตั้งไว้ที่ 300 ms

#### 8.2.1 ความไม่แน่นอน

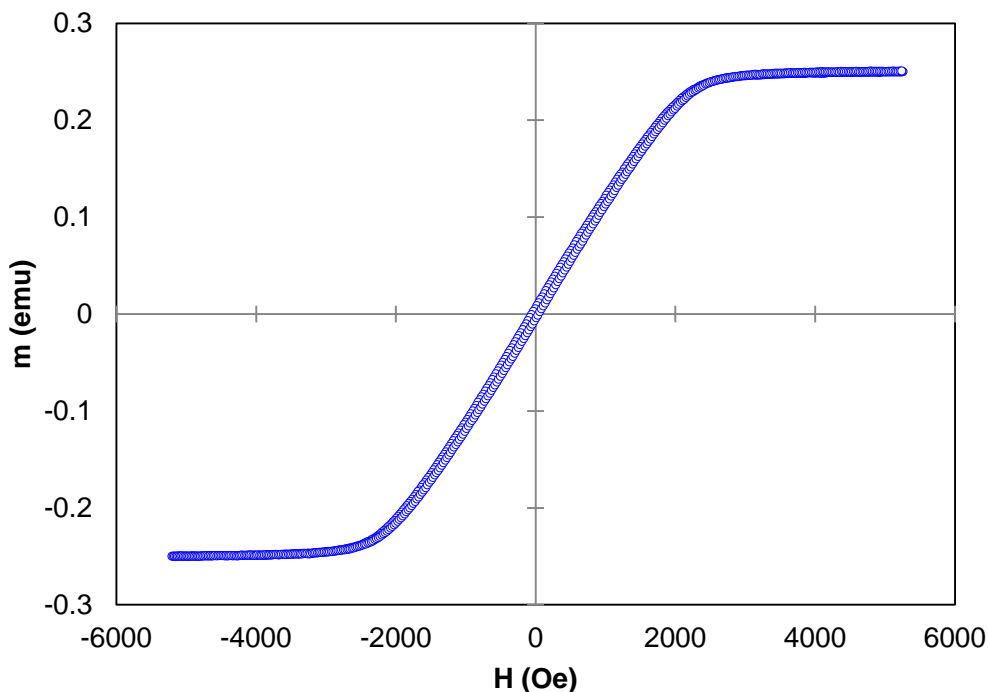
ความไม่แน่นอนในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (uncertainty;  $u_n$ ) กำหนดโดย [7]

$$u_n = \frac{1}{SNR}$$

เมื่อ  $SNR$  คืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio;  $SNR$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟฮิสเทอริซิส โดย

$$SNR = \frac{2m_s}{\sqrt{\langle \delta_m^2 \rangle}}$$

เมื่อ  $m_s$  แทนค่าเฉลี่ยของขนาดโมเมนต์แม่เหล็กเมื่อวัสดุมีการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก ( $2m_s$  แทนแอมพลิจูดของกราฟฮิสเทอรีซิส) และ  $\delta_m$  แทนผลต่างของค่าโมเมนต์แม่เหล็กกับโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยในช่วงที่มีการอิ่มตัว



ภาพที่ 44 กราฟฮิสเทอรีซิสของทรงกลมนิเกิลเมื่อตรวจวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์  $1 \text{ Oe cm}^{-1}$

จากกราฟฮิสเทอรีซิสในภาพที่ 44 สามารถคำนวณหาค่าของปริมาณที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 1

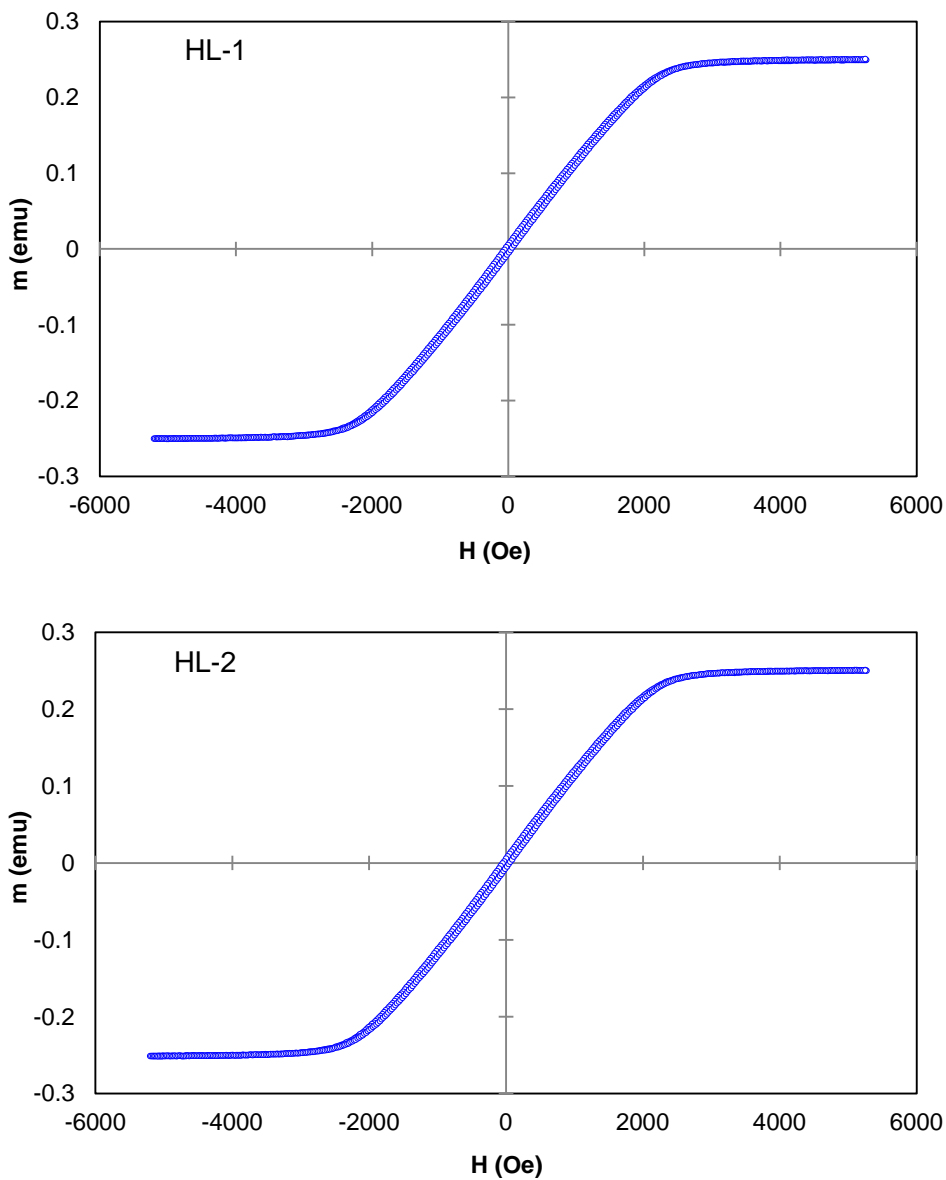
ตารางที่ 1 ความไม่แน่นอนในการตรวจวัดโมเมนต์แม่เหล็กและปริมาณที่เกี่ยวข้อง

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

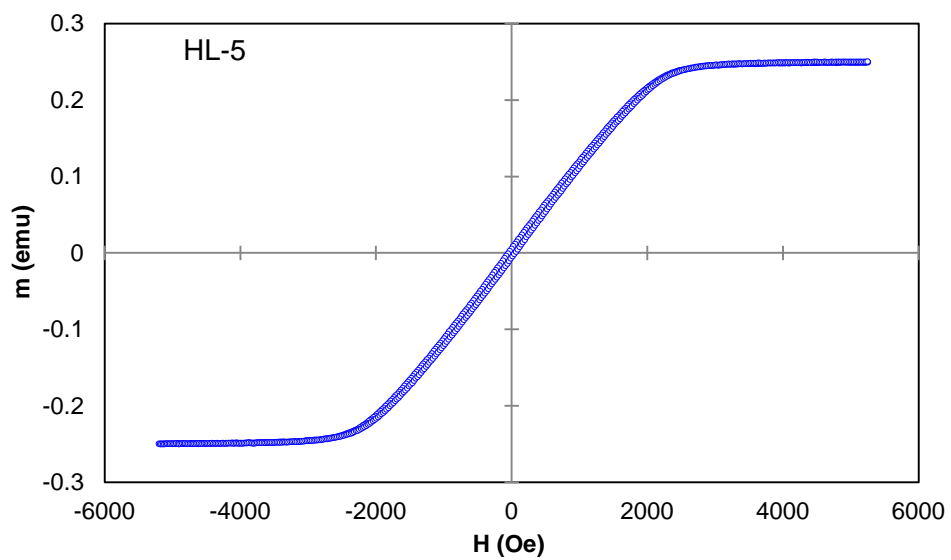
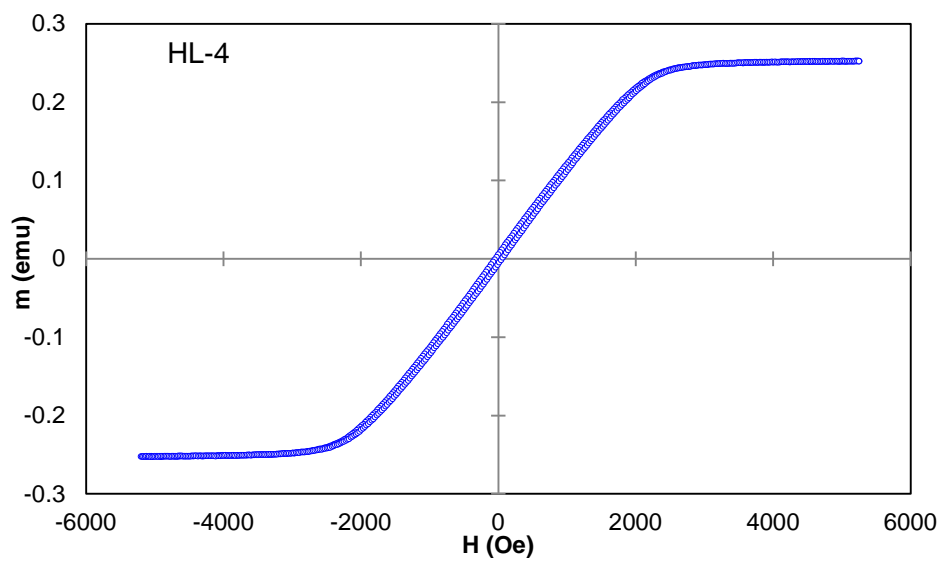
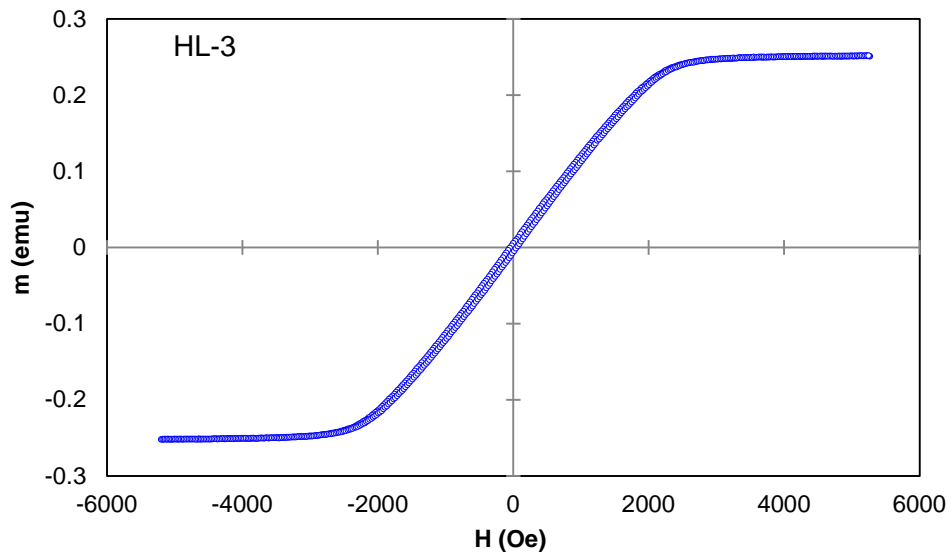
### 8.2.2 ความสามารถในการวัดซ้ำ

ความสามารถในการวัดซ้ำ (repeatability) ของระบบถูกตรวจสอบโดยการวัดกราฟฮิสเทอรีซิสของทรงกลมนิเกิล เมื่อสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์มีค่าเป็น  $1 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1}$  ซ้ำ 5 ครั้ง โดยไม่นำตัวอย่างออกจากโพรบ แต่จะเว้นช่วงเวลาการวัดระหว่างแต่ละวงฮิสเทอรีซิสประมาณ

15 min และมีการปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ทุกครั้ง จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีขนาด 5 kOe ของแต่ละวงฮีสเทอรีซิส ( $m_{5kOe}$ ) โดยจะนิยามความสามารถในการวัดค่าซ้ำเป็นหนึ่งความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $m_{5kOe}$  เฉลี่ยจากการวัดวงฮีสเทอรีซิสของทรงกลมนิกเกิลซ้ำ 5 ครั้ง



ภาพที่ 45 กราฟฮีสเทอรีซิสของทรงกลมนิกเกิล เมื่อวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์มีค่าเป็น  $1 \text{ Oe}\cdot\text{cm}^{-1}$



ภาพที่ 45 (ต่อ) กราฟฮิสเทอรีซิสของทรงกลมนิกเกิล เมื่อวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กกระเดียนที่มีค่าเป็น  $1 \text{ Oe}\cdot\text{cm}^{-1}$

**ตารางที่ 2** ความถี่เรโซแนนซ์ และโมเมนต์แม่เหล็กที่ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก 5 kOe จากการวัดกราฟฮิสเทอรีซิส 5 ครั้ง

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

จากค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ยที่สนามแม่เหล็กภายนอก 5 kOe ซึ่งได้การตรวจวัดกราฟฮิสเทอรีซิส 5 ครั้ง พบว่ามีความไม่แน่นอนในการตรวจวัดโมเมนต์แม่เหล็กเป็น 0.001084 emu หรือคิดเป็น 0.43 %

### 8.2.3 ความเป็นเชิงเส้น

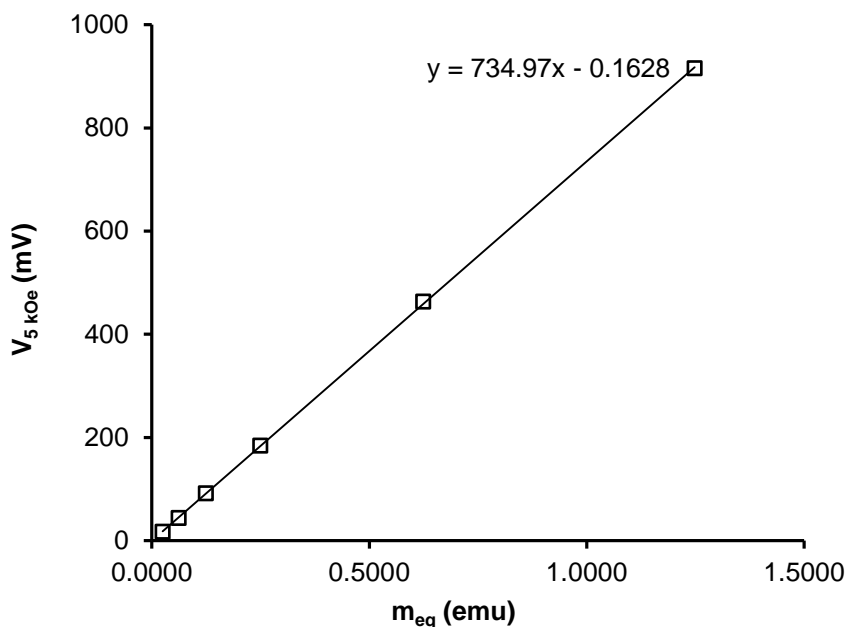
ความเป็นเชิงเส้น (linearity) ของแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับจะขึ้นกับความเชิงเส้นของ 3 ส่วน กล่าวคือ เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน เครื่องขยายกระแสไฟฟ้า และโพรบตรวจวัดการสั่นของวัสดุ จากข้อมูลของผู้ผลิตพบว่าความถูกต้องในการขยายสัญญาณของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินคือ 0.2 % และจากการทดสอบเครื่องขยายกระแสไฟฟ้าพบว่ามีความสัมพันธ์ในการแปลงความต่างศักย์เป็นกระแส  $0.0661 \pm 0.0007 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$  นั้น แสดงว่าเสถียรภาพในการสั่นของโพรบจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความเชิงเส้นของระบบ ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นการสั่นของโพรบสามารถทำได้โดยการตรวจวัดโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุอ้างอิงที่มีโมเมนต์แม่เหล็กต่างๆ กัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาจจะทดสอบได้ไม่ครอบคลุมเนื่องจากวัสดุแม่เหล็กอ้างอิงมาตรฐานมีอยู่เพียงไม่กี่ค่า และราคาค่อนข้างสูง ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกปรับค่าสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์เพื่อทดสอบความเป็นเชิงเส้นของโพรบแทน เนื่องจากในกรณีที่โมเมนต์แม่เหล็กมีค่าคงตัวนั้น แรงที่กระทำต่อตัวอย่างจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ โดยค่าโมเมนต์แม่เหล็กสมมูล (equivalent magnetic moment;  $m_{eq}$ ) จะคิดเทียบกับโมเมนต์แม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ  $1 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ค่าเดียวกับที่ทำการสอบเทียบระบบ

ความเป็นเชิงเส้นในการวัดโมเมนต์แม่เหล็กถูกตรวจสอบโดยการวัดกราฟฮิสเทอรีซิสของทรงกลมนิเกิล เมื่อสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์อยู่ในช่วง  $0.10$  ถึง  $5.00 \text{ Oe} \cdot \text{cm}^{-1}$  โดยไม่นำตัวอย่างออกจากโพรบ และเว้นช่วงเวลาระหว่างแต่ละวงฮิสเทอรีซิสประมาณ 15 min โดยมีการปรับค่าความถี่เรโซแนนซ์ก่อนการวัดทุกครั้ง จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์เฉลี่ยเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีขนาด 5 kOe ของวงฮิสเทอรีซิส ( $V_{5kOe}$ ) ที่ตรวจวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ต่างๆ เพื่อหาค่าความเป็นเชิงเส้นของโพรบ

ตารางที่ 3 ความถี่เรโซแนนซ์ และความต่างศักย์เฉลี่ยที่ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก 5 kOe

Gradient field (Oe cm <sup>-1</sup> )	Equivalent magnetic moment (emu)	Resonance frequency (Hz)	Average voltage (mV)
0.10	0.0250	63.97	17.46
0.25	0.0624	63.97	43.65
0.50	0.1248	63.96	91.37
1.00	0.2497	63.96	184.2
2.50	0.6242	63.98	462.9
5.00	1.2483	63.98	915.1

จากผลการทดลองที่ได้ในตาราง สามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาความเป็นเชิงเส้นของระบบได้ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์เฉลี่ยเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีขนาด 5 kOe และสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์มีค่าต่างๆ กัน

จากกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 46 ค่าความเป็นเชิงเส้นในการวัด ( $u_1$ ) จะนิยามโดย

$$u_1 = \frac{\Delta V_{\max}}{V_{\max}}$$

เมื่อ  $\Delta V_{\max}$  แทนความแตกต่างสูงสุดของความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อเทียบกับเส้นแนวโน้ม และ  $V_{\max}$  แทนค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ตรวจวัดได้ ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้พบว่าระบบมีความเป็นเชิงเส้น 0.47 %

### 8.3 ทดสอบประสิทธิภาพในการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุตัวอย่าง

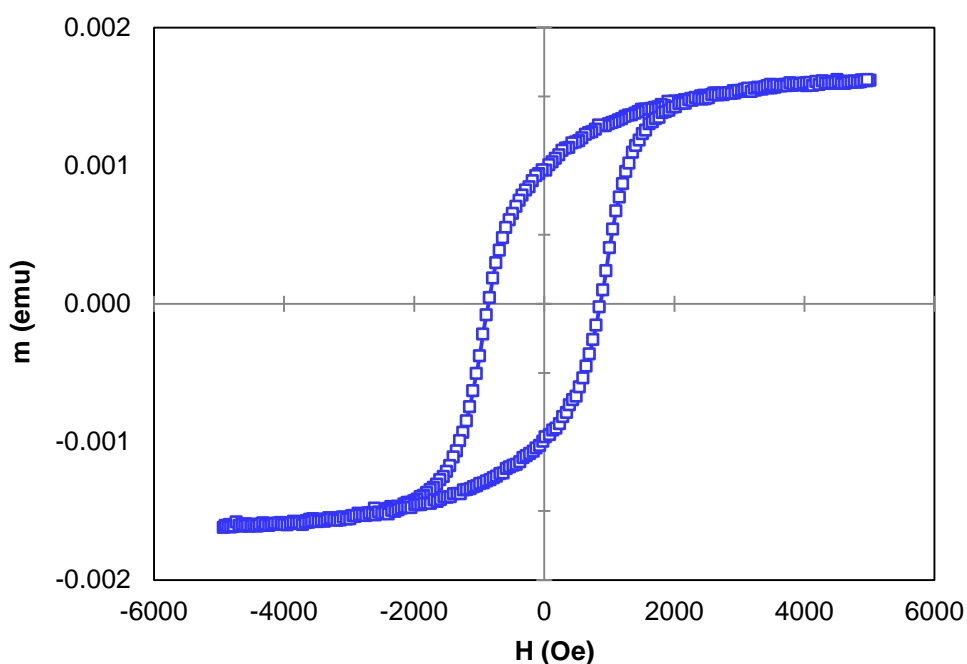
#### 8.3.1 แผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk

แผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk จะประกอบด้วยสารแม่เหล็กที่มีความหนา ระดับไมครอนเคลือบอยู่บนแผ่นโพลีเมอร์ (ดังภาพที่ 47) โดยในการตรวจวัดครั้งนี้จะตัดแผ่นบันทึกข้อมูลให้มีขนาดประมาณ  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  จากนั้นจึงติดตั้งลงบนแท่งแก้วของโพรบตรวจวัด โดยใช้ vacuum grease แล้วจึงนำโพรบไปติดตั้งระหว่างขดลวดเกรเดียนท์และแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 47 แผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk

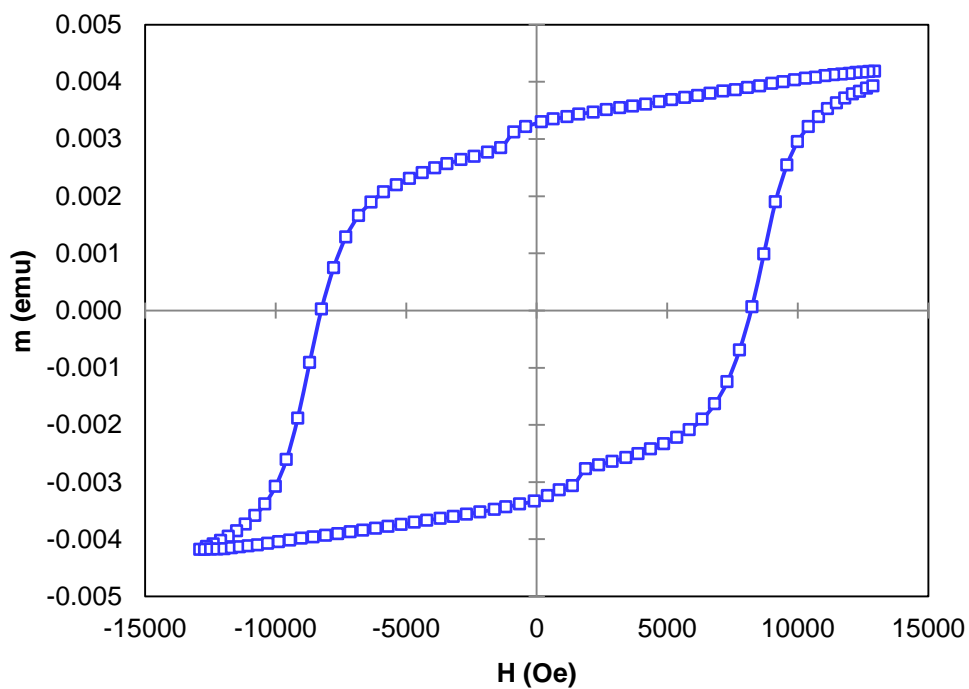
ผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก  $\pm 5 \text{ kOe}$  โดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์  $10 \text{ Oe cm}^{-1}$  แสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 กราฟฮิสเทอรีซิสของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ใน Floppy disk เมื่อตรวจวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์  $10 \text{ Oe cm}^{-1}$

### 8.3.2 วัสดุแม่เหล็กแข็ง NdFeB

วัสดุแม่เหล็กแข็ง NdFeB ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้เป็นแม่เหล็กถาวร เนื่องจากคงสภาพแม่เหล็กถาวรได้นาน และลบล้างสภาพแม่เหล็กได้ยาก เป็นวัสดุที่แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสที่กว้าง โดยในการตรวจวัดครั้งนี้ได้ใช้ผงของวัสดุแม่เหล็กแข็ง NdFeB ซึ่งมีมวลน้อยมาก ๆ จนไม่สามารถตรวจวัดด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูงรุ่น 105 XP (Mettler Toledo) ซึ่งมีความละเอียด  $10 \times 10^{-6}$  g หรือ  $10 \times 10^{-9}$  kg โดยในการตรวจวัดจะติดผงของวัสดุลงบนแท่งแก้วของโพรบ ตรวจวัดโดยใช้ vacuum grease แล้วจึงนำโพรบไปติดตั้งระหว่างขดลวดเกรเดียนท์และแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก  $\pm 13$  kOe โดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์  $10 \text{ Oe cm}^{-1}$  แสดงดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 กราฟฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กแข็ง NdFeB เมื่อตรวจวัดโดยใช้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์  $10 \text{ Oe cm}^{-1}$

## บทที่ 5 สรุป วิจัย และข้อเสนอแนะ

ส่วนประกอบของระบบแมกนีโตมิเตอร์แบบสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลัปลูกติดตั้งเพื่อใช้ในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กนาโน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีปริมาณน้อย และมีโมเมนต์แม่เหล็กที่น้อยลงตามไปด้วย จากการทดสอบความไวของระบบที่สร้างขึ้นโดยใช้ทรงกลม yttrium iron garnet (YIG) ของ NIST รุ่น SRM 2853 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm มวล 2.812 mg โมเมนต์แม่เหล็ก  $27.6 \text{ emu}\cdot\text{g}^{-1}$  ที่สนามแม่เหล็กภายนอก 5 kOe พบว่าระบบมีค่าคงตัวความไวในการตรวจวัด  $0.7367 \text{ V}\cdot\text{emu}^{-1}\cdot\text{Oe}^{-1}$  เมื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบโดยการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของทรงกลมนิเกิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ของ Lake Shore Cryotronics รุ่น 651-465 พบว่าความไม่แน่นอนของระบบแมกนีโตมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมีค่า 0.06247% มีความสามารถในการวัดค่าซ้ำ 0.001082 emu ซึ่งคิดเป็น 0.43% ของค่าแมกนีโตเซชันเฉลี่ยที่ 5 kOe และมีความเป็นเชิงเส้น 0.47% จากผลการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ เช่นฟิล์มแม่เหล็ก และผงที่มีมวลน้อยมากๆ พบว่าระบบแมกนีโตมิเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กที่ของวัสดุที่มีปริมาณน้อยๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วระบบแมกนีโตมิเตอร์แบบสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลัปลูกยังสามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากไม่จำเป็นต้องรอให้สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีโตซ์วัสดุคงตัวเหมือนดังเช่นในกรณีของแมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง

อย่างไรก็ตามระบบที่สร้างขึ้นยังมีความไวต่ำกว่าเครื่องที่ผลิตจำหน่ายในทางการค้าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่สร้างขึ้นยังขาดส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจจะเกิดจากคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ เครื่องจักรกล ตลอดจนปั๊มน้ำที่ใช้ในระบบระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าเอง ซึ่งถ้าหากพัฒนาระบบให้สามารถป้องกันการสั่นเทือนจากสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ได้ จะทำให้ระบบมีความไวในการตรวจวัดดีขึ้นจนมีประสิทธิภาพที่เทียบเท่ากับเครื่องที่ผลิตจำหน่ายในการค้าได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Zijlstra, Rev. Sci. Instrum. 41 (1970) 1241.
- [2] P.J. Flanders, J. Appl. Phys. 63 (1988) 3940.
- [3] K. O'Grady, V.G. Lewis and D.P.E. Dickson, J. Appl. Phys. 73 (1993) 5608.
- [4] J.W. Harrell, J. Magn. Magn. Mater. 205 (1999) 121.
- [5] F. Brem, L. Tiefenauer, A. Fink, J. Dobson and A.M. Hirt, Phys. Rev. B 73 (2006) 224427.
- [6] C.R. Pike and A. Fernandez, J. Appl. Phys. 85 (1999) 6668
- [7] F. C. S. da Silva, C. M. Wang, and D. R Pappas, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 108 (2003) 125-134.