



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)

ปริญญา

มาตรวิทยา

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างต้นกำเนิด

Design and Construction of Resonance Vibrating Sample Magnetometer

นามผู้วิจัย นายรติพัทธ์ แยมยิ้ม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, ปร.ด. )

หัวหน้าภาควิชา

( อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำลัง

Design and Construction of Resonance Vibrating Sample Magnetometer

โดย

นายรติพัทธ์ เข้มยิ้ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รติพัทธ์ เข้มยี่ม 2555: การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำทอน  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา) สาขามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, ปร.ค. 98 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำทอน (R-VSM) เพื่อใช้ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก ที่มีความเป็นแม่เหล็กน้อยๆ ระบบแมกนีโตมิเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นในครั้งนี้จะประกอบด้วย ส่วนที่ทำหน้าที่ในการสั้นวัสดุ ขดลวดตรวจวัดสัญญาณ เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดจะถูกติดตั้งที่ปลายของที่ติดตั้งตัวอย่างซึ่งต่ออยู่กับเครื่องสั้นที่สั้นด้วยความถี่กำทอน 35.9 เฮิร์ตซ์ จากนั้นจึงนำระบบสั้นพร้อมวัสดุตัวอย่าง และขดลวดตรวจวัดไปวางในสนามแม่เหล็กที่สร้างจากแม่เหล็กไฟฟ้า ความต่างศักย์เหนี่ยวนำของขดลวดตรวจวัดสัญญาณจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน จากนั้นจึงแปลงเป็น โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ การทำงานของ R-VSM ถูกทดสอบโดยการวัดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กสามชนิด ผลการวัดที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับผลการวัดของแมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง ( VSM) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นมีสมรรถนะค่อนข้างดี สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆได้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Ratipat Yamyim 2012: Design and Construction of Resonance Vibrating Sample Magnetometer. Master of Science (Metrology), Major Field: Metrology, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Pongsakorn Jantaratana, Ph.D. 98 pages.

In this thesis, the resonance vibrating sample magnetometer (RVSM) was designed and constructed for measuring magnetic properties of low-magnetic materials. The magnetometer system consists of a vibration unit, a pair of similar sensing coils, a gauss meter and an electromagnet. The material under test was attached to sample holder connected to the vibration unit and vibrated with the resonance frequency of 35.9 Hz. The vibration unit with sample and sensing coils was then subjected to the external magnetic field generated by the electromagnet. The induced voltage from the pair of sensing coils was measured by a lock-in amplifier and converted to the magnetic moment of the material. The performance of the R-VSM was tested by measuring hysteresis loop of three differences magnetic materials. The obtained results were compared with those of the vibrating sample magnetometer (VSM). The performance of constructed R-VSM is quite well and can be used as a tool to characterize magnetic properties of low-magnetic materials.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.พงศกร จันทรรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ข้อคิด แนวทางคำปรึกษา แนวทางการแก้ปัญหา และความรู้ในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ นาวาเอก เชษฐ ศัลยพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะรวมทั้งความรู้ที่เป็นประโยชน์และกรุณาให้ความอนุเคราะห์มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุแม่เหล็กอ้างอิงสำหรับใช้ในการเทียบมาตรฐานในการค้นคว้าวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ สำหรับคำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจสำคัญเสมอมา

รติพัทธ์ เข้มยิ้ม

ตุลาคม 2555

## สารบัญ

## หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก เอกสารใบรับรองวัสดุแม่เหล็กมาตรฐาน	74
ภาคผนวก ข การประเมินค่าความไม่แน่นอน	76
ภาคผนวก ค ตารางผนวก	85
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38	94
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติทางแม่เหล็ก	34
2	แสดงค่า $M_r$ ค่า $H_c$ และค่า $m$ ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของของวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน	63
3	แสดงค่า $M_r$ ค่า $H_c$ และ $m$ ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$	65
4	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการวัด โมเมนต์แม่เหล็ก 30 ครั้ง ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$	66
5	ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่อง R-VSM ในการวัด 5 ครั้ง	68
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ข1	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่า โมเมนต์แม่เหล็ก ( $m$ ) จากวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	80
ข2	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก ( $m$ ) จากวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	84
ค3	ผลการวัดทดสอบความถี่สั่นกำลังของหัววัด R-VSM ที่ความถี่ 30 Hz ถึง 40 Hz	86
ค4	ผลการทดสอบวงจรตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่างที่กำลังขยาย 100 เท่า จากการวัดจำนวน 30 ครั้ง	87
ค5	ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัด 30 ครั้ง ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe	89

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค6	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	90
ค7	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	91
ค8	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ ในการวัด 30 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	92
ค9	องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ ในการวัด 30 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%	93

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	6
2	7
3	8
4	9
5	11
6	12
7	13
8	14
9	15
10	16
11	17
12	18
13	19
14	19
15	20
16	21
17	21
18	22
19	23
20	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	แสดงทิศทางของผลึก	28
22	โครงสร้างการทำงานของสเตรนเกจ	30
23	วงจรวีทสโตนบริดจ์	32
24	วัสดุแม่เหล็กอ้างอิง (ก) รหัสรุ่นวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง (ข)	40
25	แผ่นเทปแม่เหล็กที่ใช้บันทึกข้อมูลในฟลอปปีดิสก์ (floppy disk) (ก) แผ่นเทปแม่เหล็กขนาด $3 \times 3 \times 0.1 \text{ mm}^3$ (ข)	41
26	แถบวัสดุ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ ขนาด $1 \times 3 \times 0.1 \text{ mm}^3$	41
27	แถบแม่เหล็กอ่อนขนาด $1 \times 3 \times 0.1 \text{ mm}^3$	42
28	ขดลวดตรวจวัด	42
29	แผ่นเพียโซอิเล็กทริกของบริษัท piezo systems inc. รุ่น D220-A4-503YB	43
30	สเตรนเกจ (KFG-5-350-C1-16)	43
31	เครื่องวัดสนามแม่เหล็กของบริษัท LakeShore รุ่น 455 (ก) หัววัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของบริษัท LakeShore รุ่น HMMT-6J04-VF (ข)	44
32	เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินของบริษัท Stanford Research Systems รุ่น SR850	44
33	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของบริษัท Agilent รุ่น HP34401A	45
34	เครื่องขยายกำลัง (mosfet 50W J162 K1058 )	45
35	เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของบริษัท Hewlett-Packard รุ่น HP 33120A	45
36	เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของบริษัท Walker Scientific Inc. รุ่น HV-4H	46
37	แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง (VSM)	46
38	โปรแกรม VEE OneLab รุ่น 6.0	47
39	ขั้นตอนวิธีการออกแบบและสร้างเครื่อง R-VSM	48
40	โครงสร้างหัววัด R-VSM จากมุมมองด้านข้าง (ก) และจากมุมมองด้านบน (ข)	49
41	การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับหัววัด R-VSM	50
42	การติดตั้งตัวรับรู้อัด รนเกจกับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (ก) และการต่อวงจรในรูปแบบวีทสโตนบริดจ์ (ข)	50
43	วงจขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน (instrumentation amplifier)	51

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
44	52
45	53
46	54
47	56
48	57
49	57
50	58
51	59
52	60
53	60
54	61
55	62
56	63
57	64
58	65
59	67

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	ผลการทดสอบการทวนซ้ำของเครื่อง R-VSM ในการวัดวัสดุแผ่นเทพแม่เหล็ก บันทึกข้อมูลในฟลอปปีดิสก์จำนวน 5 ครั้ง ที่จุด $M_r$	67
61	ผลการทดสอบการทวนซ้ำของเครื่อง R-VSM ในการวัดวัสดุแผ่นเทพแม่เหล็ก บันทึกข้อมูลในฟลอปปีดิสก์จำนวน 5 ครั้ง ที่จุด $H_c$	68

## การออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่นก้ำทอน

### Design and Construction of Resonance Vibrating Sample Magnetometer

#### คำนำ

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถนำไปประยุกต์งานอย่างหลากหลายที่สุดชนิดหนึ่ง และด้วยความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีในการสังเคราะห์วัสดุในปัจจุบัน ทำให้นักวิจัยสามารถ สังเคราะห์ วัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็ก ในระดับไมโครจนถึงนาโน ได้ ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดเล็กดังกล่าว จำเป็นต้องอาศัยเครื่องวัดที่มีความไวสูงตามไปด้วย

เครื่องมือสำหรับศึกษาสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่มีใช้ในปัจจุบัน อาศัยเทคนิคการตรวจวัดต่างๆ กัน โดยที่ได้รับความนิยมได้แก่ แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ (alternating gradient magnetometer; AGM) แมกนีโตมิเตอร์แบบแผ่นจานหมุน (turbo rotating disc magnetometer; TRDM) และแมกนีโตมิเตอร์แบบสั่น ตัวอย่าง (vibrating sample magnetometer; VSM) เป็นต้น โดยเฉพาะ VSM นั้นจัดเป็นเครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากไม่ต้องการการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก สามารถเก็บรวมและประมวลผลการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว แต่เครื่อง VSM ก็ยังมีข้อจำกัดในการวัดสมบัติของวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ เนื่องจากเสถียรภาพในการสั่นของตัวอย่างไม่ดีเท่าที่ควร และผลการวัดที่ได้ขึ้นกับปริมาณของสารแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจวัด ดังนั้นการออกแบบเครื่องวัดที่มีความไวสูง และสามารถตรวจวัดวัสดุแม่เหล็กตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก

ในวิทยานิพนธ์ นี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้าง แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่นก้ำทอน (resonance vibrating sample magnetometer; R-VSM) โดยใช้กระบวนการทางมาตรวิทยาในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของปริมาณทางแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดเล็กในโอกาสต่อไป

## วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้าง แมกนีโตมิเตอร์สำหรับ ตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแบบ ตัวอย่างสั้นกำหนด ให้สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับใช้ในการวัด สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยมีการประมวลผลและแสดงผลการวัดแบบ วงฮีสเทอรีซิสด้วย คอมพิวเตอร์ ในระดับที่สามารถใช้ในการวิจัยและบริการวิชาการแก่หน่วยงานต่างๆ ได้

### ขอบเขตการวิจัย

ออกแบบ และสร้าง แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำหนด ที่ประกอบไปด้วย ระบบสั้น ตัวอย่างที่ความถี่สั้นกำหนด ระบบ ควบคุม แอมพลิจูดการสั้น แบบป้อนกลับ ระบบตรวจวัด โมเมนต์แม่เหล็ก เครื่องวัดและขยายสัญญาณ เครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้สามารถวัดและ แสดงผลสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในรูปแบบ ของวง ฮีสเทอรีซิส และนำผลการวัดที่ได้จาก เครื่องวัดที่สร้างขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลของการวัดที่ได้จากเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง และหาค่าความถูกต้องในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น โดยอาศัย กระบวนการทางมาตรวิทยา

## การตรวจเอกสาร

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Foner (1955) ได้สร้างเครื่อง VSM ขึ้นที่ห้องปฏิบัติการลินคอล์นของสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (MIT) จนกระทั่ง ในปี 1959 เครื่องดังกล่าวได้ถูกสร้างขึ้นใช้งานอย่างแพร่หลาย และกลายเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญอย่างมาก ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ จนถึงปัจจุบัน

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการสังเคราะห์วัสดุในปัจจุบัน ทำให้นักวิจัยสามารถสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงทำให้เครื่องวัดสมบัติทางแม่เหล็กที่มีความไวมากๆ และสามารถตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่มีขนาดเล็กได้มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของวัสดุ ดังนั้นวัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่น้อยตามไปด้วย และส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้ถ้าหากใช้เครื่องวัดที่มีความไวไม่ดีพอ ดังเช่นในงานวิจัยของ Hoon (1983) ซึ่งพบว่าขนาดของวัสดุตัวอย่างส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ และลักษณะการวางตำแหน่งของขดลวดตรวจวัดมีผลต่อความไวของเครื่อง VSM เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Zieba *et al.* (1982) ที่ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากขนาดและตำแหน่งการติดตั้งขดลวดตรวจวัด ที่มีผลต่อค่าความไวของเครื่องวัด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุให้มีความไวดีขึ้น สามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กน้อยได้ ดังเช่น งานวิจัยของ Samwel *et al.* (2008) ซึ่งได้ศึกษาวิเคราะห์นาบเวกเตอร์ในการติดตั้งขดลวดตรวจวัดเพื่อให้ได้ค่าความไวของเครื่องวัดที่ดีที่สุดซึ่งพบว่าระยะห่างของการวางตำแหน่งขดลวดตรวจวัดกับวัสดุแม่เหล็กตัวอย่างจะมีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวัสดุแม่เหล็กตัวอย่างที่ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดตรวจวัด จะมีค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1\%$  และมีความไว  $1 \mu\text{emu}$

แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่นกำทอน (resonance vibrating sample magnetometer; R-VSM) เป็นแมกนีโตมิเตอร์ที่อาศัยการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตรวจวัดมีการเปลี่ยนแปลง และเป็นแมกนีโตมิเตอร์ที่สามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ ได้ดี เนื่องจากเครื่อง R-VSM เป็นเครื่องวัดที่มีเสถียรภาพของระบบ สั่นตัวอย่างที่ดีกว่าเครื่อง VSM โดยในเครื่อง VSM นั้นจำเป็นต้องวางส่วนที่ทำหน้าที่สั่นตัวอย่าง

ห่างจากขดลวดตรวจจับสัญญาณ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากส่วนดังกล่าว และตัวอย่างต้อง สั่นด้วยแอมพลิจูดที่มากเพื่อให้มีความไวดีขึ้น จึงส่งผลให้เสถียรภาพในการสั่นของตัวอย่างไม่ดี และอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบตรวจวัดต่ำ ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ใน การศึกษาวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ ดังที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของ Graham (2000) ในขณะที่ ระบบ R-VSM นั้น ตัวอย่างจะสั่นอยู่ในแนวแกนระหว่างขดลวดตรวจวัด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความ ไวสูงสุด จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องให้ตัวอย่างสั่นด้วยแอมพลิจูดที่สูง จึงส่งผลให้มีเสถียรภาพ ในการ สั่นของตัวอย่างที่ดีกว่า ทำให้ R-VSM ได้รับความนิยมใช้ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ แม่เหล็กที่มีโครงสร้างขนาดเล็กอย่างกว้างขวาง ดัง เช่นงานวิจัยของ Wrona *et al.* (2003, 2004) ซึ่ง ได้ออกแบบและสร้างเครื่อง R-VSM ที่ใช้งานร่วมกับขดลวดเฮล์มโฮลทซ์ในการวัดสมบัติแม่เหล็ก ของ MgO (001)/Fe/50 Å Cr ซึ่งสามารถตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กของฟิล์มบางที่มีความหนาใน ระดับ 10-100 nm ได้เป็นอย่างดี

ในการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ นอกจากความไวของระบบตรวจวัดแล้ว การเทียบ มาตรฐานถือว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้อง โดยในการเทียบมาตรฐานเครื่องวัด แม่เหล็กนั้นจะใช้วัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่แน่นอนเป็นตัวเทียบ และวัสดุอ้างอิงที่ ได้รับความนิยมสูงสุดคือทรงกลมนิกเกิล โดยในการเทียบมาตรฐานนั้นจะต้องติดตั้งวัสดุอ้างอิงที่ ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดตรวจวัดและเป็นตำแหน่งเดียวกับที่ติดตั้งวัสดุตัวอย่างที่ต้องการ ตรวจวัด อย่างไรก็ตามขนาดของวัสดุอ้างอิงก็สามารถส่งผลต่อความถูกต้องในการตรวจวัดได้ เช่นกัน ดังเช่นในงานวิจัยของ Lindemuth *et al.* (2000) ซึ่งได้เทียบมาตรฐานของเครื่อง VSM โดยใช้วัสดุอ้างอิงทรงกลมนิกเกิล พบว่าในกรณีที่ใช้ VSM ที่ผ่านการเทียบมาตรฐานด้วยทรงกลม นิกเกิลไปวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง และมีขนาดเล็กกว่าวัสดุอ้างอิงนั้น สามารถทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการวัดได้ถึง 20 %

### แมกนีโตมิเตอร์

แมกนีโตมิเตอร์ (magnetometer) เป็นเครื่องมือวัดทางแม่เหล็กชนิดหนึ่งที่ใช้ในการศึกษา สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโดยการวัดแมกนีโตเซนชันหรือสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำของวัสดุที่ สนามแม่เหล็กภายนอกต่างๆ กัน แมกนีโตมิเตอร์สามารถจำแนกออกเป็นสองแบบใหญ่ๆ คือ แบบ วัดการเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก และแบบวัดแรงทาง แม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก

## 1. แมกนีโตมิเตอร์แบบวัดการเหนี่ยวนำ

### 1.1 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง

แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง หรือ VSM เป็นเครื่องมือวัดที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กของวัสดุที่กำลังสั้นเพื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ขั้วของขดลวดตรวจวัด ตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง ของฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ผ่านขดลวด จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $\varepsilon$ ) ขึ้นภายในขดลวดดังสมการ

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบของขดลวด

$\phi$  คือฟลักซ์แม่เหล็ก

$t$  คือเวลา

เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi$  ที่ผ่านขดลวดใดๆ เป็นผลคูณของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ในแนวตั้งฉากกับวงของขดลวดที่มีพื้นที่  $A$  ดังสมการ

$$\varepsilon = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (2)$$

ในกรณีที่พื้นที่ของขดลวดมีค่าคงที่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังสมการ

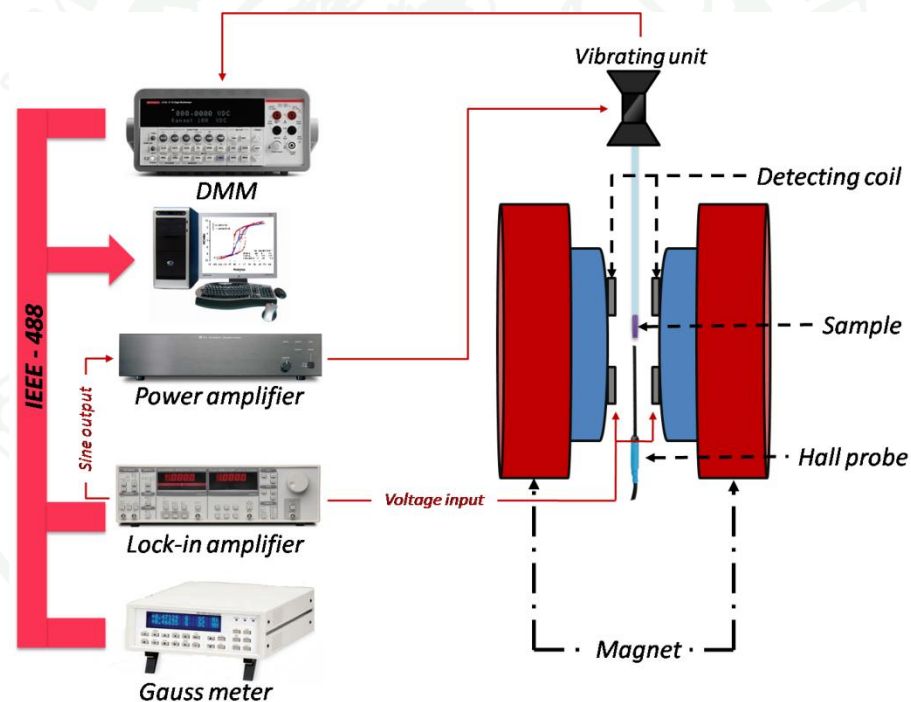
$$\varepsilon = -NA \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

ดังนั้นเมื่อวัสดุแม่เหล็กสั้นใกล้ๆ กับขดลวดตรวจวัด (detecting coil) โมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กภายในขดลวดและ จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นในขดลวด โดยค่าความต่างศักย์ ดังกล่าวจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับ โมเมนต์แม่เหล็ก  $m$  ในวัสดุ และตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องดังสมการ

$$V = mAfS \quad (4)$$

- เมื่อ  $V$  คือความต่างศักย์เหนี่ยวนำ  
 $f$  คือความถี่ในการสั่นของวัสดุตัวอย่าง  
 $A$  คือแอมพลิจูดในการสั่นตัวอย่าง  
 $S$  คือความไวในการตรวจวัดของขดลวด

แมกนีโตมิเตอร์แบบ VSM ประกอบด้วยส่วนหลักที่ทำหน้าที่ควบคุมการสั่นของวัสดุตัวอย่าง (vibrating unit) แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อแมกนีไทซ์วัสดุตัวอย่าง และขดลวดตรวจจับสัญญาณ (detecting coils) ดังแสดงในภาพที่ 1



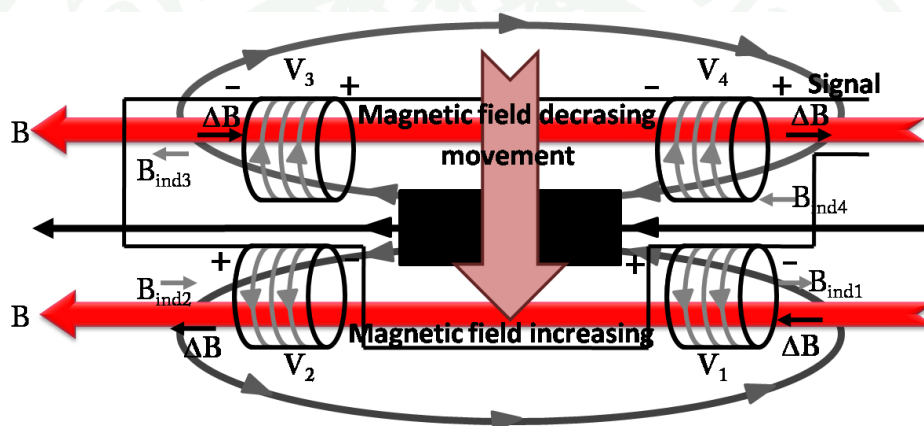
ภาพที่ 1 แผนภาพส่วนประกอบและการทำงานของ VSM

ในขณะที่ตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็ก วัสดุตัวอย่างจะถูกทำให้สั่นระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า และชุดขดลวดตรวจวัดซึ่งประกอบด้วยขดลวดสี่ขดขนาดและจำนวนรอบเท่ากันต่อกันในลักษณะดังภาพที่ 2 ซึ่งการต่อในลักษณะดังกล่าวสามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กภายนอก และความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของ

วัสดุที่กำลังสั้นอยู่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าความต่างศักย์เหนี่ยวนำซึ่งเกิดจากขดลวดแต่ละตัว ดังสมการที่ 5

$$V_{\text{signal}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (5)$$

โดยความต่างศักย์ที่ ขั้วของขดลวดจะ ถูกวัดด้วยเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบ บล็อก-อิน (lock-in amplifier) ซึ่งอาศัยเทคนิคการล็อกเฟสของสัญญาณที่ตรวจวัดกับสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เดียวกับการสั้นของวัสดุตัวอย่างทำให้สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนซึ่งมีความถี่อื่นๆ ออกไปได้



ภาพที่ 2 การต่อขดลวดสำหรับตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก

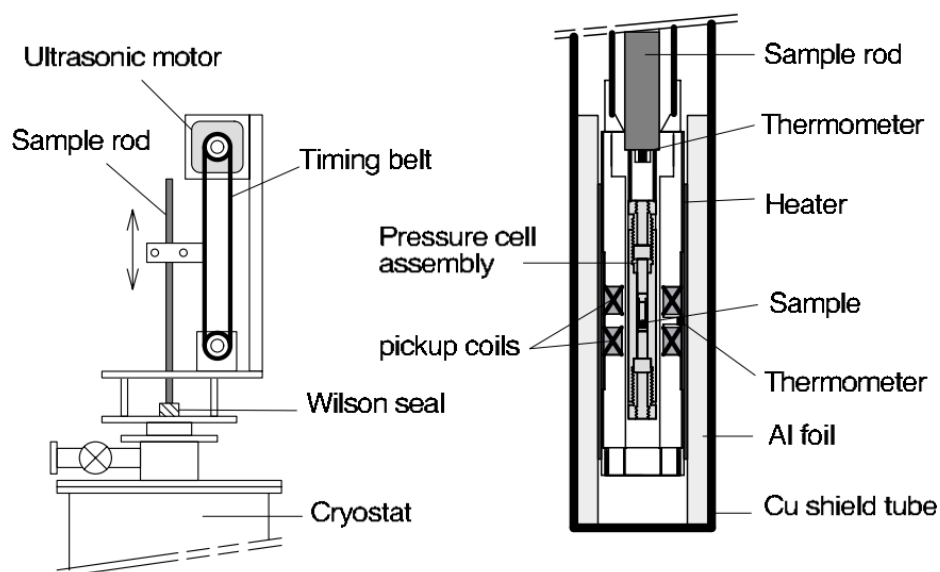
แมกนีโตมิเตอร์แบบ VSM มีราคาแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความไวในการตรวจวัด สนามแม่เหล็กสูงสุดที่สามารถให้แก่วัสดุ รวมถึงอุปกรณ์ประกอบสำหรับควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ และทิศทางในการตรวจวัด โดยตัวอย่างของ แมกนีโตมิเตอร์แบบ VSM ที่จำหน่ายทางการค้าแสดง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่างของบริษัท LakeShore รุ่น 7407

#### 1.2 แมกนีโตมิเตอร์แบบดึงออก

แมกนีโตมิเตอร์แบบดึงออก (extraction magnetometer) เป็นแมกนีโตมิเตอร์แบบวัดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีการดึงตัวอย่าง ซึ่งสามารถ แบ่งตามลักษณะการวัดได้สองแบบกล่าวคือ แบบดึงทั้งวัสดุตัวอย่าง และ ขดลวดตรวจวัดออกจากสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีไทซ์วัสดุ และแบบดึงเฉพาะ วัสดุตัวอย่างออกจากสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแมกนีไทซ์ตัวอย่างโดยไม่เคลื่อนย้ายขดลวดตรวจวัด ซึ่งมีแผนภาพการทำงานดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภาพแมกนีโตมิเตอร์แบบดึงออก

ที่มา: Koyama *et al.* (2012)

โดยฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านขดลวดตรวจวัดเมื่อวัสดุแม่เหล็กอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ใช้ในการแมกนีโตซ์ ( $\Phi_1$ ) สามารถหาได้ดังสมการ

$$\Phi_1 = \mu_0(H_a - H_d + M)A \quad (6)$$

- เมื่อ  $\mu_0$  คือค่าสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ  
 $H_a$  คือค่าสนามแม่เหล็กภายนอก  
 $H_d$  คือค่าสนามแม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็ก  
 $M$  คือค่าแมกนีโตเซชัน  
 $A$  คือค่าพื้นที่ของวัสดุแม่เหล็กตัวอย่างหรือขดลวดตรวจวัด

เมื่อวัสดุตัวอย่างถูกดึงให้เคลื่อนที่ออกจากขดลวดตรวจวัดและสนามแม่เหล็กภายนอก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตรวจวัด ( $\Phi_2$ ) จะเหลือเฉพาะฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกดังสมการ

$$\Phi_2 = \mu_0 H_a A \quad (7)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\Delta\Phi$ ) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุตัวอย่างคือ

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (8)$$

การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในสมการที่ (8) ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นภายในขดลวด

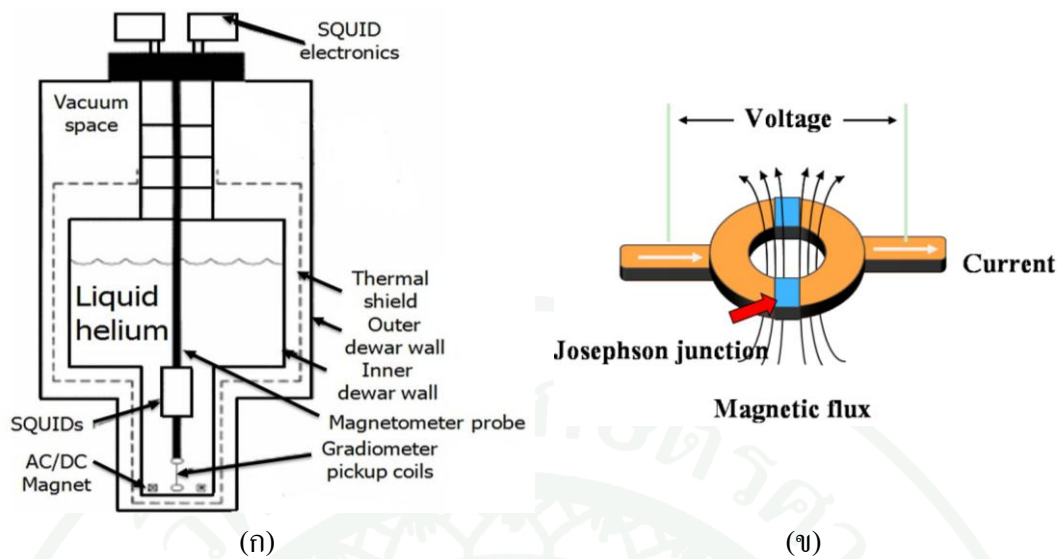
### 1.3 แมกนีโตมิเตอร์แบบ SQUID

SQUID (superconducting quantum interference device) ตัวรับรู้สนามแม่เหล็กที่มีความไวดีที่สุด โดยในการตรวจวัดจะอาศัยหลักการ ของ อุปกรณ์รบกวนเชิงควอนตัมตัวนำยิ่งยวด กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กที่ ผ่านวงแหวนซึ่งประกอบด้วยรอยต่อ โจเซฟสัน (Josephson junctions) จะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ที่บริเวณวงแหวนตามกฎของฟาราเดย์ เมื่อกระแสที่ผ่านรอยต่อมีค่าคงตัว โดยสามารถหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างกระแส ( $I_c$ ) ที่ไหลผ่านตัวนำยิ่งยวด ได้ดังนี้

$$I_c = 2i_c \left| \cos\pi \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \right| \quad (9)$$

- เมื่อ  $i_c$  คือค่ากระแสวิกฤตของรอยต่อ  
 $\Phi_a$  คือฟลักซ์แม่เหล็ก  
 $\Phi_0$  คือควอนตัมฟลักซ์ (flux quantum) มีค่า  $2 \times 10^{-15} \text{ T.m}^2$

โดยอาศัยหลักการดังกล่าวทำให้ สามารถ ตรวจ วัดสนามแม่เหล็กที่ น้อยๆ มาก ได้ เช่นการวัดสนามแม่เหล็กจากสิ่งมีชีวิต แมกนีโตมิเตอร์แบบ SQUID จะประกอบด้วยขดลวด เกรดิโอมิเตอร์ (gradiometer) ทำหน้าที่ตรวจวัด การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยขดลวดดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับขดลวดซึ่งวางคู่ควบอยู่กับ SQUID และอยู่ในภาชนะ บรรจุฮีเลียมเหลวเพื่อรักษาสภาพตัวนำยิ่งยวดของ SQUID ตัวอย่างแผนภาพแมกนีโตมิเตอร์แบบ SQUID แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างของเครื่อง SQUID แมกนีโตมิเตอร์ (ก) โครงสร้างวงแหวน SQUID (ข)

## 2. แมกนีโตมิเตอร์แบบวัดแรง

### 2.1 แมกนีโตมิเตอร์แบบเครื่องชั่งฟาราเดย์

แมกนีโตมิเตอร์แบบเครื่องชั่งฟาราเดย์ (Faraday balance magnetometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนต์ ผลของสนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนต์ทำให้มีแรงกระทำต่อวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง โดยแรง  $F_x$  ที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็กที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กแบบเกรเดียนต์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$F_x = \mu_0 \frac{\partial}{\partial x} (\vec{m} \cdot \vec{H}) \quad (10)$$

เมื่อโมเมนต์แม่เหล็ก  $m$  ของวัสดุมีค่าคงสมการ

$$m = MV = V\chi_v H \quad (11)$$

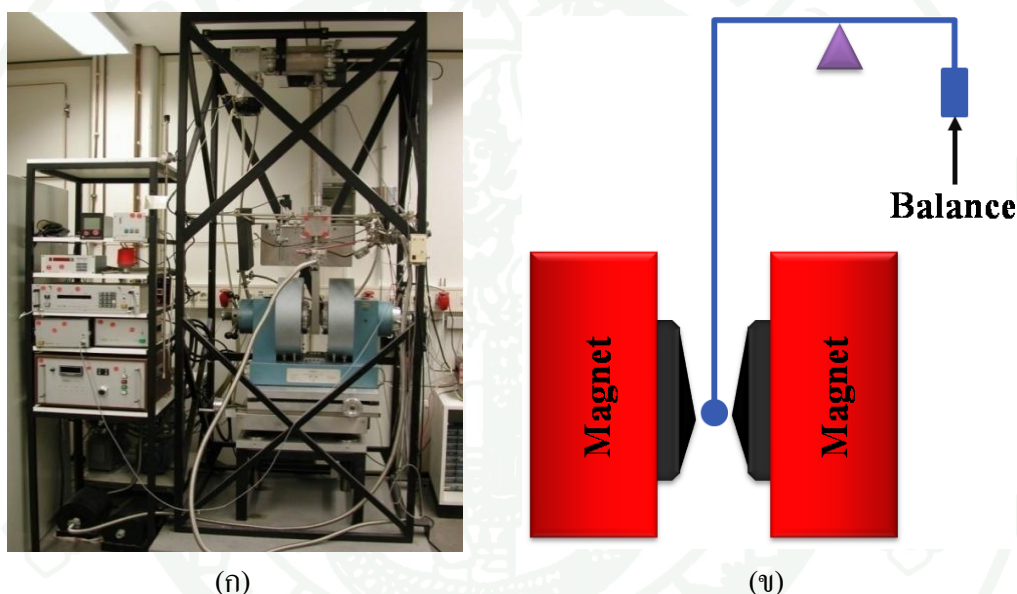
ดังนั้นแรงที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$F_x = V\mu_0\chi_v H \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (12)$$

เมื่อ  $V$  คือค่าปริมาตรของวัสดุ

$\chi_v$  คือค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเชิงปริมาตร

แมกนีโตมิเตอร์แบบเครื่องชั่งฟาราเดย์ มักได้รับความนิยมใช้งานที่อุณหภูมิสูง ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 1250 K และมีช่วงการวัดภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่ 0.05 T ถึง 1.15 T แผนภาพการทำงานสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แมกนีโตมิเตอร์แบบเครื่องชั่งฟาราเดย์ (ก) แผนภาพของเครื่องชั่งฟาราเดย์ (ข)

ที่มา: Arbeitskreis Prof. Dr. Beck (2009)

## 2.2. แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ

แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ (alternating gradient magnetometer; AGM) เป็นเทคนิคการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุโดยการวัดแรงที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็ก ที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กเกรเดียนท์ สลับ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าต่างๆ กัน ผลของสนามแม่เหล็กเกรเดียนท์สลับ จะทำให้วัสดุแม่เหล็ก สั่นด้วยความถี่เดียวกับสนามแม่เหล็กสลับ เนื่องจากผลของแรง ( $F$ ) ที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็กดังสมการ

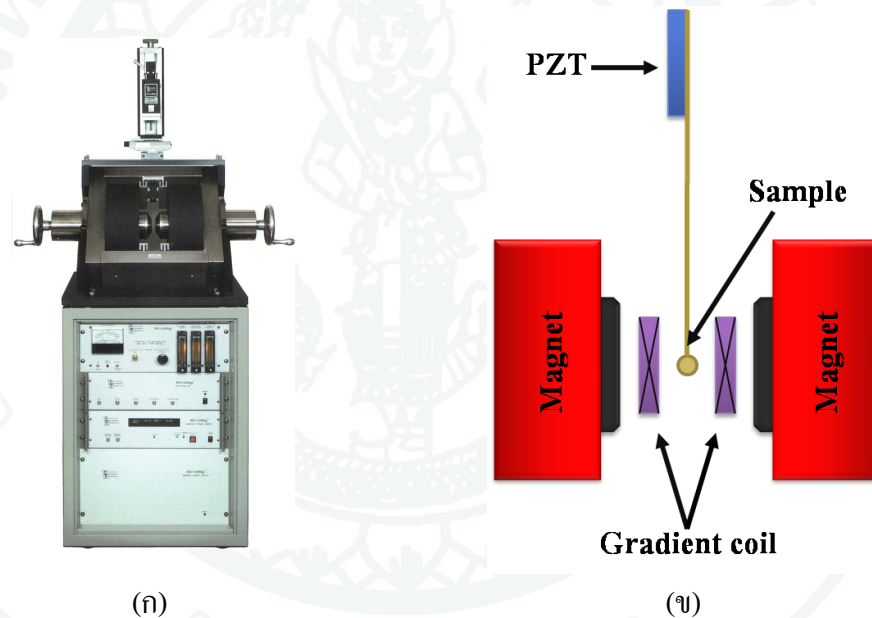
$$F = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{H}_{total}) \quad (13)$$

$$F = \vec{m} \cdot \nabla \vec{H}_{total} \quad (14)$$

$$F = \vec{m} \cdot \nabla(H + h) \quad ; \nabla H = 0 \quad (15)$$

$$F = \vec{m} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (16)$$

เมื่อ  $H$  คือสนามแม่เหล็กแบบกระแสตรง  
 $h$  คือสนามแม่เหล็กแบบกระแสลับ



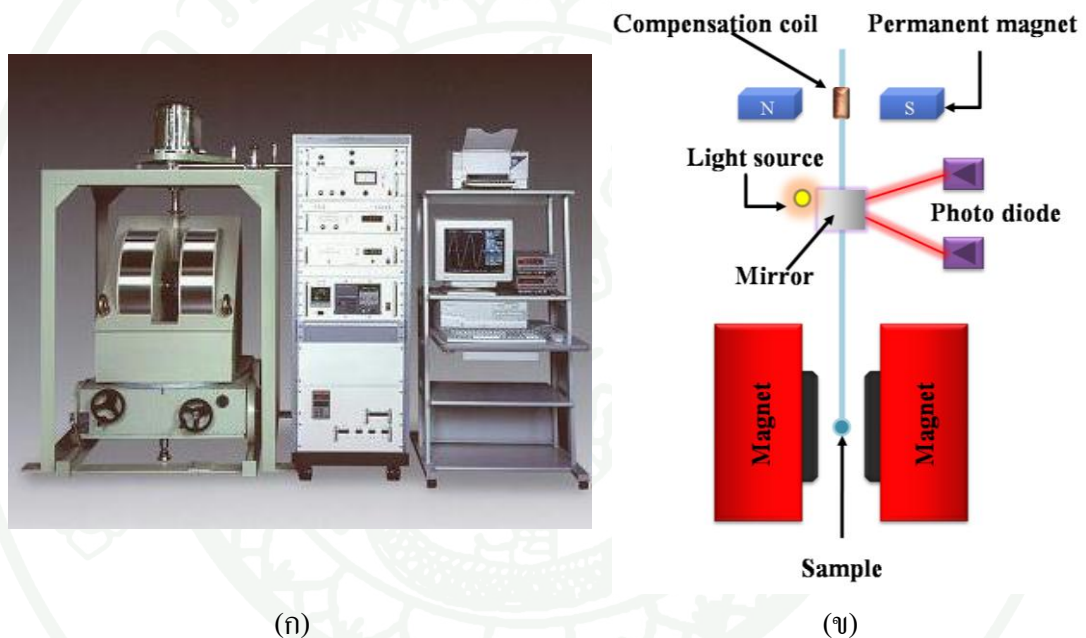
ภาพที่ 7 แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับของบริษัท MicroMag™ รุ่น 2009 (ก) แผนภาพ  
 แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์สลับ (ข)

### 2.3 ทอร์กแมกนีโตมิเตอร์ (torque magnetometer)

ทอร์กแมกนีโตมิเตอร์ (torque magnetometer) เป็นแมกนีโตมิเตอร์แบบอาศัยสมดุลของแรงบิดที่กระทำต่อแท่งวัสดุแม่เหล็ก โดยค่าทอร์ก ( $\tau$ ) ที่กระทำต่อวัสดุแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับแมกนีโตเซชันของวัสดุตั้งสมการ

$$\vec{\tau} = \mu_0(\vec{m} \times \vec{H}) \quad (17)$$

โดยทอร์กดังกล่าวจะทำให้แกนยี่ดิววัสดุแม่เหล็กหมุน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่สะท้อนมากระทบโฟโตไดโอด เมื่ออาศัยการชดเชยแบบป้อนกลับโดยการจ่ายกระแสผ่านขดลวดชดเชย (compensation coil) ที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก เพื่อทำให้เกิดทอร์กในทิศตรงกันข้ามและทำให้ความเข้มแสงสะท้อนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดมีค่าคงเดิมอีกครั้ง ดังนั้น กระแสที่ต้องจ่ายให้แก่ขดลวดชดเชยจะเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กตั้งสมการที่ (17) ตัวอย่างทอร์กแมกนีโตมิเตอร์และแผนภาพการทำงานแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ทอร์กแมกนีโตมิเตอร์รุ่น TRT ผลิตโดยบริษัท TOEI (ก) แผนภาพแสดงส่วนประกอบของทอร์กแมกนีโตมิเตอร์ (ข)

#### 2.4 แมกนีโตมิเตอร์แบบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็กของเคอร์

แมกนีโตมิเตอร์แบบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็กของเคอร์ (magneto-optic Kerr effect magnetometer; MOKE) เป็นแมกนีโตมิเตอร์สำหรับวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่อาศัยปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (magneto optical) ในวัสดุแม่เหล็ก กล่าวคือ เมื่อมีแสงโพลาไรซ์ส่องกระทบผิวของวัสดุแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวจะทำให้เกิดการหมุนของระนาบโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านและสะท้อนจากวัสดุแม่เหล็กตัวอย่าง โดยการเปลี่ยนแปลงของระนาบ

การโพลาไรเซชันของแสงจะแปรผันตรงกับแมกนีโตเซชัน บริเวณผิว ของวัสดุแม่เหล็ก เมื่อค่าแมกนีโตเซชันของวัสดุ เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อให้แสงสะท้อนผ่านตัววิเคราะห์ จะทำให้ค่าความเข้มแสงที่สะท้อนจากวัสดุแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง โดยสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ( $I$ ) ได้จากกฎมาลุส (Malus' law) ดังสมการ

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (18)$$

เมื่อ  $I_0$  คือค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ  
 $\theta$  คือค่ามุมระหว่างระนาบของแสงที่ตกกระทบโพลาไรเซชัน

แมกนีโตมิเตอร์แบบแบบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็กของเคอร์ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แมกนีโตมิเตอร์แบบปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็กของเคอร์ของบริษัท HINDS

### สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

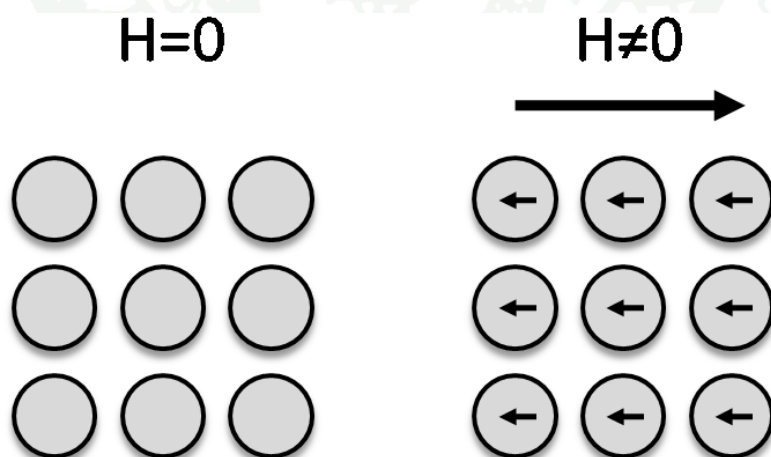
ความเป็นแม่เหล็ก ของวัสดุเป็น ผลจากโมเมนตัมเชิงมุม ( angular momentum) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน และเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน โดยที่อิเล็กตรอนจะมีการสปิน ได้สองแบบคือ “ขึ้น” หรือ “ลง” เท่านั้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นไดโพล โมเมนต์แม่เหล็กขนาดเล็ก

## 1. วัสดุแม่เหล็ก

สมบัติแม่เหล็กของวัสดุเกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิตามอยู่ในวัสดุ เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก และสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 1.1 วัสดุแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic)

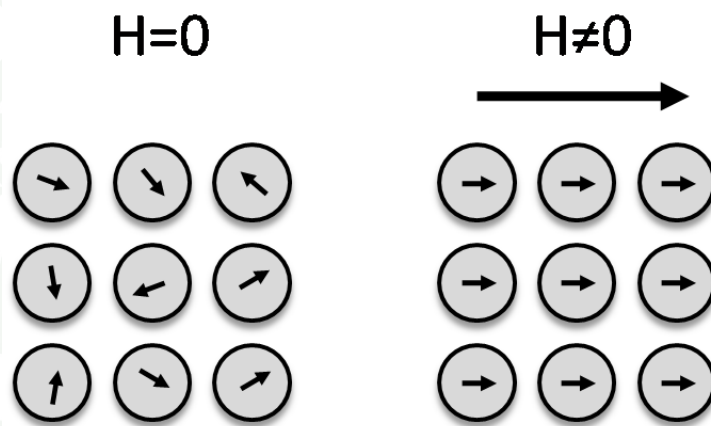
วัสดุแม่เหล็กไดอะ เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มี สภาพความเป็นแม่เหล็ก น้อย สามารถพบได้ในวัสดุทุกประเภท และสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะไม่ถาวร โดยวัสดุที่แสดงสมบัติแม่เหล็กไดอะเด่นชัดคือวัสดุที่มีอิเล็กตรอนภายในอะตอมครบคู่ ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กสุทธิในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่ออยู่ภายใต้อำนาจของสนามแม่เหล็กภายนอก แรงแม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศที่มีโมเมนต์แม่เหล็กในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ช้าลง ในขณะที่อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศที่มีโมเมนต์แม่เหล็กสวนทางกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงทำให้มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิสวนทางกับทิศของสนามแม่เหล็กภายนอกดัง แสดงในภาพที่ 10 ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ( $\chi_m$ ) ของวัสดุแม่เหล็ก ไดอะจึงมีค่าเป็นลบ และ จะมีค่าอยู่ในช่วง  $-10^{-5}$  ถึง  $-10^{-6}$  ตัวอย่างวัสดุแม่เหล็ก ไดอะได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ ทองแดง เงิน สังกะสี ซิลิกอน เป็นต้น



ภาพที่ 10 ทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กไดอะ

### 1.2 วัสดุแม่เหล็กพารา (paramagnetic material)

วัสดุแม่เหล็กพารา เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มี โมเมนต์แม่เหล็ก ภายในที่แน่นอน แต่ผลของความรอนทำให้โมเมนต์แม่เหล็ก จัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้สนามแม่เหล็ก ภายนอกกับ วัสดุแม่เหล็กพารา โมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุจะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก (ดัง แสดงในภาพที่ 11) โดยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ของวัสดุแม่เหล็กพาราจะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-2}$  ตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กพาราได้แก่ อะลูมิเนียม โครเมียม โมลิบดีนัม โซเดียม ไทเทเนียม เซอร์โคเนียม เป็นต้น



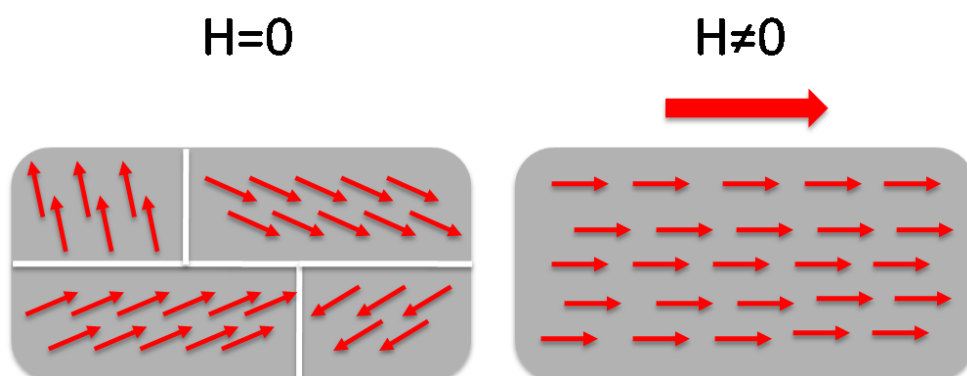
ภาพที่ 11 ทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กพารา

### 1.3 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic material)

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร เป็นวัสดุ แม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรถึงแม้ไม่ได้อยู่ใน สนามแม่เหล็ก และมีค่าแมกนีไทเซชันสูงมาก เช่น เหล็ก BCC (ferrite) โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กได้สูงถึง  $10^6$  ซึ่งจะทำให้ค่า  $M \gg H$  ดังนั้น

$$B \cong \mu_0 M \quad (19)$$

ภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรจะประกอบด้วยบริเวณที่โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจัดเรียงตัวในทิศ เดียวกันเรียกว่าโดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain) และระหว่างแต่ละ โดเมนจะมีการเปลี่ยนทิศของ โมเมนต์จากทิศหนึ่ง ไปเป็นอีกทิศหนึ่งเรียกว่าผนังโดเมน (domain wall) ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 โมเมนต์แม่เหล็กภายใน โดเมนแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และสถานะที่มีสนามแม่เหล็ก

จากภาพที่ 12 ในสถานะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ภายในแต่ละโดเมนของ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมจะจัดเรียงตัวในแนวขนานกันทำให้แต่ละโดเมนมีแมกนีโตเซชันที่สูงมาก แต่แมกนีโตเซชันของแต่ละโดเมนที่ชี้ในทิศต่างกัน ทำให้ แมกนีโตเซชันสุทธิของ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อ อยู่ภายใต้ สนามแม่เหล็กภายนอก โมเมนต์แม่เหล็กในโดเมนที่อยู่ในทิศที่ต่างจากสนามแม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก (หรือทิศใกล้เคียง) ส่งผลให้ ผนังโดเมน ขยายออก และแมกนีโตเซชันสุทธิของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

1) วัสดุแม่เหล็กถาวร (hard ferromagnetic materials) เป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่สามารถ รักษาความเป็นแม่เหล็กได้นาน โดเมนแม่เหล็กไม่อ่อนตัวง่าย ต้องใช้ความร้อนหรือสนามแม่เหล็กสูงในการเปลี่ยนทิศโมเมนต์แม่เหล็ก ตัวอย่างเช่น Nd-Fe-B, Alnico

2) วัสดุแม่เหล็กอ่อน (soft ferromagnetic materials) ความเป็นแม่เหล็ก สูญเสียได้ง่าย โดเมนแม่เหล็กอ่อนตัว สามารถหมุน ไปมาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น เหล็กโคบอลต์ และนิกเกิล

#### 1.4 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริ (ferrimagnetic material)

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริ เป็นวัสดุที่มีอะตอมหนาแน่นสูง โดยโมเมนต์แม่เหล็กภายในของ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริจะชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกัน แต่ไม่สามารถหักล้างกันหมด ทำให้วัสดุแม่เหล็ก

ประเภทนี้ยังมีความเป็นแม่เหล็กอยู่ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำเนื่องจาก สารประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ จึงเหมาะสำหรับนำไปทำเป็นแกนหม้อแปลงความถี่สูง ตัวอย่างของเช่น  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  และ  $\text{Zn Fe}_2\text{O}_4$



ภาพที่ 13 โมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริ

#### 1.5 วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetic material)

วัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุที่จะจัดเรียงตัวในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการหักล้างกันเอง และไม่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ทำให้ค่าแมกนีไทเซชันของวัสดุมีค่าต่ำศูนย์ โดยถึงแม้จะให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกแก่ วัสดุแม่เหล็กชนิดนี้ ก็ไม่สามารถที่จะทำให้สนามแม่เหล็กของอะตอมเกิดการหักล้างกันได้ ตัวอย่างวัสดุเช่น  $\text{NiO}$  และ  $\text{CoCl}_2$



ภาพที่ 14 โมเมนต์แม่เหล็กภายในวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่ชี้ในทิศที่หักล้างกัน

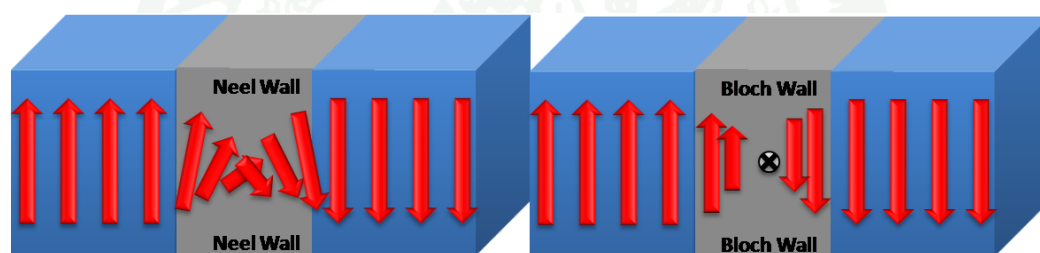
#### 1.6 วัสดุแม่เหล็กซูเปอร์พารา (superparamagnetic material)

วัสดุแม่เหล็กซูเปอร์พารา เป็นวัสดุแม่เหล็กที่เกิดจาก วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่มีขนาดเล็กจนถึงจุดวิกฤติ จนทำให้มีผนังโดเมนภายใน วัสดุแม่เหล็กเกิดความไม่เสถียร ทำให้อนุภาคแม่เหล็กเฟอร์โรมีสภาพเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว และแสดงสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างจากสมบัติ

แม่เหล็กเฟอร์โร โดยวัสดุแม่เหล็กซูเปอร์พารา จะมีสมบัติแม่เหล็กที่ไม่มั่นคง มีการแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และจะแสดง สมบัติทางแม่เหล็กเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุแม่เหล็กซูเปอร์พาราสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การใช้นำส่งยาหรือสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมายโดยการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกร่างกาย เป็นต้น

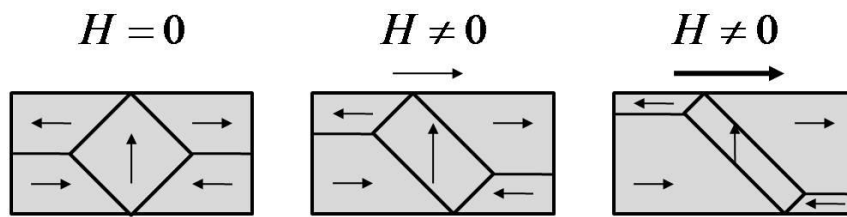
## 2. โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain)

เมื่ออุณหภูมิของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร และวัสดุแม่เหล็ก เฟอร์ริต่ำกว่า อุณหภูมิวิกฤติ จะมีบริเวณที่เกิดการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กในทิศเดียวกันเป็นบริเวณกว้าง โดยจะเรียกบริเวณนั้นว่า โดเมนแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละโดเมนแม่เหล็กจะแยก จากกันด้วยขอบเขตโดเมนหรือ ผนังโดเมน ซึ่งเป็นบริเวณที่ โมเมนต์แม่เหล็ก ระหว่าง โดเมนที่ติดกันค่อยๆ เปลี่ยน จากทิศหนึ่งไปเป็นอีกทิศหนึ่ง โดยสามารถจำแนกผนังโดเมนออกเป็นสองประเภท ดังแสดงในภาพที่ 15



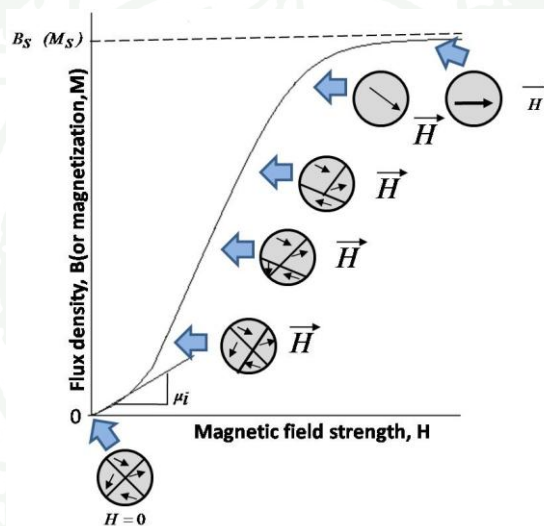
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กในผนังโดเมน

เมื่อโมเมนต์แม่เหล็กในผนังโดเมนค่อยๆ เปลี่ยนแปลงโดยชี้ในระนาบเดียวกับโมเมนต์แม่เหล็กของโดเมนทั้งสองเรียกว่าผนังแบบนีล ( Neel wall) และในกรณีที่การหมุนของโมเมนต์แม่เหล็กในผนังโดเมนอยู่ในทิศตั้งฉากกับทิศของ โมเมนต์แม่เหล็กในโดเมน เรียกว่าผนังแบบบล็อช ( Bloch wall) โดเมนแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร และแม่เหล็กเฟอร์ริ ก่อนที่จะได้รับสนามแม่เหล็ก จะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางต่างกัน แต่เมื่อ ได้รับสนามแม่เหล็ก โดเมนแม่เหล็กที่จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามจะค่อยๆ มีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่เดียวกัน โดเมนแม่เหล็กที่จัดเรียงตัว ในทิศอื่นๆ จะมีขนาดเล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การขยายตัวของโดเมนแม่เหล็กในวัสดุเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก

การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  (และแมกนีไทเซชัน  $M$ ) ของวัสดุแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กภายนอกต่างๆ กันสามารถแสดงดังภาพที่ 17

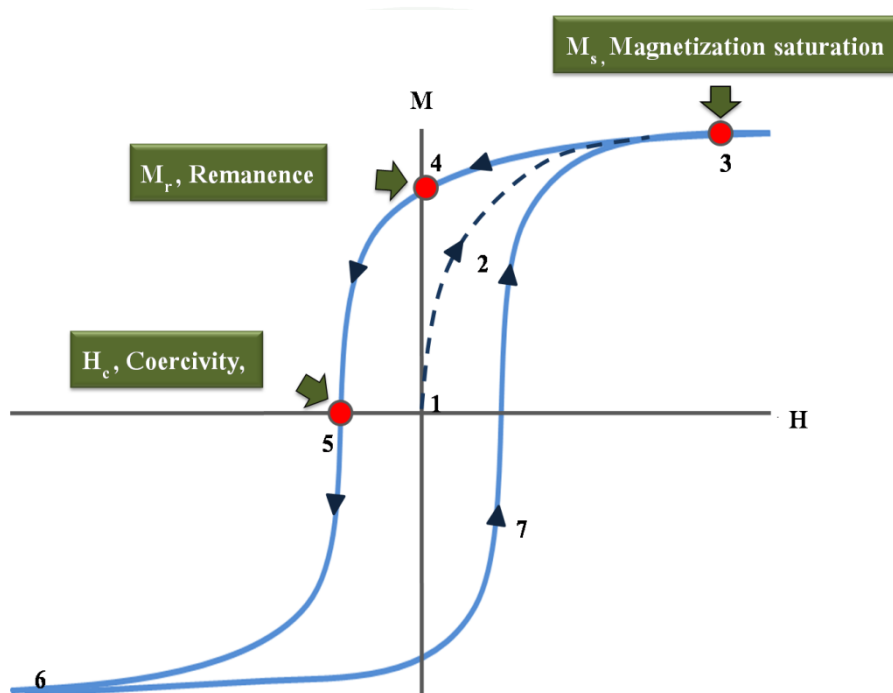


ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

จากภาพที่ 17 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก และแมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็ก ในช่วงแรกจะสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ความชันของกราฟในช่วงนี้คือ ค่า สภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กเริ่มต้น (initial permeability;  $\mu_i$ ) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของ วัสดุแม่เหล็กแต่ละชนิด หลังจากช่วงแรกนี้กราฟระหว่างค่าสนามแม่เหล็ก และค่าแมกนีไทเซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างรวดเร็วจนถึงจุดอิ่มตัว ค่าแมกนีไทเซชันจะมีค่าคงที่เนื่องจากทุกโดเมนแม่เหล็กในวัสดุจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนาม โดยเรียกค่าแมกนีไทเซชันนี้ว่า แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (magnetization saturation;  $M_s$ )

### 3. วงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop)

วงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) คือกราฟที่บ่งชี้ถึงลักษณะสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์ริที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังภาพที่ 18



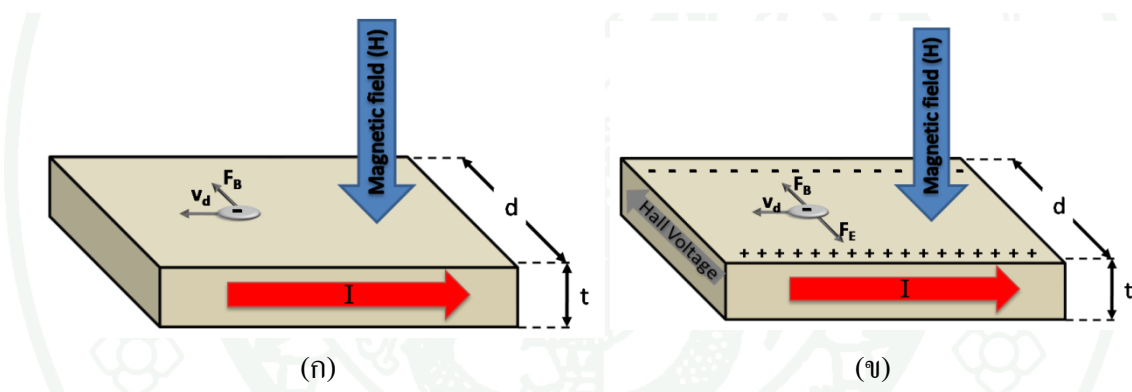
ภาพที่ 18 วงฮีสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ริ

เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ วัสดุแม่เหล็กที่ตำแหน่งที่ 1 จะทำให้ค่าแมกเนไทเซชันของ วัสดุแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น และสามารถกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกจากวัสดุ จากนั้นเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกจนถึงจุดที่ 2 ค่าแมกเนไทเซชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ มีการอึดตัวของ แมกเนไทเซชันที่ตำแหน่งที่ 3 ที่จุดนี้ถึงแม้ว่าจะเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกแก่วัสดุแม่เหล็ก ค่าแมกเนไทเซชันของ วัสดุแม่เหล็กจะไม่สามารถเพิ่มขึ้น ได้อีก เมื่อลดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกลงมาจน เป็นศูนย์ ค่าแมกเนไทเซชันก็จะไม่กลับลงมายังตำแหน่งเดิม โดยจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กในตำแหน่งที่ 1 โดยเรียกแมกเนไทเซชันในตำแหน่งที่ 4 นี้ว่า แมกเนไทเซชัน คงค้าง (remanence magnetization;  $M_r$ ) โดยแมกเนไทเซชัน คงค้างจะมี ค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของ วัสดุแม่เหล็ก จากนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ วัสดุแม่เหล็ก ในทิศตรงข้ามกับครั้งแรก แมกเนไทเซชันจะลดลงจนเป็นศูนย์ในตำแหน่งที่ 5 โดยจะเรียก สนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้ค่าแมกเนไทเซชัน ของวัสดุเป็น ศูนย์นี้ว่า สนามลบล้าง (coercive field;  $H_c$ ) จากนั้น

เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางตรงกันข้ามค่าแมกเนโตเซชันจะเกิดการเปลี่ยนทิศเข้าสู่ทิศทางตรงกันข้ามและเข้าสู่จุดอิ่มตัว (จากตำแหน่งที่ 5 มาตำแหน่งที่ 6) และเมื่อลดสนามแม่เหล็กภายนอกจนเป็นศูนย์ก็จะเกิด แมกนีโตเซชัน คงค้างในทิศทางตรงกันข้าม ดังตำแหน่งที่ 6 จนถึงตำแหน่งที่ 7

### ปรากฏการณ์ฮอลล์

เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน และให้สนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำ ประจุพาหะในแผ่นตัวนำบางจะเกิดการเบนไปจากเดิม และผลจากการเบนนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage) ระหว่างขอบของแผ่นตัวนำ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

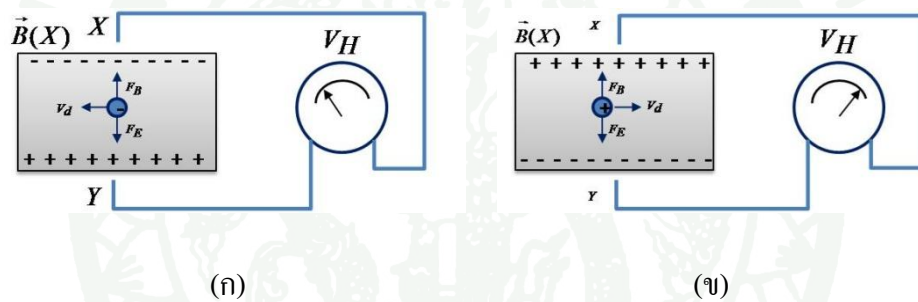
จากภาพที่ 19 (ก) แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง ( $d$ ) หนา ( $t$ ) และมีกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน  $v_d$ ) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) จากด้านขวาไปด้านซ้าย จากนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบาง ทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก ( $F_B$ ) กระทำกับอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นประจุลบ ให้เบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง จากภาพที่ 19 (ข) เมื่อเวลาผ่านไปอิเล็กตรอน ประจุลบ จะถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าว ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ที่เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field;  $E_H$ ) เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอน

จะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ดังนี้

$$E_H = \frac{V_H}{d} \quad (20)$$

โดยค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall potential difference;  $V_H$ ) ซึ่งจะมีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซีลีคอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่า จากสมการ (20) จะได้

$$V_H = E_H d \quad (21)$$



ภาพที่ 20 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ ( $V_H$ ) ที่มีประจุพาหะเป็นลบ (ก) และประจุพาหะบวก (ข)

จากภาพที่ 20 (ก) พาหะประจุอิเล็กตรอนจะมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีประจุบวกทิศของอัตราเร็วลอยเลื่อน จะตรงข้ามกับในภาพที่ 20 (ก) แต่ทิศของแรงไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าฮอลล์ยังคงเดิม ดังแสดงในภาพที่ 20 (ข) ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้าน บน ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้าน ล่าง และสภาพขั้วของความต่างศักย์ฮอลล์ จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมีประจุลบ จากภาพที่ 20 (ข) ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน จะได้

$$(-e)E_H = (-e)v_d B \quad (22)$$

$$E_H = v_d B \quad (23)$$

จากสมการ (23) จะได้

$$V_H = E_H d \quad (24)$$

$$V_H = v_d B d \quad (25)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน  $v_d$  มีค่าเท่ากับ

$$v_d = \frac{I}{neA} \quad (26)$$

กำหนดให้  $n$  คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตรและ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง แทนสมการ (26) ลงในสมการ (25) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (27)$$

จากสมการที่ (27) เนื่องจาก  $t = \frac{A}{d}$  คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (28)$$

สมการ (28) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = netI^{-1}V_H \quad (29)$$

ปริมาณ  $V_H$   $I$  และ  $t$  ในสมการ 29 หาได้จากการวัด ส่วนค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ ทำหัววัดวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ จะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ หารู้ตามก็มากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่มีค่า  $n \approx 10^{22} \text{ m}^{-3}$  และโลหะทั่วไปมีค่า  $n \approx 10^{28} \text{ m}^{-3}$  ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กจากสมการ 29 ได้โดยปัจจุบัน ปรากฏการณ์ ฮอลล์จะอยู่ในรูปแบบของวงจรรวม หรือ IC (integrated circuit) ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะให้ ความต่างศักย์เอาท์พุทสูงกว่าตัวนำไฟฟ้าทั่วไป

## ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ถูกค้นพบครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie ซึ่งพบว่าเมื่อมีแรงกระทำในลักษณะของแรงดึงหรือแรงกด ที่โครงสร้างของผลึก (crystals) จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น และในทางกลับกันเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ผลึก จะทำให้เกิดการยืดหรือหดตัวของโครงสร้าง และได้เรียกคุณสมบัตินี้ว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (inverse effect)

### 1. คุณสมบัติวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (PZT)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยเมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ เพียโซอิเล็กทริกแล้ว จะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่วัสดุหรือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดย เมื่อให้ความต่างศักย์แก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการยืดหรือหดตัวได้

คุณสมบัติการทำงานของวัสดุ เพียโซอิเล็กทริก จะแบ่งได้ 2 คุณสมบัติ ดังนี้

1) คุณสมบัติทางกล ซึ่งประกอบไปด้วย ความเครียด และความเค้น โดยเมื่อมีแรงกระทำกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในลักษณะของแรงดึงหรือแรงกด จะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ขั้วของวัสดุ (direct effect) ทิศทางของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจะเปลี่ยน แปลงตามลักษณะของแรงที่มากระทำ โดยสามารถเรียกลักษณะการทำงานของวัสดุประเภทนี้ว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducers)

2) คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย สนามไฟฟ้า (electric field; E) และ โพลาริเซชัน (polarization; P) วัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทนี้จะทำงาน แตกต่างจากการทำงานของ เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ในทางตรงข้าม กล่าวคือเมื่อความต่างศักย์ทางไฟฟ้าให้ที่ขั้วของวัสดุ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดการยืดหดตัว (inverse effect) และเมื่อจ่ายความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่มีความถี่แบบสลับ (ac voltage) ก็จะทำให้วัสดุเกิดการสั่นตามความถี่ของความต่างศักย์ที่ป้อนให้ โดยเรียกลักษณะการทำงานของวัสดุประเภทนี้ว่า วัสดุ เพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์ (piezoelectric actuators)

## 2. ความสัมพันธ์พื้นฐานของสมบัติวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

จากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เพียโซอิเล็กทริก เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ จะทำให้วัสดุมีการกระจัดทางไฟฟ้า (dielectric displacement;  $D$ ) ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (30)$$

$$S = s^E T + dE \quad (31)$$

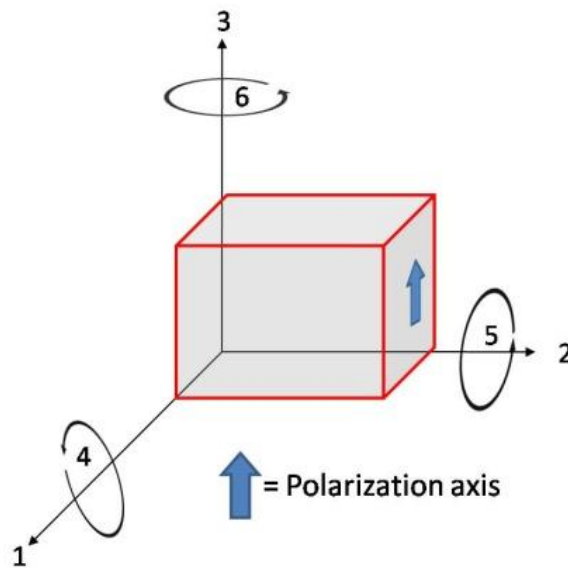
- เมื่อ  $d$  คือค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก  
 $s^E$  คือค่าความสามารถยืดหยุ่นทางกล  
 $\epsilon^T$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อแรงเค้นคงที่  
 $T$  คือค่าความเค้น  
 $S$  คือค่าความเครียด

จากสมการที่ 30 และสมการที่ 31 สามารถอธิบายคุณสมบัติที่เกิดจากการเรียงทิศทางที่แตกต่างกันของวัสดุ ซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับคุณสมบัติของวัสดุ เพียโซอิเล็กทริก โดยลักษณะทิศทางของผลึกสามารถพิจารณาได้จาก ภาพที่ 21 เช่นทิศทางความเครียดและทิศทางการโพลาไรเซชัน โดยทิศทางจะระบุไว้ดังเช่นค่าสัมประสิทธิ์  $d_{31}$  แสดงค่าโพลาไรเซชันที่เกิดในทิศทางที่ 3 เมื่อแรงที่กระทำในทิศทางที่ 1 สามารถหาค่าความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ปรากฏการณ์แบบตรง (Direct effect)} \quad D_3 = d_{33} T_3 \quad (32)$$

$$\text{ปรากฏการณ์แบบผกผัน (Inverse effect)} \quad S_3 = d_{33} E_3 \quad (33)$$

ค่า  $d_{33}$  จะมีค่าเท่ากันทั้ง 2 สมการ โดยจะอยู่ในช่วง  $10^{-12}$  C/N สำหรับปรากฏการณ์แบบตรงและอยู่ในช่วง  $10^{-12}$  m/V สำหรับปรากฏการณ์แบบผกผัน



ภาพที่ 21 แสดงทิศทางของผลึก

ค่าสนามแม่เหล็กในสภาวะเปิด วงจร (open circuit electric field;  $g$ ) หรือค่าความสามารถในการให้ความต่างศักย์ต่อหน่วยของความเค้นที่ได้รับ ก็เป็นค่าที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$g = \frac{d}{K\epsilon_0} \quad (34)$$

เมื่อ  $K$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์ (relative dielectric constant)

$\epsilon_0$  ค่าสภาพยอม (permittivity) ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้า (piezoelectric coupling factor;  $k_p$ ) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจากพลังงาน เช่น เปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นไฟฟ้า เมื่อมีการให้แรงกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หรือเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นกล เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณดังนี้

$$k_p = \left[ \frac{f_a - f_r}{0.395 f_r + 0.547 (f_a - f_r)} \right]^{1/2} \quad (35)$$

เมื่อ  $f_r$  คือค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุ  
 $f_a$  คือค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน

ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor;  $Q_m$ ) คือค่าที่บอกถึงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานระหว่างพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า หรือค่าบ่งบอกถึงความสามารถในการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ในวงจรสมมูล (equivalent series circuit) ซึ่งค่าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือส่งผ่านพลังงานจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของวัสดุ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r C Z_r (f_a^2 - f_r^2)} \quad (36)$$

เมื่อ  $Z_r$  คือค่าความต้านทานของวัสดุที่ความถี่เรโซแนนซ์  
 $C$  คือค่าความจุทางไฟฟ้า

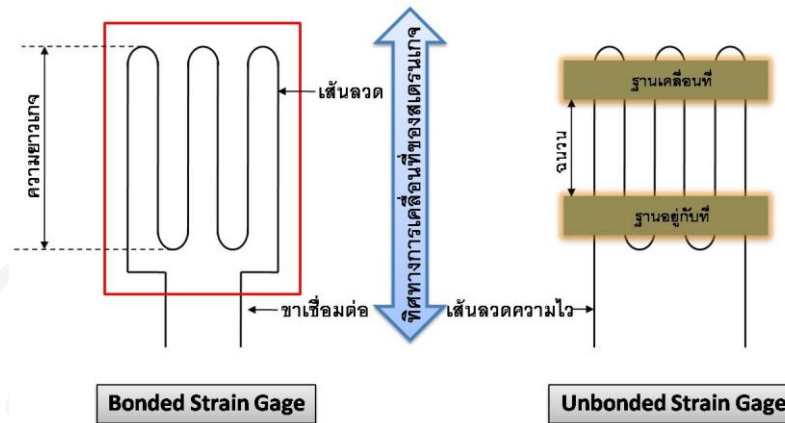
#### สเตรนเกจ

สเตรนเกจ (strain gage) คือ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด กล่าวคือเมื่อมีแรงมากระทำบนเส้นลวด สเตรนเกจ จะเกิดความต้านทานขึ้นที่เส้นลวดและสามารถวัดค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ โดยส่วนมากใช้ในการตรวจวัด น้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ โดยทั่วไป สเตรนเกจ จะแบ่งออกได้ 2 แบบ คือแบบยึดติด (bonded strain gage) และแบบไม่ยึดติด (unbonded strain gage) ซึ่งโครงสร้างทั้งสองชนิดจะ ประกอบด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ ขดไปมา เมื่อ สเตรนเกจที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ในลักษณะถูกดึงให้ยืดออก ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง จึงทำให้ความต้านทานของเส้นลวดเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรผันตรงกับความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (37)$$

เมื่อ  $R$  คือค่าความต้านทานของสเตรนเกจ  
 $\rho$  คือค่าความต้านทานคงที่ของตัวโลหะ

- $L$  คือค่าความยาวของเส้นลวด  
 $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ



ภาพที่ 22 โครงสร้างการทำงานของสเตรนเกจ

ในภาพที่ 22 โครงสร้างของสเตรนเกจแบบแบบยึดติด ที่ทำมาจากเส้นลวดเล็กๆ ขดไปขดมาหลายครั้ง และยึดติดไว้บนแผ่นกระดาษหรือพลาสติกบางๆ โดยทั่วไปเส้นลวดจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.001 นิ้ว และมีค่าความต้านทาน 120  $\Omega$  ส่วน โครงสร้างของสเตรนเกจแบบไม่ยึดติด จะทำจากเส้นลวดเล็กๆ ที่ติดอยู่กับฐาน ที่เคลื่อนที่ และฐานที่อยู่กับที่ ในการใช้งานสเตรนเกจ เพื่อตรวจวัดความเครียดวัตถุ นั้น จะพิจารณาปริมาณทางกายภาพสอง ตัวแปร คือ ค่าความต้านทานของเกจที่เปลี่ยนแปลง และค่าของความยาวที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่า “เกจแฟกเตอร์” (gage factor;  $K$ ) ดังสมการ

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (38)$$

- เมื่อ  $R$  คือความต้านทานเริ่มต้น  
 $\Delta R$  คือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง  
 $L$  คือความยาวเริ่มต้น  
 $\Delta L$  คือความยาวที่เปลี่ยนแปลง

โดยในเทอมของ  $\Delta L/L$  สามารถกำหนดเป็นหน่วยของความเครียด (unit strain) ใช้อักษรแทนด้วย  $\epsilon$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ใหม่เป็น

$$K = \frac{\Delta R/R}{G} \quad (39)$$

จากกฎของฮุก (Hooke's law) สามารถนิยามค่าความเค้น เป็นแรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิวต่อหน่วยพื้นที่ โดยสมการของความเค้น คือ

$$S = \frac{F}{A} \quad (40)$$

เมื่อ  $S$  คือค่าความเค้น  
 $F$  คือแรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิวต่อหน่วยพื้นที่  
 $A$  คือพื้นที่

ค่าคงที่ของสัดส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดตามกฎของฮุก เรียกว่า ยังโมดูลัส (young's modulus;  $Y$ ) ซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$Y = \frac{s}{G} \quad (41)$$

เมื่อ  $s$  คือค่าความเค้น  
 $G$  คือค่าความเครียด

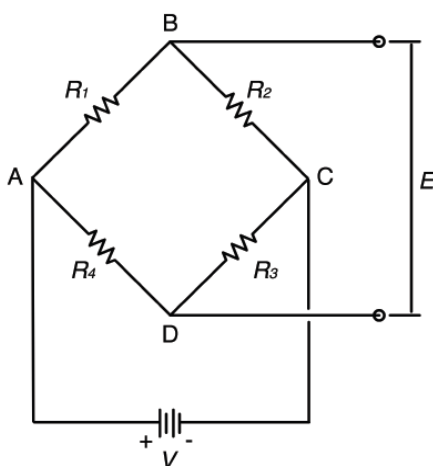
โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของสเตรนเกจตามวัสดุที่นำมาใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สเตรนเกจชนิดโลหะ และสเตรนเกจชนิดสารกึ่งตัวนำ

1. สเตรนเกจชนิดโลหะทำมาจากวัสดุที่เป็นเส้นลวดความต้านทานบางๆ ขนาดเล็กมาก หรือทำมาจากฟอยล์โลหะ (metal foil) บางๆ นำมาตัดเป็นรูปคล้ายกับเส้นลวดของสเตรนเกจ ข้อดีของสเตรนเกจชนิดนี้สามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงได้ดี
2. สเตรนเกจชนิดสารกึ่งตัวนำจะทำมาจากผลึกซิลิคอน ที่มีค่าแกมมาแฟกเตอร์สูงประมาณ 50 ถึง 200 สเตรนเกจชนิดนี้จะมีควมไวสูงประมาณ 10 เท่าของสเตรนเกจแบบเส้นลวด แต่มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ โดยทั่วไปจะใช้งานเฉพาะ ซึ่งลักษณะการใช้งานของสเตรนเกจจะใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความยืดหรือหดตัวของวัตถุ เช่น ในการวัดความเครียดในคานเสาของงานทางด้านโยธา

จะวัดได้โดยนำสเตรนเกจไป ยึดติดกับแกนหรือเสาที่ต้องการวัด จากนั้นเชื่อมต่อเป็น วงจรบริดจ์ เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง

### วงจรวิทสโตนบริดจ์

หลักการการใช้สเตรนเกจวัดความเครียดโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ( $\Delta E$ ) ที่เกิดขึ้นในรูปแบบวงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 วงจรวิทสโตนบริดจ์

โดยความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B และ ความต่างศักย์ระหว่างจุด C และ D สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (42)$$

$$V_{CD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V \quad (43)$$

ซึ่งความต่างศักย์ระหว่างจุด B และ D เป็น

$$\Delta E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} \quad (44)$$

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot V \quad (45)$$

เมื่อบริดจ์สมดุล  $E = 0$  ดังนั้น  $R_1 R_3 = R_2 R_4$

ในขณะที่วัดความเครียด ความต้านทานไฟฟ้าของ  $R_1, R_2, R_3$  และ  $R_4$  เปลี่ยนแปลงเป็น  $R_1 + \Delta R_1, R_2 + \Delta R_2, R_3 + \Delta R_3$  และ  $R_4 + \Delta R_4$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ( $\Delta E$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta E = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 & R_2 + \Delta R_2 \\ R_4 + \Delta R_4 & R_3 + \Delta R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2 & 0 \\ 0 & R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4 \end{vmatrix}} \cdot V \quad (46)$$

หรือ

$$\Delta E = \frac{A}{B} \cdot V \quad (47)$$

โดยกำหนดให้

$$A = \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot R_1 R_3 \quad (48)$$

$$B = \frac{R_1 R_3 (R_1 + R_2)^2}{R_1 R_2} \quad (49)$$

ดังนั้น

$$\Delta E = \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V \quad (50)$$

$$\Delta E = \frac{r}{(1+r)^2} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V \quad (51)$$

โดยกำหนดให้

$$r = R_2 / R_1 \quad (52)$$

### หน่วยและปริมาณทางแม่เหล็ก

ระบบหน่วยที่ใช้ในปัจจุบันมี 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบ gaussian หรือ CGS และระบบ MKS หรือ SI นอกจากนี้ระบบ SI ยังแบ่งเป็นอีกสองรูปแบบ คือ SI-sommerfeld และ SI-kennelly ระบบ SI เป็นระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1960 โดย SI เป็นอีกหน่วยที่ได้รับการยอมรับให้ใช้ในการวัดเกี่ยวกับแม่เหล็กโดย the international union for pure and applied physics (IUPAP) หลังจากนั้นหน่วยนี้ได้ค่อยๆ ถูกนำมาใช้ในหมู่ของผู้ที่สนใจศึกษาเรื่องแม่เหล็ก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติทางแม่เหล็ก

ปริมาณ	สัญลักษณ์	SI (sommerfeld)	SI (kennelly)	EMU (gaussian)
สนามแม่เหล็ก	$H$	A/m	A/m	Oersteds (Oe)
การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก	$B$	T	T	gauss (G)
ความเป็นแม่เหล็ก	$M$	A/m	-	emu/g
ความเข้มของขั้ว	$p$	Am	Wb	emu/cm
ความเข้มของสภาพแม่เหล็ก	$I$	-	T	-
โมเมนต์	$m$	Am <sup>2</sup>	Wb	emu
ฟลักซ์	$\Phi$	Wb	Wbb	Maxwell (Mx)
สมการสนามแม่เหล็ก	—	$B = \mu_0(H + M)$	$B = \mu_0H + I$	$B = H + 4\pi M$
พลังงานของโมเมนต์แม่เหล็ก	—	$E = -\mu_0 m \cdot H$	$E = -m \cdot H$	$E = -m \cdot H$

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ปริมาณ	สัญลักษณ์	SI (sommerfeld)	SI (kennelly)	EMU (gaussian)
การหมุนของโมเมนต์แม่เหล็ก	-	$\tau = \mu_0 m \times H$	$\tau = m \times H$	$\tau = m \times H$

### การเทียบมาตรฐานแมกนีโตมิเตอร์โดยใช้วัสดุอ้างอิง

การเทียบมาตรฐานของเครื่องแมกนีโตมิเตอร์ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการวัดสมบัติแม่เหล็กของวัสดุ ทั้งนี้เพื่อให้ผลการวัดมีความน่าเชื่อถือ และสามารถรายงานค่าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปการเทียบมาตรฐานของเครื่องแมกนีโตมิเตอร์จะใช้วัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่แน่นอนเป็นตัวเทียบ และวัสดุอ้างอิงที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือทรงกลม निकิล เนื่องจากคุณสมบัติเด่นด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

- สมบัติทางกายภาพ (physical properties) นิกิลเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ทรานซิชันมีเลขอะตอมเท่ากับ 28 น้ำหนักอะตอมของนิกิลเท่ากับ 58.6934 g โครงสร้างจุลภาคของนิกิลเป็นแบบ FCC (face-centered cubic) ที่อุณหภูมิ 20 °C นิกิลมี lattice constant เท่ากับ 0.35167 nm ความหนาแน่นของนิกิลที่ 25 °C มีค่า 8.902 g/cm<sup>3</sup>

- สมบัติทางอุณหภูมิ (thermal properties) นิกิลมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1453 °C และมีจุดเดือดโดยประมาณอยู่ที่ 2730 °C นิกิลมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากอุณหภูมิ (coefficient of linear thermal expansion) เท่ากับ 13.3  $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$  ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 °C สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) 82.9 W/m·K ที่ 100 °C

- สมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของนิกิลขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของนิกิล ถ้านิกิลบริสุทธิ์จะมีสภาพความต้านทานน้อยกว่านิกิลที่มีมลทินที่อุณหภูมิเท่ากัน สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของนิกิล 99.97 % หรือนิกิลความบริสุทธิ์สูงมีค่า 7.16  $\mu\Omega/\text{cm}$  เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าของนิกิลจะมีค่าเพิ่มขึ้น

- สมบัติทางแม่เหล็ก (magnetic properties) นิกเกิลอยู่ในกลุ่มของ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ที่อุณหภูมิห้อง นิกเกิลมีความสามารถในการคงสภาพแม่เหล็กเมื่อได้รับการแมกนีโตเซชันแล้วและ จะยังคงสภาพแม่เหล็กอยู่จนกว่าจะเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กลดลงจนถึงตำแหน่ง ของจุดคูรี จะสิ้นสภาพความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นการพิจารณาเกี่ยวกับการประยุกต์วัสดุกับงานทาง แม่เหล็กจึงต้องพิจารณาวัสดุที่ อุณหภูมิคูรี สูงๆ เพื่อให้คงสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ดีแม้อุณหภูมิ สูง กว่าอุณหภูมิห้อง ประมาณ  $404^{\circ}\text{C}$  ความบริสุทธิ์ของนิกเกิลมีผลต่อ จุดคูรี คือ นิกเกิลที่มีความ บริสุทธิ์สูงจะมีค่าอุณหภูมิคูรีต่ำกว่านิกเกิลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่า นิกเกิลมีค่าแมกนีโตเซชัน อิ่มตัว ประมาณ  $6500\text{ Oe}$  เมื่อนำสนามแม่เหล็กออกแล้วจะเหลือ แมกนีโตเซชัน คงค้างที่สนามแม่เหล็ก ประมาณ  $3000\text{ Oe}$  และสนามลบล้างประมาณ  $3\text{ Oe}$  โดยสนามลบล้าง นี้นิกเกิลบริสุทธิ์และนิกเกิล มลทินมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

- สมบัติทางเคมี การกัดกร่อนในบรรยากาศทั่วไป มีการกัดกร่อนน้อยกว่า  $0.0025\text{ mm/year}$  โดยเฉพาะนิกเกิล  $200$  ซึ่งเป็น นิกเกิลความบริสุทธิ์ เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศจะมีการมัว เกิดขึ้นที่ผิว การมัวนั้น เกิดจากฟิล์มบางๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น ซัลเฟต การกัดกร่อนในน้ำ กลั่นหรือน้ำน่าน้อยกว่า  $0.0025\text{ mm/year}$  การกัดกร่อนในกรดซัลฟิวริกประมาณ  $0.5\text{ mm/year}$  และ การกัดกร่อนในกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิห้องอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่า  $0.25\text{ mm/year}$

ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าว จะเห็นได้ว่านิกเกิลเป็นวัสดุแม่เหล็กอ้างอิงที่มีความเหมาะสมใน การเทียบมาตรฐานเครื่องแมกนีโตมิเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามในแต่ละครั้งของการเทียบมาตรฐานควร ต้อง ทำความสะอาดผิวหน้าของนิกเกิลเพื่อนำออกไซด์ฟิล์มออกก่อน และต้องติดตั้งวัสดุอ้างอิงที่ ตำแหน่งกึ่งกลางของขดลวดตรวจวัดซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่ติดตั้งวัสดุตัวอย่างที่ต้องการ ตรวจวัด ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องในการเทียบมาตรฐาน

### การประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM

ในการตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ จะเกิดค่าความไม่แน่นอนในการวัดติดมาด้วย เสมอ ซึ่งในการวัด ค่าความไม่แน่นอน จะเป็น ตัวบ่งชี้เชิงปริมาณ (quantitative measure) ของ คุณภาพการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของ วัสดุ ทำให้ผลการวัดนั้นสามารถเปรียบเทียบกับผล ของการ วัดวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง ว่ามีความหนาเชื่อถือเพียงใด

### การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A

การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A (type A standard uncertainty) เป็นผลจากการประเมินทางสถิติในรูปแบบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจากสภาวะของการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุภายใต้เงื่อนไขของการทำซ้ำ (repeatability) มีขั้นตอนดังนี้

- หาค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการวัดวัสดุแม่เหล็ก ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (53)$$

- เมื่อ  $\bar{x}$  คือค่าเฉลี่ยจากการวัดวัสดุแม่เหล็กทั้งหมด  
 $x_i$  คือค่าที่ได้จากการวัดวัสดุแม่เหล็กแต่ละครั้ง  
 $n$  คือจำนวนครั้งที่วัดวัสดุแม่เหล็ก

- หาค่าการกระจายของข้อมูลโดยประมาณจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation:  $\sigma$ )

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (54)$$

- หาค่าความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ย

$$S(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (55)$$

ค่า Standard Deviation ของค่าเฉลี่ยที่ประเมินได้นี้เรียกว่า Type A Standard Uncertainty

$$u_A = S(\bar{x}) \quad (56)$$

โดยที่ Type A Standard Uncertainty นี้เป็นข้อมูลที่ได้มาจากสภาวะของการวัดภายใต้เงื่อนไขของการทำซ้ำ (repeatability)

### การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B

การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B (type B standard uncertainty;  $u_b$ ) เป็นการประเมินค่าที่ได้มาจาก ค่าความไม่แน่นอนชนิด B ของวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง ที่ระบุอยู่ใน ประกาศนียบัตรรับรองการเทียบมาตรฐาน (calibration of certificate) โดยมีวิธีดังนี้

$$u_b = \frac{u}{k} \quad (57)$$

เมื่อ  $u$  คือค่าความไม่แน่นอนชนิด B ของวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง  
 $k$  คือตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor)

### การประเมินค่าความไม่แน่นอนรวม

ค่าความไม่แน่นอนรวม (combine uncertainty;  $u_c$ ) คือค่าที่ได้จากการรวมค่าความไม่แน่นอนของชนิด A และค่าความไม่แน่นอนของชนิด B โดยการคำนวณผลรวมเป็นรากที่สองของผลรวมความไม่แน่นอนมาตรฐานขององค์ประกอบยกกำลังสอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (58)$$

### ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ได้มาจากการคำนวณค่าองศาความเป็นอิสระจากสมการ Welch-Satterthwaite

$$\gamma_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\gamma_i}} \quad (59)$$

ซึ่งค่าของ  $\gamma_{eff}$  ที่ได้จากการคำนวณ จะนำไปคิดเป็นค่าตัวประกอบจากตาราง T-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องรายงาน 95 เปอร์เซ็นต์

### ค่าความไม่แน่นอนขยาย

ช่วงของความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เรียกว่า ความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty) และมีสัญลักษณ์ว่า  $U$  ความไม่แน่นอนขยาย  $U$  ได้มาจากการคูณความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ด้วยตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor)  $k$

$$U = ku_c(y) \quad (60)$$

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุแม่เหล็กอ้างอิงสำหรับเทียบมาตรฐานเครื่อง VSM

วัสดุแม่เหล็กอ้างอิงนิกเกิลทรงกลมของบริษัท LakeShore รุ่น 730908 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ความหนาแน่น  $8.907 \text{ g/cm}^3$  มีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก  $6.92 \text{ emu}$  ที่สนามแม่เหล็กภายนอก  $5 \text{ kOe}$  โดยค่าความไม่แน่นอนของโมเมนต์แม่เหล็ก  $\pm 1.5\%$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 24 วัสดุแม่เหล็กอ้างอิง (ก) รหัสรุ่นวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง (ข)

#### 2. วัสดุแม่เหล็กตัวอย่างสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้น

2.1 แผ่นเทปแม่เหล็ก ขนาด  $3 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$

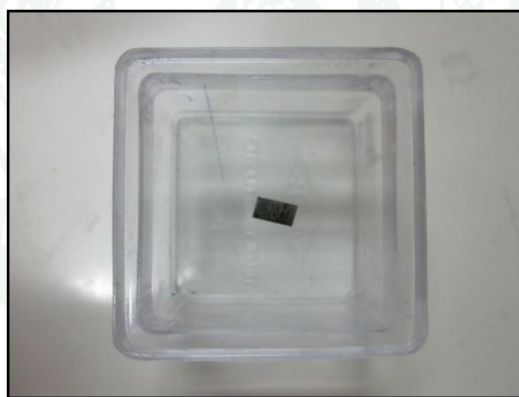


(ก)

(ข)

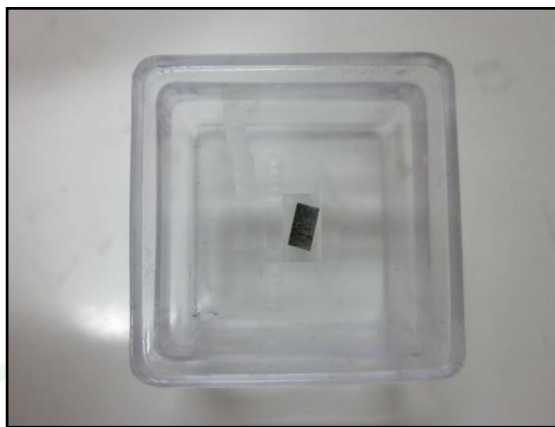
ภาพที่ 25 แผ่นเทปแม่เหล็กที่ใช้บันทึกข้อมูลในฟลอปปีดิสก์ (floppy disk) (ก) แผ่นเทปแม่เหล็ก ขนาด  $3 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$  (ข)

2.2 แถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  (Metglas™ 2826MB) ขนาด  $1 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$



ภาพที่ 26 แถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ขนาด  $1 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$

2.3 แถบแม่เหล็กอ่อน ขนาด  $1 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$



ภาพที่ 27 แอบแม่เหล็กอ่อนขนาด  $1 \times 3 \times 0.05 \text{ mm}^3$

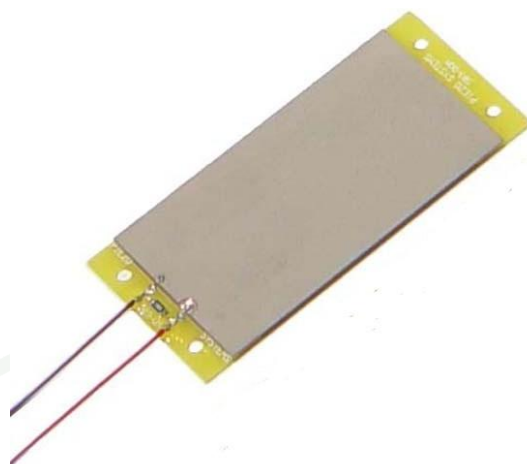
### 3. อุปกรณ์สำหรับสร้างหัววัด R-VSM

3.1 ขดลวดตรวจวัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3.0 mm เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 14 mm ความหนาขดลวด 2 mm ความหนาเส้นลวด 0.055 mm ค่าความเหนี่ยวนำ 28 mH



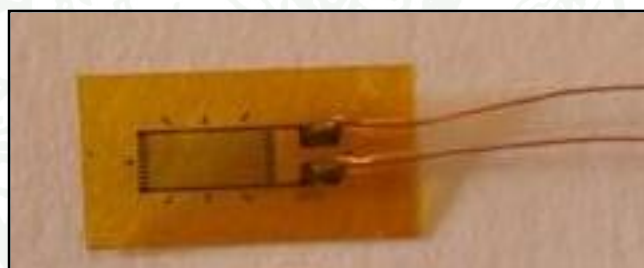
ภาพที่ 28 ขดลวดตรวจวัด

3.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดความหนา 0.51 mm ความกว้าง 31.8 mm และความยาว 63.5 mm



ภาพที่ 29 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกของบริษัท piezo systems inc. รุ่น D220-A4-503YB

3.3 สเตรนเกจขนาดความยาว 9.4 mm ความกว้าง 4.2 mm เกจแฟคเตอร์  $2.16 \pm 1.0 \%$  ค่าความต้านทาน  $349.4 \pm 0.6 \Omega$



ภาพที่ 30 สเตรนเกจ (KFG-5-350-C1-16)

#### 4. อุปกรณ์เครื่องมือวัดและกำเนิดสัญญาณ

4.1 เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และหัววัดสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 31 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กของบริษัท LakeShore รุ่น 455 (ก) หัววัดสนามแม่เหล็กแบบ  
ปรากฏการณ์ฮอลล์ของบริษัท LakeShore รุ่น HMMT-6J04-VF (ข)

#### 4.2 เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อิน



ภาพที่ 32 เครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินของบริษัท Stanford Research Systems  
รุ่น SR850

#### 4.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์



ภาพที่ 33 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของบริษัท Agilent รุ่น HP34401A

#### 4.5 เครื่องขยายกำลัง



ภาพที่ 34 เครื่องขยายกำลัง (mosfet 50W J162 K1058 )

#### 4.6 เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์



ภาพที่ 35 เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของบริษัท Hewlett-Packard รุ่น HP 33120A

#### 4.7 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



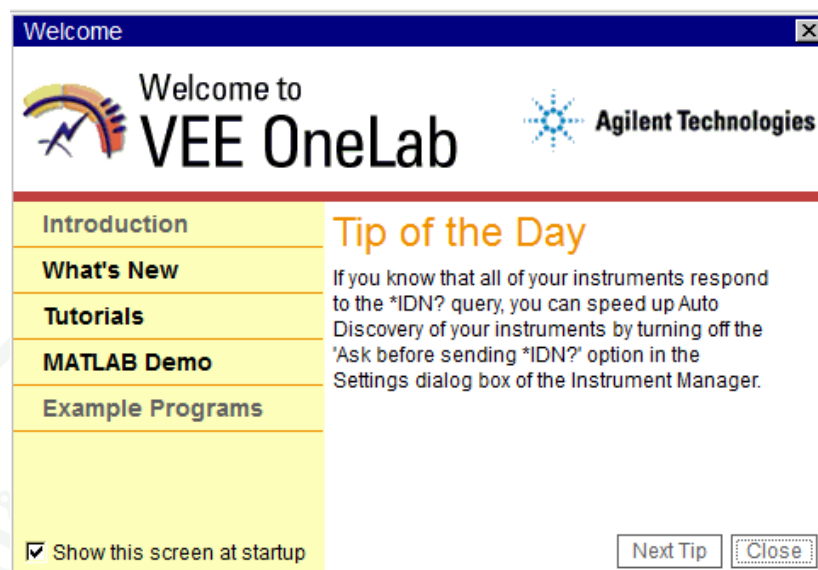
ภาพที่ 36 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของบริษัท Walker Scientific Inc. รุ่น HV-4H

#### 4.8 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง (VSM)



ภาพที่ 37 แมกนีโตมิเตอร์แบบสั้นตัวอย่าง (VSM)

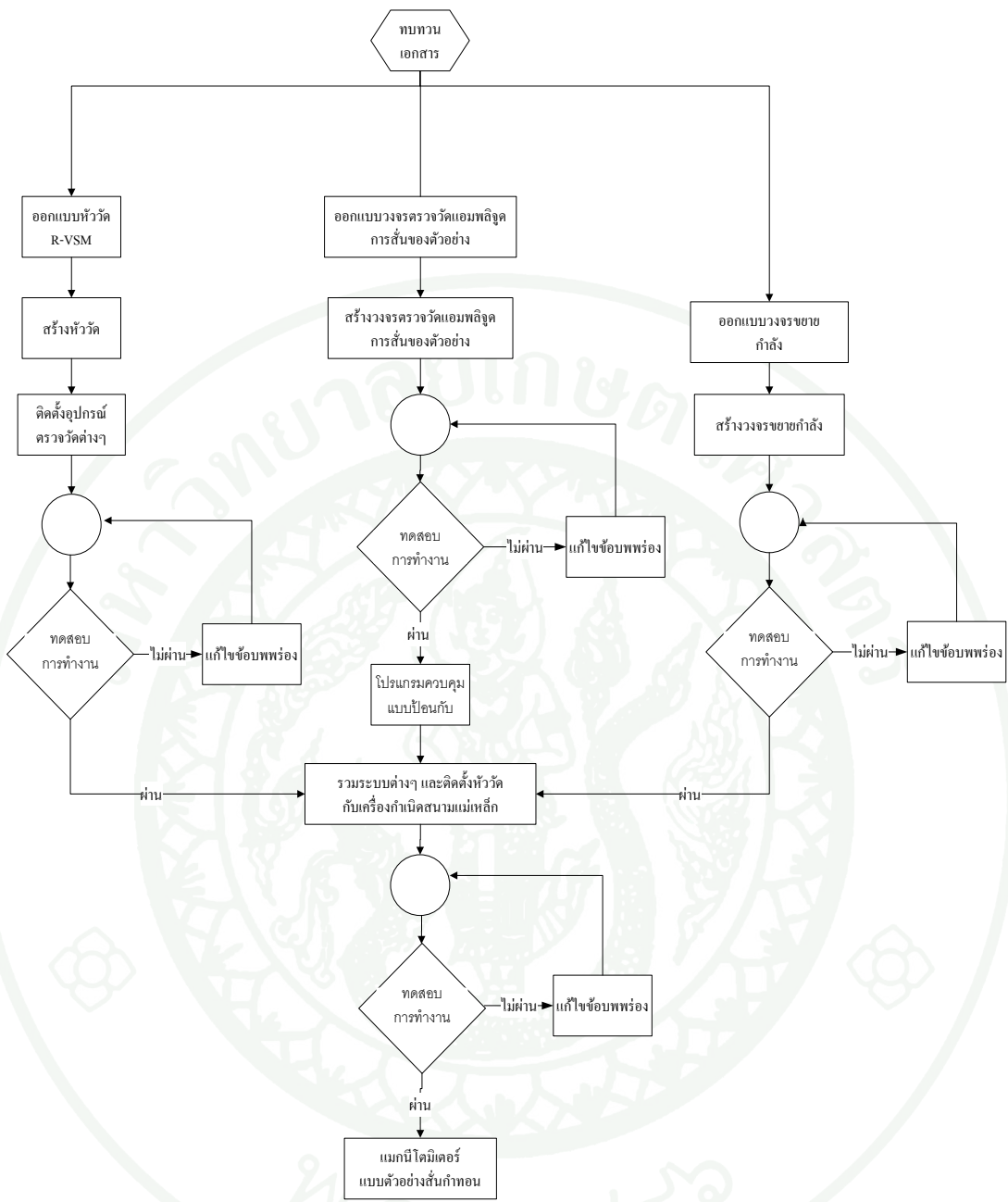
## 5. โปรแกรม VEE OneLab



ภาพที่ 38 โปรแกรม VEE OneLab รุ่น 6.0

### วิธีการ

ในการออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำหนดมีขั้นตอนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่ การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แต่ละส่วน การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วน และการนำอุปกรณ์แต่ละมาประกอบเป็นเครื่อง R-VSM และทดสอบการทำงานทั้งหมดโดยสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานต่างๆ ได้ดังภาพที่ 39

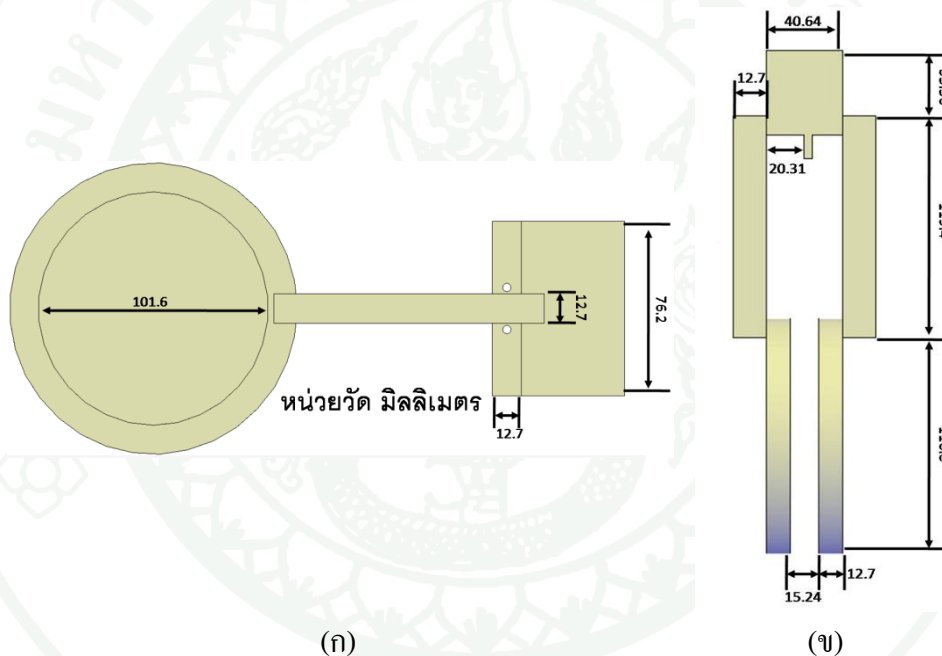


ภาพที่ 39 ขั้นตอนวิธีการออกแบบและสร้างเครื่อง R-VSM

## 1. การออกแบบและสร้าง

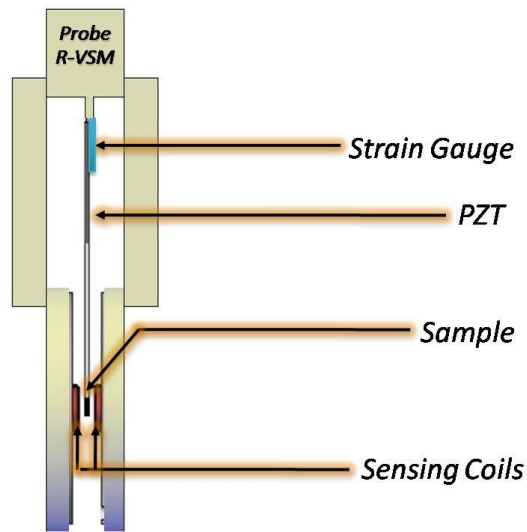
### 1.1 หัววัด R-VSM

หัววัด R-VSM จะต้องสามารถติดตั้งและเปลี่ยนวัสดุตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กได้ง่าย และสามารถติดตั้งเพื่อใช้งาน ร่วมกับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า ของ Walker Scientific Inc. รุ่น HV-4H ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรม auto cad ในการออกแบบโครงสร้างหัววัด ซึ่งได้หัววัดที่มีลักษณะดังภาพที่ 40



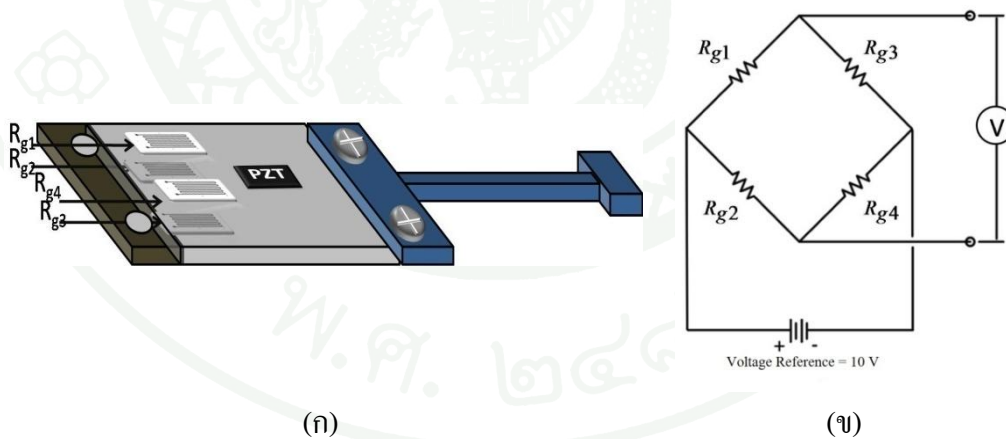
ภาพที่ 40 โครงสร้างหัววัด R-VSM จากมุมมองด้านข้าง (ก) และจากมุมมองด้านบน (ข)

วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปหัววัด ในครั้งนี้คือ ปอม (polyoxymethylene; pom) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย จากนั้นจึง ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งทำหน้าที่ส่งวัสดุที่ต้องการตรวจวัด และชดเชยสำหรับตรวจวัด โมเมนต์แม่เหล็กเข้ากับหัววัดในตำแหน่งต่างๆ ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับหัววัด R-VSM

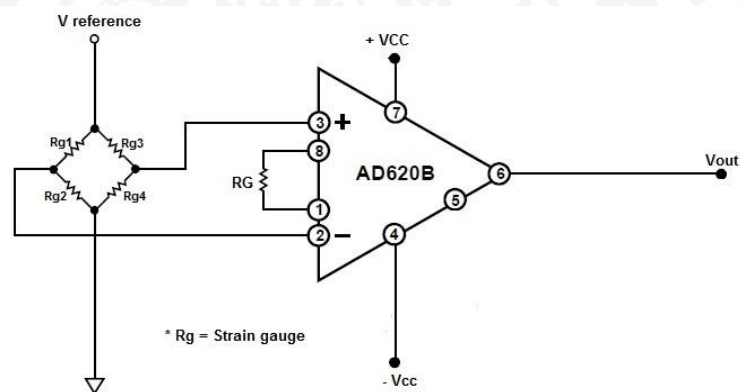
ตัวรับรู้อุปกรณ์จำนวน 4 ตัวถูกติดตั้งลงบน แผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อ ตรวจวัดแอมพลิจูดการ สั่นของแผ่นและวัสดุแม่เหล็ก โดยตัวรับรู้อุปกรณ์ทั้งสองจะต่อกัน ในรูปแบบวงจร วิทสโตน บริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การติดตั้งตัวรับรู้อุปกรณ์กับแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (ก) และการต่อวงจรในรูปแบบวิทสโตนบริดจ์ (ข)

## 1.2 ระบบตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง

การควบคุมแอมพลิจูดในการสั่นของวัสดุแม่เหล็กส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องในการตรวจวัด โดยผลการวัดจะมีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อวัสดุตัวอย่างถูกทำให้สั่นด้วยแอมพลิจูดคงตัวตลอดช่วงเวลาที่วัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยในระบบเครื่องวัดที่ได้ออกแบบในครั้งนี้ออมพลิจูดในการสั่นของวัสดุแม่เหล็กที่ต้องการตรวจสอบสามารถทราบได้จากความต่างศักย์เอาต์พุตของวงจรวิหสโตนบริดจ์ในภาคที่ 42 (ข) เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรบริดจ์มีค่าค่อนข้างต่ำ กล่าวคืออยู่ในระดับ  $\mu\text{V}$  จึงตรวจวัดได้ยาก ใน วิทยาลัยนพนธ์ฉบับนี้จะใช้ ไอซี AD620B เป็นไอซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรบริดจ์ ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน (instrumentation amplifier)

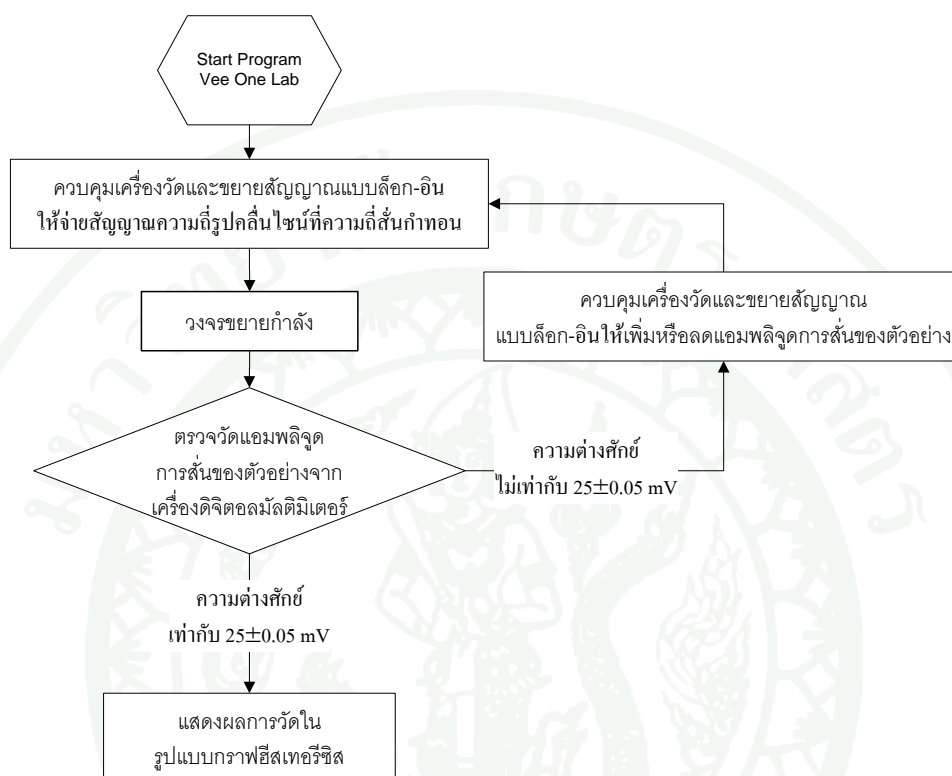
อัตราในการขยายสัญญาณ ( $G$ ) ของวงจรถูกกำหนดโดยค่าความต้านทาน  $R_G$  โดยในการศึกษาครั้งนี้ถูกกำหนดไว้ที่ 100 เท่า ซึ่งสามารถนำไปคำนวณสภาพความต้านทาน ได้ดังสมการ

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G-1} \quad (61)$$

สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณถูกตรวจวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์และ

ประมวลผลด้วยโปรแกรม VEE OneLab เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต่างศักย์ที่เครื่องวัดและขยาย

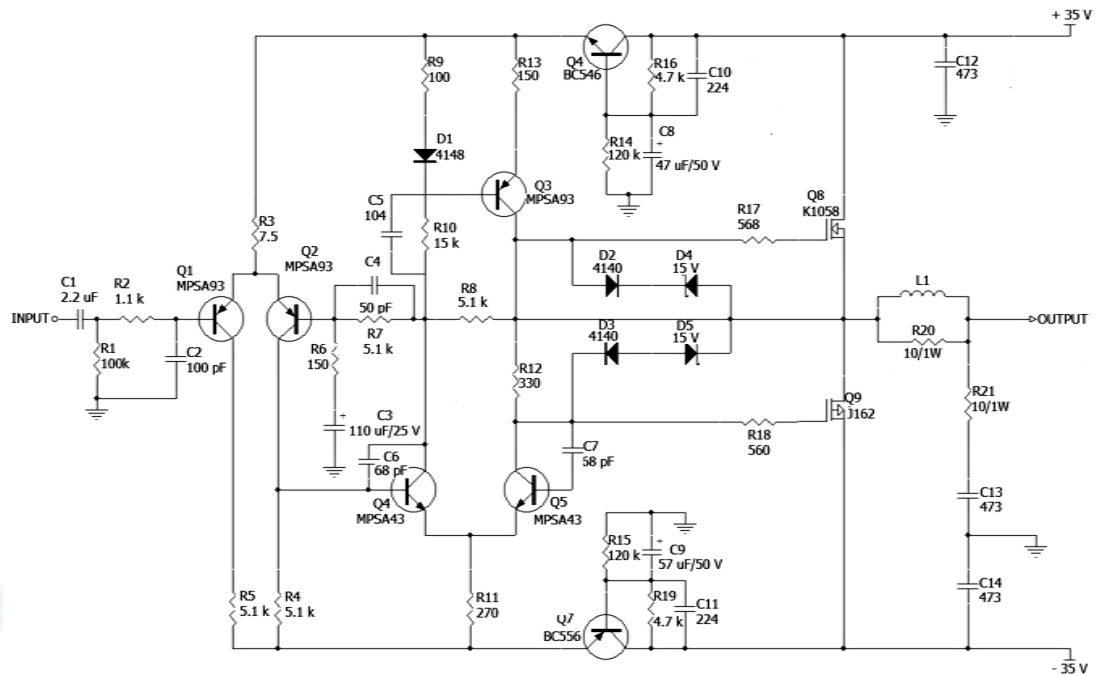
สัญญาณแบบลือก-อิน ต้องจ่ายให้กับวงจรขยายกำลังเพื่อควบคุมการสั่นของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม VEE OneLab ที่ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบลือก-อิน

### 1.3 วงจรขยายกำลัง

เนื่องสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มาจากเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบลือก-อินมีกระแสที่ต่ำจึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายกำลังในการขยายกระแสของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โดยในการศึกษานี้จะออกแบบวงจรขยายกำลัง 50 W จากมอสเฟตเบอร์ J162 และ K1058 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบลือก-อินก่อนที่จะจ่ายให้กับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อควบคุมแอมพลิจูด ในการสั่น วัสดุที่ต้องการตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็ก โดยวงจรสมมูลของวงจรขยายกำลังแสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 วงจรขยายกำลัง 50 W จากมอสเฟตเบอร์ J162 และ K1058

## 2. การทดสอบการทำงาน

### 2.1 หัววัด R-VSM

หัววัด R-VSM ที่ติดตั้งส่วนประกอบต่างๆ เสร็จแล้วถูกนำไปติดตั้งที่ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นจึงจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่คงที่ และความถี่ต่างๆ กันเพื่อหาความถี่ที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด (ความถี่การสั่นกำทอน)

### 2.2 ระบบตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง

เชื่อมต่อเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินที่ควบคุมและประมวลผลด้วยโปรแกรม VEE OneLab เข้ากับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกของหัววัด R-VSM และจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ (ที่ความถี่การสั่นกำทอน) และแอมพลิจูดคงที่ วัดค่าความต่างศักย์จาก วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนต์ที่เชื่อมต่อกับ วงจรวิสโตแกรมบริจค์ของตัวรับรูสเตรนเกจที่ติดตั้งลง

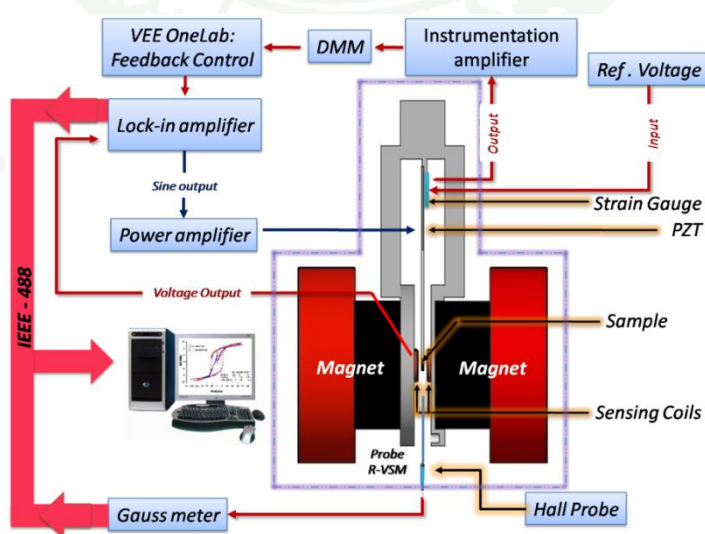
บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก จำนวน 30 ครั้งและคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของระบบ เพื่อตรวจสอบแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่างให้มีการสั่นที่คงตัว

### 2.3 วงจรขยายกำลัง (power amplifier)

วงจรขยายกำลังที่ผ่านการออกแบบและสร้างนำมาเชื่อมต่อกับ เครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่คงที่ เปลี่ยนค่าแอมพลิจูด ในการวัดตั้งแต่ 100 ถึง 600 mVrms และวัดค่าความต่างศักย์ของวงจรขยายกำลัง เพื่อนำมาสร้างกราฟและทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจร

### 3. รวบรวมระบบต่างๆ และติดตั้งหัววัดกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง R-VSM ซึ่งประกอบด้วย หัววัด R-VSM ระบบตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง และ วงจรขยาย กำลัง ที่ผ่านการทดสอบแล้วถูกนำมาประกอบกัน และเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมและรับค่าที่ได้จากการวัด เพื่อนำไปประมวลผล และแสดงผลการวัดในรูปแบบวงฮิสเทอรีซิสด้วยคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 รวบรวมระบบต่างๆ และติดตั้งหัววัดกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 ทดสอบประสิทธิภาพของ เครื่อง R-VSM โดยนำค่าของวัสดุแม่เหล็กที่ทราบค่าโมเมนต์แม่เหล็กที่แน่นอนจากการวัดด้วยเครื่อง VSM มาใช้กำหนดค่าคงตัวของระบบ เพื่อป้อนให้กับโปรแกรม VEE OneLab และคำนวณค่าโมเมนต์แม่เหล็ก ของเครื่อง R-VSM เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับผลที่วัดได้จากเครื่อง VSM ที่ผ่านการเทียบมาตรฐานโดยวัสดุแม่เหล็ก อ้างอิง ด้วยการทดสอบการวัดวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กสามชนิด และหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องทั้ง 2 ชนิด



## ผลและวิจารณ์

### 1. การออกแบบและสร้าง

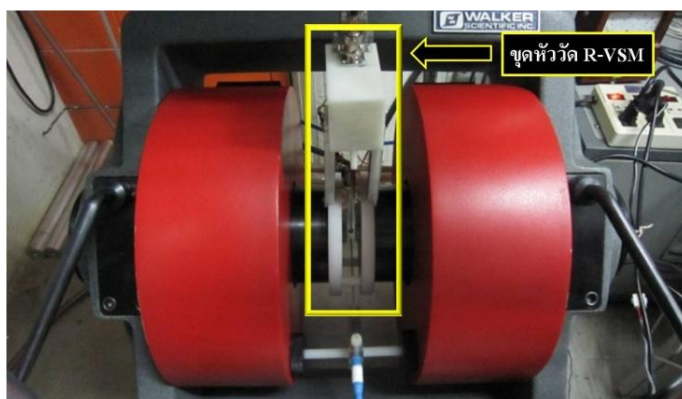
#### 1.1 หัววัด R-VSM

จากภาพที่ 40 เมื่อนำโครงสร้างหัววัด R-VSM ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม auto cad และใช้วัสดุพอมในการขึ้นรูป เมื่อนำมาประกอบกับ แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ที่เชื่อมติดกับตัวรับรู้เสตรนเกจ ได้หัววัด R-VSM ที่มีลักษณะดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 หัววัด R-VSM

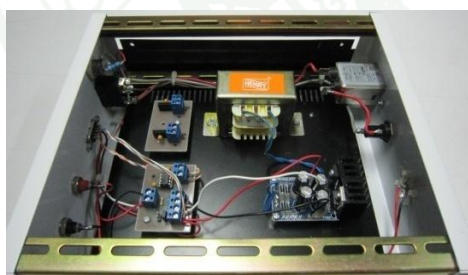
เมื่อนำหัววัด R-VSM ที่ติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดต่างๆ แล้ว ไปประกอบกับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าดังภาพที่ 47 พบว่าหัววัด R-VSM ที่สร้างขึ้นสามารถประกอบเข้ากับ ขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า Walker Scientific Inc. รุ่น HV-4H ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้และสามารถติดตั้งและเปลี่ยนวัสดุตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดสมบัติแม่เหล็กได้



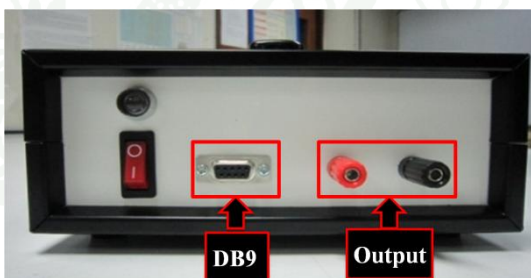
ภาพที่ 48 ชุดหัววัด R-VSM ที่ประกอบกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 1.2 ระบบตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง

วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน ที่ได้จากการออกแบบ และสร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 48 โดยประกอบด้วยขั้วต่อแบบ DB9 สำหรับต่อกับขั้วของสเตรนเกจในรูปแบบ วงจรวิทสโตนบริดจ์และขั้วสัญญาณเอาต์พุตสำหรับต่อเข้ากับดิจิตอลมัลติมิเตอร์เพื่อวัดความต่างศักย์ของวงจรบริดจ์เพื่อนำไปควบคุมแอมพลิจูดในการสั่นตัวอย่างด้วยโปรแกรม VEE OneLab ในลำดับต่อไป



(ก)



(ข)

ภาพที่ 49 วงจรขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน (ก) และเครื่องขยายสัญญาณแบบอินสตรูเมนเตชัน (ข)

### 1.3 วงจรขยายกำลัง

จากการนำวงจรขยายกำลัง 50 W โดยใช้มอสเฟตเบอร์ J162 และ K1058 จากภาพที่ 45 มาสร้างเป็นเครื่องขยายกำลัง ทำให้ได้เครื่องขยายกำลังไฟฟ้าขนาด 50 W ดังภาพที่ 50



(ก)



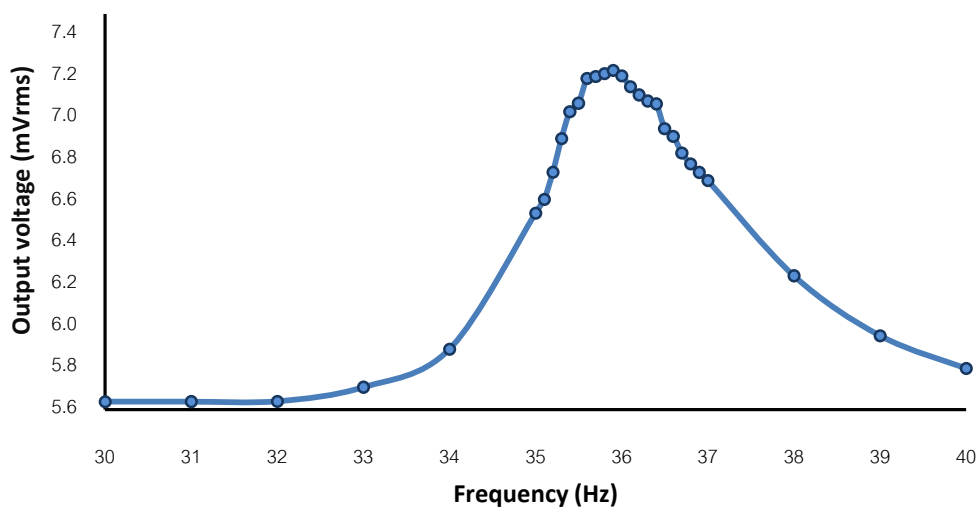
(ข)

ภาพที่ 50 วงจรขยายกำลัง (ก) และเครื่องขยายกำลัง (ข)

## 2. การทดสอบการทำงาน

### 2.1 หัววัด R-VSM

จากการวัด การสั้นของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการสั้นวัสดุตัวอย่างของเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นโดยการวัดความต่างศักย์เอาท์พุทของวงจรวิสโตนิบรีดจ์ เมื่อจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ แอมพลิจูดคงที่ 5.5 Vrms ความถี่ 30 – 40 Hz ผลที่ได้แสดงดังกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ทางไฟฟ้ากับความถี่ 30 – 40 Hz

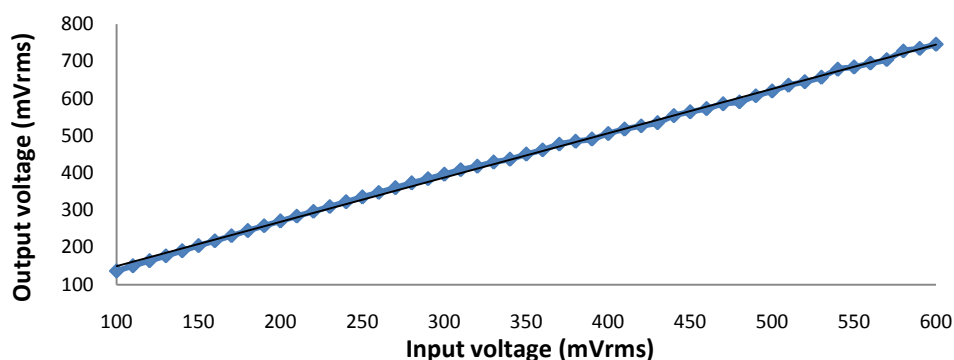
จากกราฟที่ได้ พบว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะ สั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด (ความถี่กำทอน) ที่ความถี่ประมาณ 35.9 Hz โดยความถี่นี้จะถูกกำหนดให้กับเครื่องวัดและขยายสัญญาณ แบบล็อกอิน เพื่อจ่ายสัญญาณควบคุมการสั่นตัวอย่างของเครื่อง R-VSM ในการศึกษาครั้งนี้

## 2.2 ผลการทดสอบระบบตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง

เมื่อเชื่อมต่อ วงจร ขยายสัญญาณแบบ อินสตรูเมนเตชัน ที่ขั้ว DB9 และขั้วสัญญาณเอาต์พุต กับวงจรบริดจ์และดิจิตอลมัลติมิเตอร์แล้ว ผลการวัดค่าความต่างศักย์ของวงจรบริดจ์จำนวน 30 ครั้ง พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 27.9  $\mu\text{V}$  จากแอมพลิจูดที่ผ่านวงจรขยาย 25 mV ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดที่ต่ำ เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของวงจร ซึ่งผลจากการทวนซ้ำของวงจรที่ดีนั้น จะส่งผลให้การทำงานของโปรแกรม VEE OneLab ที่ควบคุมแอมพลิจูดในการสั่นตัวอย่างที่ออกแบบในลำดับต่อไป สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 2.3 ผลทดสอบวงจรขยายกำลัง

วงจรขยายกำลัง 50 W โดยใช้ออสเฟทเบอร์ J162 และ K1058 เมื่อเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ที่ความถี่คงที่ 35.9 Hz แอมพลิจูด 100-600 mVrms ผลที่ได้แสดงดังกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 กราฟแสดงความเป็นเส้นของวงจรขยายกำลัง

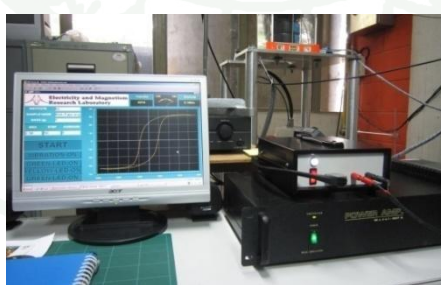
จากกราฟที่ได้พบว่าวงจรขยายกำลัง มีค่าความเป็นเชิงเส้นที่ดี ซึ่งส่งผลให้การควบคุมการทำงานของเครื่องวัดและขยายสัญญาณแบบล็อก-อินด้วยโปรแกรม VEE OneLab ในการเพิ่มหรือลดแอมพลิจูดการสั่นตัวอย่าง สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถเพิ่มหรือลดแอมพลิจูดได้อย่างเป็นเชิงเส้น

### 3. รวบรวมระบบต่างๆ และติดตั้งหัววัดกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

3.1 เมื่อนำ วงจรตรวจวัดแอมพลิจูดการสั่นของตัวอย่าง วงจรขยาย กำลัง และ หัววัด R-VSM ที่ผ่านทดสอบ มาติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 53



(ก)



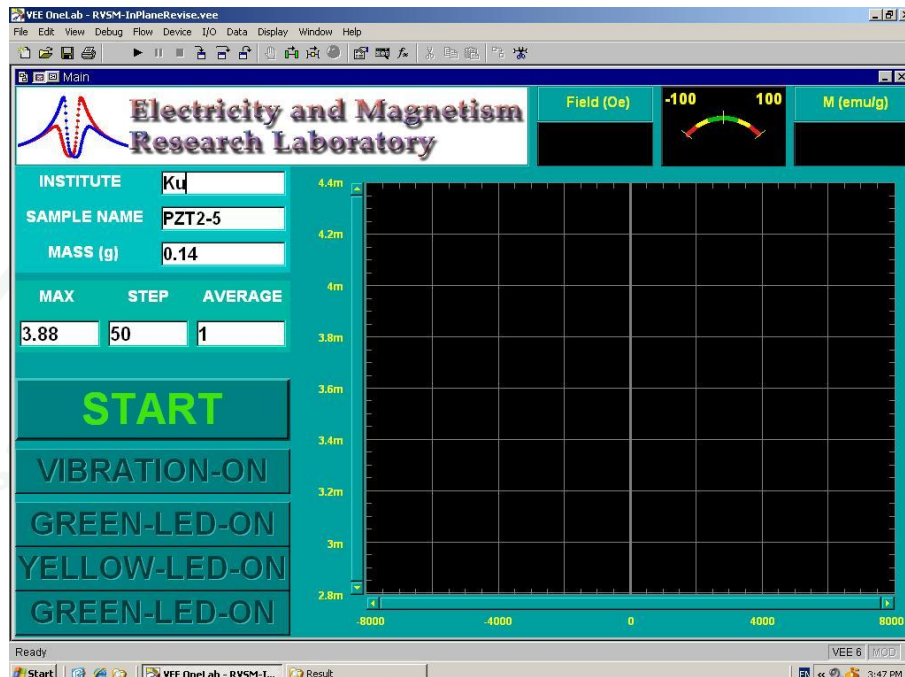
(ข)



(ค)

ภาพที่ 53 ระบบเครื่อง R-VSM (ก) ที่แสดงผลในรูปแบบการวัดแบบวงฮิสเทอรีซิส (ข) การติดตั้งหัววัดกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก (ค)

ซึ่งในการศึกษาจะนำโปรแกรม VEE OneLab ที่ออกแบบและสร้างดังภาพที่ 54 มาใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อวัดปริมาณที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปประมวลผลและแสดงผลในรูปของวงรีทเทอริซิสต์ด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 54 โปรแกรม VEE OneLab ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือวัด ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

จากภาพที่ 54 ในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแต่ละครั้งจะต้องกำหนดตัวแปรต่างๆ ให้กับโปรแกรมดังต่อไปนี้

- INSTITUTE ใช้กำหนดชื่อหน่วยงานที่ใช้เครื่อง R-VSM
- SAMPLE NAME ใช้กำหนดชื่อวัสดุแม่เหล็กที่ต้องการตรวจวัด
- MASS มวลของวัสดุแม่เหล็กที่ต้องการตรวจวัด
- MAX ใช้กำหนดช่วงของสนามแม่เหล็กภายนอกสูงสุดที่ให้แก่วสดุแม่เหล็ก
- STEP ใช้กำหนดความละเอียดหรือช่วงของสนามแม่เหล็กในการตรวจวัด
- AVERAGE ใช้กำหนดจำนวนครั้งที่ต้องการตรวจวัดในแต่ละจุด

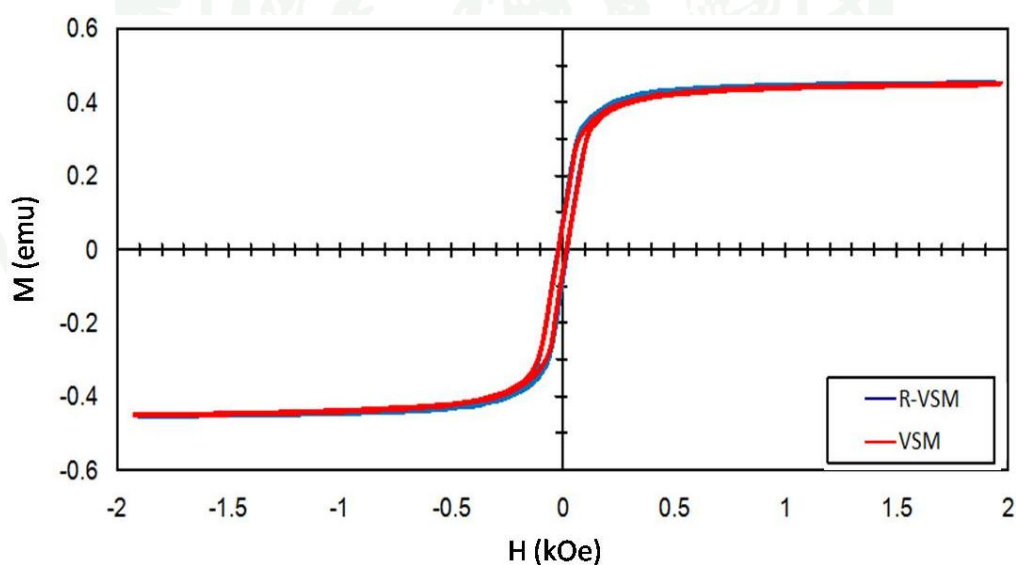
### 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง R-VSM

#### 3.2.1 ค่าคงตัวของระบบ R-VSM

ผลการหาค่าคงตัวของระบบ โดยการวัดโมเมนต์แม่เหล็กของแถบแม่เหล็กอ่อนเทียบกับเครื่อง VSM พบว่าเครื่อง R-VSM มีค่าคงตัวของระบบ  $0.1249 \text{ V emu}^{-1}$  โดยค่าคงตัวของระบบที่ได้จะนำไปกำหนดให้ กับโปรแกรม VEE OneLab เพื่อใช้คำนวณค่าโมเมนต์แม่เหล็กของเครื่อง R-VSM และใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพขั้นต่อไป

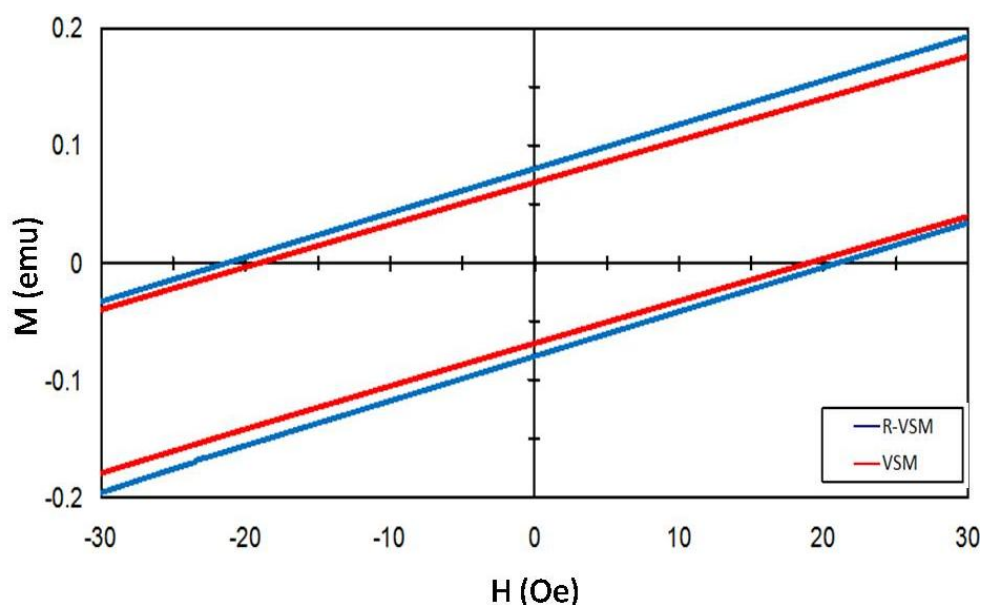
#### 3.2.2 การเปรียบเทียบผลการวัดแถบแม่เหล็กอ่อนจากเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM

ภาพที่ 55 แสดงวงฮิสเทอรีซิส ของการวัดแถบแม่เหล็กอ่อน ที่ได้จากเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นมีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับผลของการวัดด้วยเครื่อง VSM



ภาพที่ 55 วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อนในการวัด 5 ครั้งของเครื่อง VSM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง R-VSM

เมื่อพิจารณาจากจุดที่บ่งบอกสมบัติทางแม่เหล็ก จะพบว่าผลการวัดที่ได้จากเครื่อง R-VSM มีค่าแตกต่างจากผลที่ได้จากเครื่อง VSM ดังแสดงในภาพที่ 56 โดย ค่า  $H_c$  และ  $M_r$  ที่วัดได้จากเครื่อง R-VSM จะมีค่าที่สูงกว่าเครื่อง VSM



ภาพที่ 56 วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ที่จุดกึ่งกลางของเครื่อง VSM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง R-VSM

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้ง มีผลการวัดที่ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่า  $M_r$  ค่า  $H_c$  และค่า  $m$  ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของของวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน

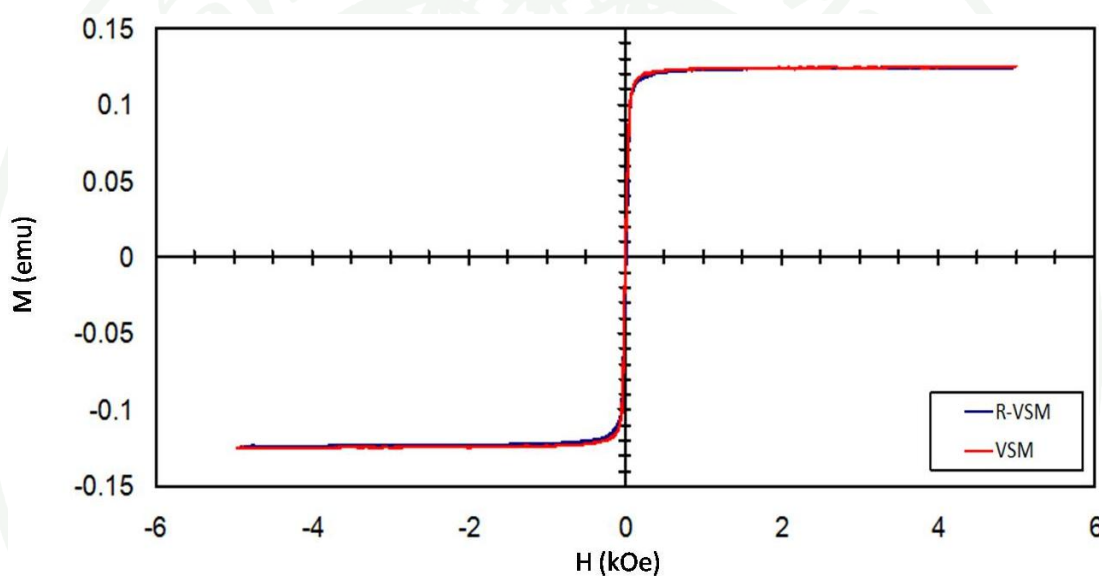
เครื่องวัด	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu)	$m_{5kOe}$ (emu)
VSM	19.0	0.0687	$0.450 \pm 9.60 \times 10^{-4}$
R-VSM	21.1	0.0803	$0.452 \pm 1.16 \times 10^{-3}$

ผลการทดสอบประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ยการวัด 5 ครั้ง ในการวัดวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน จะพบว่าผลของการวัดด้วยเครื่อง R-VSM มีค่าที่มากกว่าผลที่ได้จากเครื่อง VSM และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องที่ดีกว่า (พิจารณาจากตาราง องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำซ้ำของเครื่องที่ดี และเสถียรภาพของเครื่องมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการออกแบบของเครื่อง R-VSM มีการออกแบบให้ลักษณะการวางขดลวดตรวจวัดอยู่ในแนวแกนระหว่างขดลวดตรวจวัด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความไวสูงสุด จึงทำให้เครื่อง R-VSM มีความไวที่ดีกว่า เมื่อทำการวัดวัสดุแม่เหล็กตัวอย่าง ที่มีโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ จึงตรวจวัดโมเมนต์แม่เหล็กได้มากกว่า ทั้งนี้ค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ที่มีค่ามากกว่าเครื่อง R-VSM เนื่องมาจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง R-VSM จะทำการเทียบมาตรฐานกับเครื่อง VSM

จึงทำให้ต้องถ่ายค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ที่ได้เทียบมาตรฐานกับวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง มาให้กับเครื่อง R-VSM จึงทำให้ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องเพิ่มขึ้นตาม

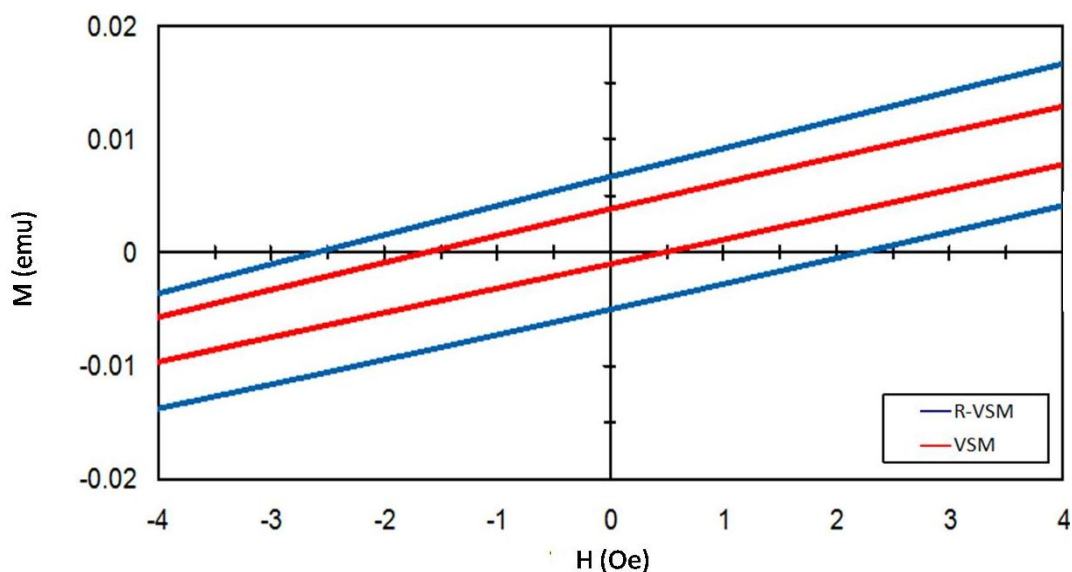
### 3.2.3 การเปรียบเทียบผลการวัดแถบวัสดุ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ จากเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM

ภาพที่ 57 แสดงวงฮิสเทอรีซิส ของการวัดวัสดุแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ที่ได้จากเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นมีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับผลของการวัดด้วยเครื่อง VSM และใกล้เคียงมากกว่าวัสดุชนิดแรก



ภาพที่ 57 วงฮิสเทอรีซิสของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  จากเครื่อง VSM กับเครื่อง R-VSM

เมื่อพิจารณาจากจุดที่บ่งบอกสมบัติทางแม่เหล็ก จะพบว่าผลการวัดที่ได้จากเครื่อง R-VSM มีค่าแตกต่างจากผลที่ได้จากเครื่อง VSM ดังแสดงในภาพที่ 57 โดย ค่า  $H_c$  และ  $M_r$  ที่วัดได้จากเครื่อง R-VSM จะมีค่าที่สูงกว่าเครื่อง VSM และมากกว่าในการวัดวัสดุชนิดแรกมาก



ภาพที่ 58 วงฮิสเทอรีซิสของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ที่จุดกึ่งกลางของเครื่อง VSM กับเครื่อง R-VSM

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้ง มีผลการวัดที่ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่า  $M_r$  ค่า  $H_c$  และ  $m$  ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$

เครื่องวัด	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu)	$m_{5\text{kOe}}$ (emu)
VSM	1.05	0.00249	$0.125 \pm 1.98 \times 10^{-3}$
R-VSM	2.45	0.00598	$0.125 \pm 4.36 \times 10^{-3}$

ผลทดสอบประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยในการวัด 5 ครั้ง ของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  พบว่าค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง R-VSM จะมีค่าที่มากกว่าผลที่ได้จากเครื่อง VSM และมีค่าที่แตกต่างกันมากกว่าการวัด วัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ แถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  มีความเป็นแม่เหล็กอ่อน (soft ferromagnetic) มากกว่าวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ส่งผลให้มี  $H_c$  และ  $M_r$  ที่ต่ำกว่าวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน เมื่อประสิทธิภาพเครื่อง R-VSM มีความไวที่ดีกว่าเครื่อง VSM จึงทำให้สามารถรับรู้ถึงความแตกต่างของวัสดุที่ดีกว่า และจากผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  พบว่ามีความแตกต่างของผลการวัดที่เข้าใกล้ศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความละเอียดของเครื่องวัดทั้ง 2 เครื่องที่ไม่สูงพอ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบถึงความแตกต่างของการวัดได้ และจากค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ที่แตกต่างจากเครื่อง VSM อยู่ในระดับต่ำ เป็น

ผลเนื่องมาจากเครื่อง R-VSM มีการ ทวนซ้ำ ของเครื่องที่ดี มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ (เปรียบเทียบกับตาราง องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องทั้งสองชนิด ) จึงมีผลกระทบต่อค่าความไม่แน่นอนที่น้อย ทำให้เมื่อถ่ายค่าความไม่แน่นอนจากเครื่อง VSM มาให้เครื่อง R-VSM ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นไม่มาก

### 3.2.4 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉลี่ย 30 ครั้งของแถบวัสดุ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$

ผลการวัด ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก เฉลี่ย 30 ครั้งของ แถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe จากผลของเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM แสดงดังตารางที่ 4

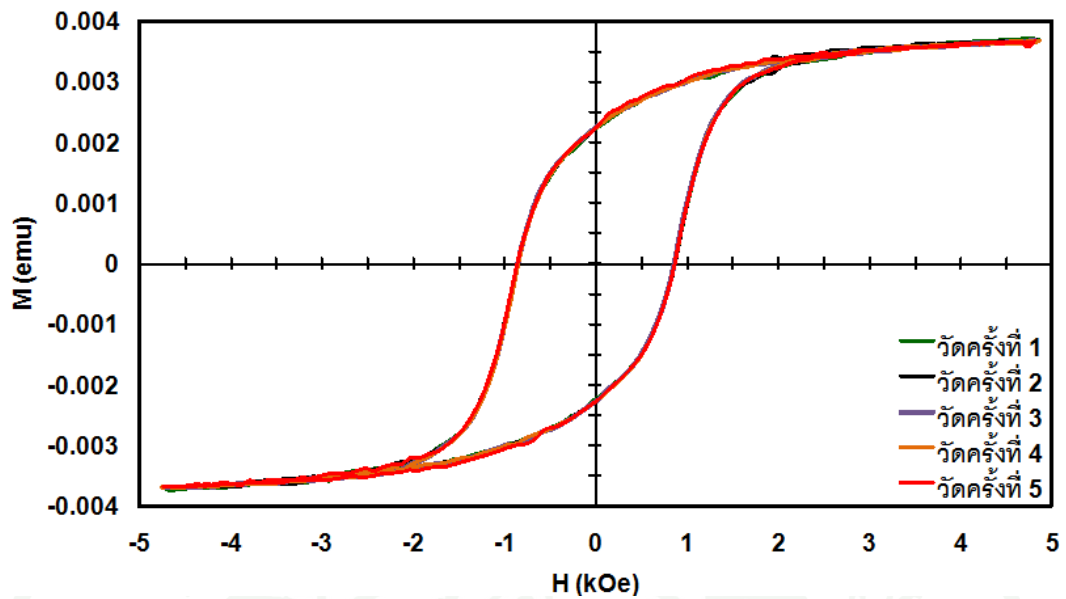
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการวัด โมเมนต์แม่เหล็ก 30 ครั้ง ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$

เครื่องวัด	ค่าเฉลี่ยจากวัดโมเมนต์แม่เหล็ก 30 ครั้ง (emu)
VSM	$0.125 \pm 9.41 \times 10^{-4}$
R-VSM	$0.125 \pm 1.09 \times 10^{-3}$

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการวัด โมเมนต์แม่เหล็ก ของแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ribbon ในการวัด 30 ครั้ง พบว่าเครื่อง R-VSM มีค่าความแตกต่างของผลการวัดที่เข้าใกล้ศูนย์ และมีค่าความไม่แน่นอนที่แตกต่างกันไม่มาก เนื่อง จากเครื่อง R-VSM มีการ ทวนซ้ำของเครื่องที่ดี เนื่องมาจากความไวของเครื่อง R-VSM ที่สูง จึงไม่จำเป็นต้องสั่นตัวอย่าง ด้วยแอมพลิจูดที่สูง ส่งผลให้เครื่องวัดมีเสถียรภาพที่ดี ทำให้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ เมื่อนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอน จึงมีผลต่อค่าความไม่แน่นอนที่ไม่มาก

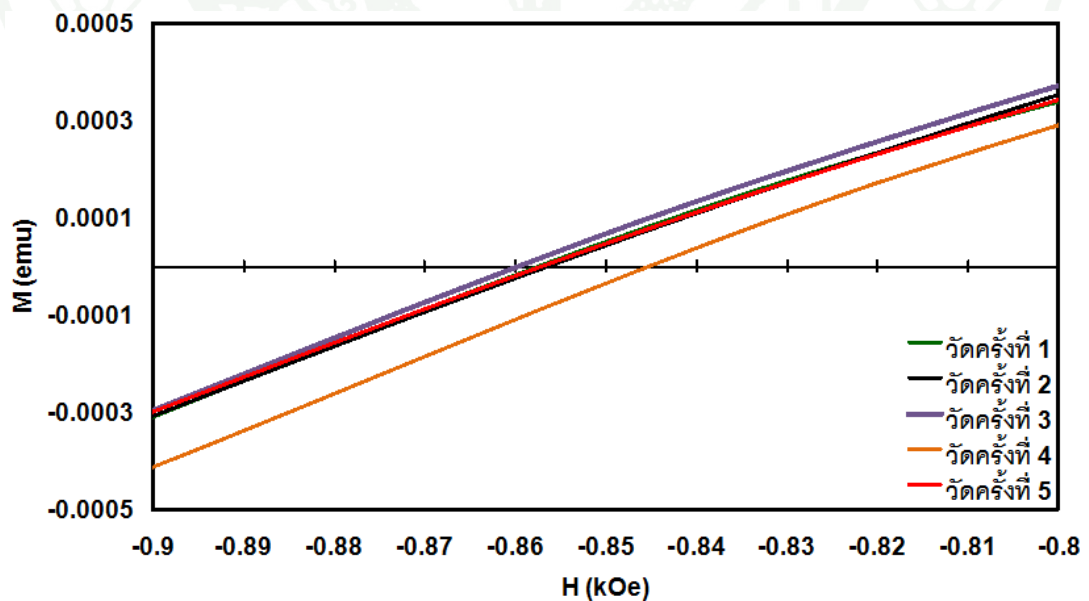
### 3.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพการทำซ้ำ (repeatability) ของเครื่อง R-VSM

ภาพที่ 59 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของแผ่นเทปแม่เหล็กบันทึกข้อมูลในฟลอปปีดิสก์ ที่วัดด้วยเครื่อง R-VSM จำนวน 5 ครั้ง พบว่าเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นมีผลการวัดในแต่ละครั้งที่ใกล้เคียงกันมาก



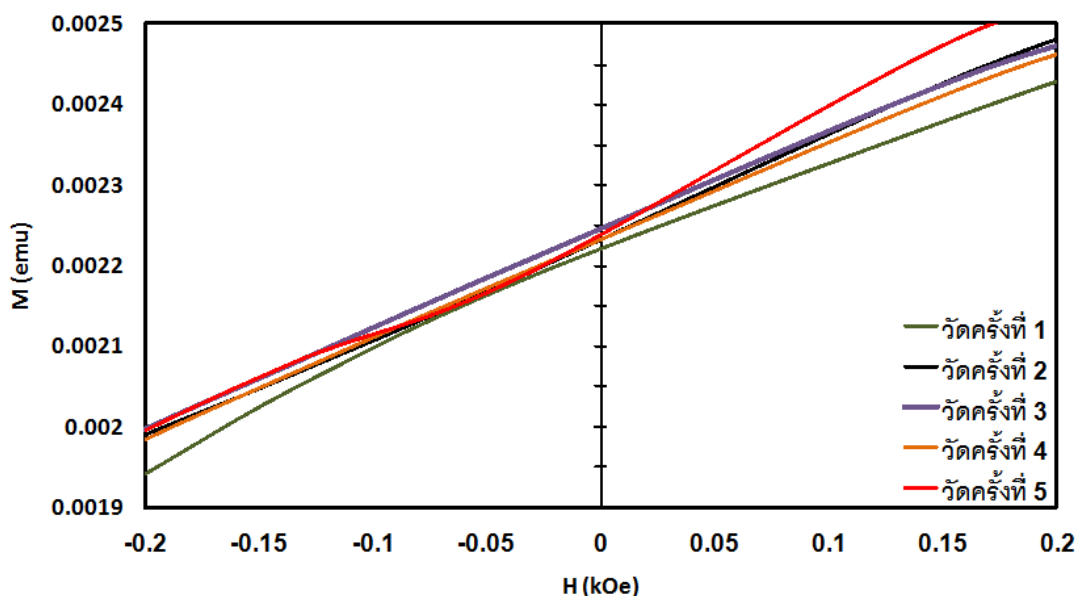
ภาพที่ 59 ผลการทดสอบการทวนซ้ำของเครื่อง R-VSM ในการวัดวัสดุแผ่นเทปแม่เหล็กบันทึก ข้อมูลในฟลอปปีดิสก์ จำนวน 5 ครั้ง

เมื่อพิจารณาที่จุด  $H_c$  จะพบว่าผลการวัดที่ได้จากเครื่อง R-VSM จำนวน 5 ครั้ง มีค่าที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในการวัดครั้งที่ 4 ที่มีผลการวัดต่ำกว่าในตำแหน่งอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 60 เนื่องมาจากความไม่ละเอียดของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 60 ผลการทดสอบการทวนซ้ำของเครื่อง R-VSM ในการวัดวัสดุแผ่นเทปแม่เหล็กบันทึก ข้อมูลในฟลอปปีดิสก์จำนวน 5 ครั้ง ที่จุด  $H_c$

เมื่อพิจารณาที่จุด  $M_r$  จะพบว่าผลการวัดที่ได้จากเครื่อง R-VSM จำนวน 5 ครั้ง มีค่าที่แตกต่างกัน น้อยกว่าในการวัดค่า  $H_c$  ดังแสดงในภาพที่ 61 เป็นผลเนื่องมาจากความไม่ละเอียดของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเช่นกัน



ภาพที่ 61 ผลการทดสอบการทวนซ้ำของเครื่อง R-VSM ในการวัดวัสดุแผ่นเทปแม่เหล็กบันทึก ข้อมูลในฟลอปปีดิสก์จำนวน 5 ครั้ง ที่จุด  $H_c$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าจากการวัด 5 ครั้ง มีผลการวัดที่ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่อง R-VSM ในการวัด 5 ครั้ง

ครั้งที่	$H_c$ (Oe)	$M_r$ (emu)	$M_{4.8 \text{ kOe}}$ (emu)
1	858.5092	0.00222	0.00373
2	858.8104	0.00210	0.00370
3	859.5791	0.00226	0.00370
4	854.1291	0.00221	0.00370
5	858.4847	0.00212	0.00368
SD	$\pm 2.1552$	$\pm 6.79 \times 10^{-5}$	$\pm 1.58 \times 10^{-5}$

ผลทดสอบประสิทธิภาพ เครื่อง R-VSM ด้วยการวัดวัสดุแผ่นเทพแม่เหล็ก จำนวน 5 ครั้ง พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการสั่นตัวของเครื่อง R-VSM ที่มีเสถียรภาพที่ดี แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีมากในการวัดที่จุด  $H_c$  และ  $M_r$  ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความไม่ละเอียดของการปรับค่าสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกระแสตรง ซึ่งโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแม่เหล็กกระแสตรงจะมีอุปกรณ์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ จึงเป็นผลให้ในการปรับค่าสนามแม่เหล็กที่เข้าใกล้ศูนย์จึงทำได้ยาก ทำให้ในการวัดที่จุดแมกนีไทเซชันคงค้าง และจุดสนามลบล้าง จึงมีค่าความแตกต่างของการวัดในแต่ละครั้ง



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำทอน (R-VSM) ที่สร้างขึ้นโดยใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ร่วมกับการตรวจวัดและควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมแอมพลิจูดในการสั้นตัวอย่างที่ความถี่ กำทอน 35.9 Hz สามารถตรวจวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ โดยแสดงผลในลักษณะของวง ฮิสเทอรีซิส ได้เป็นอย่างดี โดยมีผลการทวนซ้ำในการวัดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง VSM ทั้งนี้เกิดจากเสถียรภาพในการสั้นตัวอย่างที่ดีกว่า โดยจากการทดสอบวัดสมบัติทางแม่เหล็กของ วัสดุ 3 ชนิดได้แก่ วัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน แถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  และแผ่นเทปแม่เหล็กบันทึก ข้อมูลในฟลอปปีดิสก์ พบว่าวง ฮิสเทอรีซิส ของตัวอย่างสองชนิดแรกที่ได้จากเครื่อง R-VSM ที่ สร้างขึ้นสอดคล้องกับเครื่อง VSM โดยค่า  $H_c$  และ  $M_r$  ที่วัดได้จากเครื่อง R-VSM จะมีค่าที่สูงกว่า เครื่อง VSM ทั้งนี้เนื่องจากความไวของเครื่องที่สูงกว่า สำหรับ แผ่นเทปแม่เหล็กบันทึกข้อมูลใน ฟลอปปีดิสก์ นั้น ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง VSM เนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ ดังกล่าวมีค่าน้อยประกอบกับเสถียรภาพในการสั้นวัสดุตัวอย่างของเครื่อง VSM ไม่ดีเท่าที่ควร ในขณะที่เครื่อง R-VSM สามารถวัดและแสดงสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุดังกล่าวในลักษณะของ วงฮิสเทอรีซิสได้ นั้นแสดงให้เห็นว่าเครื่อง R-VSM ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการศึกษาสมบัติ แม่เหล็กของวัสดุที่มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กน้อยๆ ได้เป็นอย่างดี

### ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้นกำทอน พบว่าการเปลี่ยนวัสดุ ตัวอย่างแต่ละครั้ง ต้องมีการถอดหัววัด R-VSM ออกจากขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบกับการ ตรวจวัดแอมพลิจูดในการสั้นต้องมีการวนซ้ำของโปรแกรม ทำให้เสียเวลาในกระบวนการดังกล่าว จึงควรออกแบบหัววัดให้มีการติดตั้งวัสดุที่สะดวกขึ้น มีระบบการยึดติดอุปกรณ์ของหัววัดแต่ละ ชิ้นให้มีความแน่นอนมากขึ้น และควรออกแบบหรือหาวัสดุที่ใช้ทำหัววัดให้มีความแข็งแรงมากขึ้น กว่านี้ เพื่อลดข้อผิดพลาดในระบบสั้นวัสดุตัวอย่าง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เสฏฐวุฒิ ดวงจันทร์. 2546. การวัดสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเทคนิค VSM. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Arbeitskreis Prof. Dr. Beck J. 2009. **LabTour**. Available Source: <http://anorganik.chemie.uni-bonn.de/akbkhome/>, July 24, 2012.

Dodrigill B. C. **Low Moment Measurements with a Vibrating Sample Magnetometer**. Lake Shore Cryotronics, Inc., 575 McCorkle Blvd., Westerville, Ohio, USA.

Foner S. 1959. Versatile and Sensitive vibrating-sample magnetometer. **Rev Sci Instr.**30: 548.

Graham D. 2000. High-Sensitivity Magnetization Measurement. **J. Mater. Sci. Technol:** 2

Hoon S.R. 1983. An inexpensive, sensitive vibrating sample magnetometer. **Eur. J. Phys.** 4: 6147.

Koyama K., S. Miura, H. Okada and K. Watanabe. 2006. Development of an extraction type magnetometer under high pressure and high magnetic fields over 200 kOe in the hybrid magnet. **Journal of Physics: Conference Series 51:** 569–572

Lindemuth J. and J. Krause. 2000. Finite sample size effects on the calibration of vibrating Sample Magnetometer. **IEEE and Brad Dodrigill:** 1-2

Samwel E. 2008. An alternative approach to vector vibrating sample magnetometer detection coil setup. **Review of Scientific Instruments.** 69:9

Wronaa. J., T. Stobieckia, M. Czapkiewiczza, R. Raka, T. Slezakb, J. Koreckib and C.G. Kimc. 2004. R-VSM and MOKE magnetometers for nanostructures. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials:** 2294–2295

Zieba A. 1982. Detection coil, sensitivity function, and sample geometry effects for vibrating sample magnetometers. **Rev. Sci. Instrum:** 1344









**VSM Calibration Sample  
Nickel Sphere  
Model 730908**

This nickel sphere is provided for use in the calibration of magnetometers. The moment value at 298 K in an applied field of 398 kA/m (5000 Oe) is given by the following value:

$$m = 6.92 \text{ mA}\cdot\text{m}^2 \quad (\text{SI})$$

$$m = 6.92 \text{ emu} \quad (\text{cgs emu})$$

The uncertainty in this value is estimated at  $\pm 1.5\%$ .

Measurement Background

A random sampling from a lot of 3 mm diameter, >99% Ni spheres were compared directly against a National Institute of Standards and Technology (NIST) SRM 772a Magnetic Moment Standard using a vibrating sample magnetometer. The moment for the spheres was also determined from the sphere volume, the known density 8.907 g/cm<sup>3</sup>, and the mass magnetization for nickel,  $\sigma = 54.94 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$  (54.94 emu/g), stated in the certification for the NIST SRM 772a. These two determinations were found to agree to 0.3% for the sampling.

Handling

The moment value for this sample should remain valid as long as the sample is not mishandled. Handle only with non-metallic, non-magnetic tweezers and avoid contamination or deformation of any kind.

Certification

This sample is provided as a working calibration sample suitable for use on a day-to-day basis. If a certified standard or traceability to national standards is required, the purchase of a NIST SRM 772a should be considered (available from Lake Shore, Model 730907).

F045-00-00

**LakeShore.**

Lake Shore Cryotronics, Inc. • 575 McCorkle Boulevard • Westerville, OH 43082  
Sales: (614) 891-2244 • Fax: (614) 891-1392 • sales@lakeshore.com • www.lakeshore.com



ภาคผนวก ข

การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

## ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ของการวัดวัสดุแถบแม่เหล็ก

การประเมินค่าความไม่แน่นอน type A ( $u_a$ )

ผลจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแถบแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.000763 ของการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้งและประมาณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีลักษณะการกระจายแบบปกติ (normal distribution) ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนชนิด A ได้ดังนี้

$$u_a = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (62)$$

$$= \pm \frac{0.000763}{\sqrt{5}} \text{ emu} \quad (63)$$

$$= \pm 3.41 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (64)$$

การประเมินค่าความไม่แน่นอน type B ( $u_b$ )

พิจารณาค่าความไม่แน่นอน ของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแถบแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ที่ ซึ่งเครื่อง VSM ได้ผ่านการเทียบมาตรฐานกับวัสดุแม่เหล็กอ้างอิง มีค่า ความไม่แน่นอนจากประกาศนียบัตรรับรองการเทียบมาตรฐาน (calibration of certificate) ที่  $\pm 1.5\%$  ของโมเมนต์แม่เหล็ก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $k=2$ ) และมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ

วัสดุแม่เหล็กอ้างอิงทรงกลม निकเกิด ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe มีค่าโมเมนต์แม่เหล็ก 0.450 emu มีค่าความไม่แน่นอนดังนี้

$$u = \pm (1.5\% \text{ of } 0.450 \text{ emu}) \quad (65)$$

$$= \pm 6.75 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (66)$$

ดังนั้น

$$u_b = \pm \frac{u}{k} \quad (67)$$

$$= \pm \frac{6.75 \times 10^{-4} \text{ emu}}{2} \quad (68)$$

$$= \pm 3.38 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (69)$$

การประเมินค่าความไม่แน่นอนรวม ( $u_c$ )

ค่าความไม่แน่นอนรวม (combine uncertainty;  $u_c$ ) เป็นการนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ข้างต้นมารวมกันรากที่สองยกกำลังสอง ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (70)$$

$$= \pm \sqrt{(3.41 \times 10^{-4})^2 + (3.38 \times 10^{-4})^2} \quad (71)$$

$$= \pm 4.80 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (72)$$

ค่าตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (coverage factor; k)

ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (k) สามารถหองศาความเป็นอิสระประสิทธิผล ( $\gamma_{eff}$ ) ได้มาจากสมการ Welch-Satterthwaite อ้างอิง EA-4/02, Appendix E สมการ E.1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\gamma_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\gamma_i}} \quad (73)$$

$$= \frac{u_c^4}{\frac{u_a^4}{n-1} + \frac{u_b^4}{\infty}} \quad (74)$$

ได้ค่าองศาความเป็นอิสระประสิทธิผลที่  $\nu_{eff} = \infty$  จากนั้นจึงหาค่าตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม จากตาราง T-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % มีค่า  $k = 2$

การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย ( $U$ )

นำค่าที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนรวมมาคูณกับค่าครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ดังนี้

$$U = \pm k \cdot u_c \quad (75)$$

$$= \pm 2 \cdot (4.80 \times 10^{-4}) \text{ emu} \quad (76)$$

$$= \pm 9.60 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (77)$$

และนำค่าที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนต่างๆ มาใส่ลงในตารางองค์ประกอบการคำนวณค่าจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง VSM ดังนี้

ตารางผนวกที่ ข1 องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	วัสดุทรงกลม निकเกิด	$6.75 \times 10^{-4}$	Nor.	2	1	$3.38 \times 10^{-4}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	$3.41 \times 10^{-4}$	Nor.	1	1	$3.41 \times 10^{-4}$	4
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม					$4.80 \times 10^{-4}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย		Coverage Factor k=	2		$9.60 \times 10^{-4}$	$\infty$

## ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM

การประเมินค่าความไม่แน่นอน type A ( $u_a$ )

ผลจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ แถบแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.000398 ของการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และประมาณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีลักษณะการกระจายแบบปกติ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนชนิด A ได้ดังนี้

$$u_a = \pm \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (78)$$

$$= \pm \frac{0.000398}{\sqrt{5}} \text{ emu} \quad (79)$$

$$= \pm 1.78 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (80)$$

การประเมินค่าความไม่แน่นอน type B ( $u_b$ )

พิจารณาค่าความไม่แน่นอนจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง R-VSM กับเครื่อง VSM โดยทำการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ แถบแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe และถ่ายค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัดวัสดุแถบแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe ด้วยเครื่อง VSM มาให้กับเครื่อง R-VSM ซึ่งในการวัดเครื่อง VSM มีค่าความไม่แน่นอนที่  $\pm 9.60 \times 10^{-4}$  emu ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $k=2$ ) และมีลักษณะการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular distribution)

$$u_b = \pm \frac{u}{k} \quad (81)$$

$$= \pm \frac{9.60 \times 10^{-4} \text{ emu}}{1.732} \quad (82)$$

$$= \pm 5.54 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (83)$$

การประเมินค่าความไม่แน่นอนรวม ( $u_c$ )

ค่าความไม่แน่นอนรวม (combine uncertainty;  $u_c$ ) เป็นการนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ข้างต้นมารวมกันรากที่สองยกกำลังสอง ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$u_c = \pm\sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (84)$$

$$= \pm\sqrt{(1.78 \times 10^{-4})^2 + (5.54 \times 10^{-4})^2} \quad (85)$$

$$= \pm 5.82 \times 10^{-4} \text{ emu} \quad (86)$$

ค่าตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (coverage factor;  $k$ )

ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ( $k$ ) สามารถหาองศาความเป็นอิสระประสิทธิผล ( $\gamma_{eff}$ ) ได้มาจากสมการ Welch-Satterthwaite อ้างอิง EA-4/02, Appendix E สมการ E.1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\gamma_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\gamma_i}} \quad (87)$$

$$= \frac{u_c^4}{\frac{u_a^4}{n-1} + \frac{u_b^4}{\infty}} \quad (88)$$

ได้ค่าองศาความเป็นอิสระประสิทธิผลที่  $\gamma_{eff} = \infty$  จากนั้นจึงหาค่าตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม จากตาราง T-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% มีค่า  $k = 2$

การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย ( $U$ )

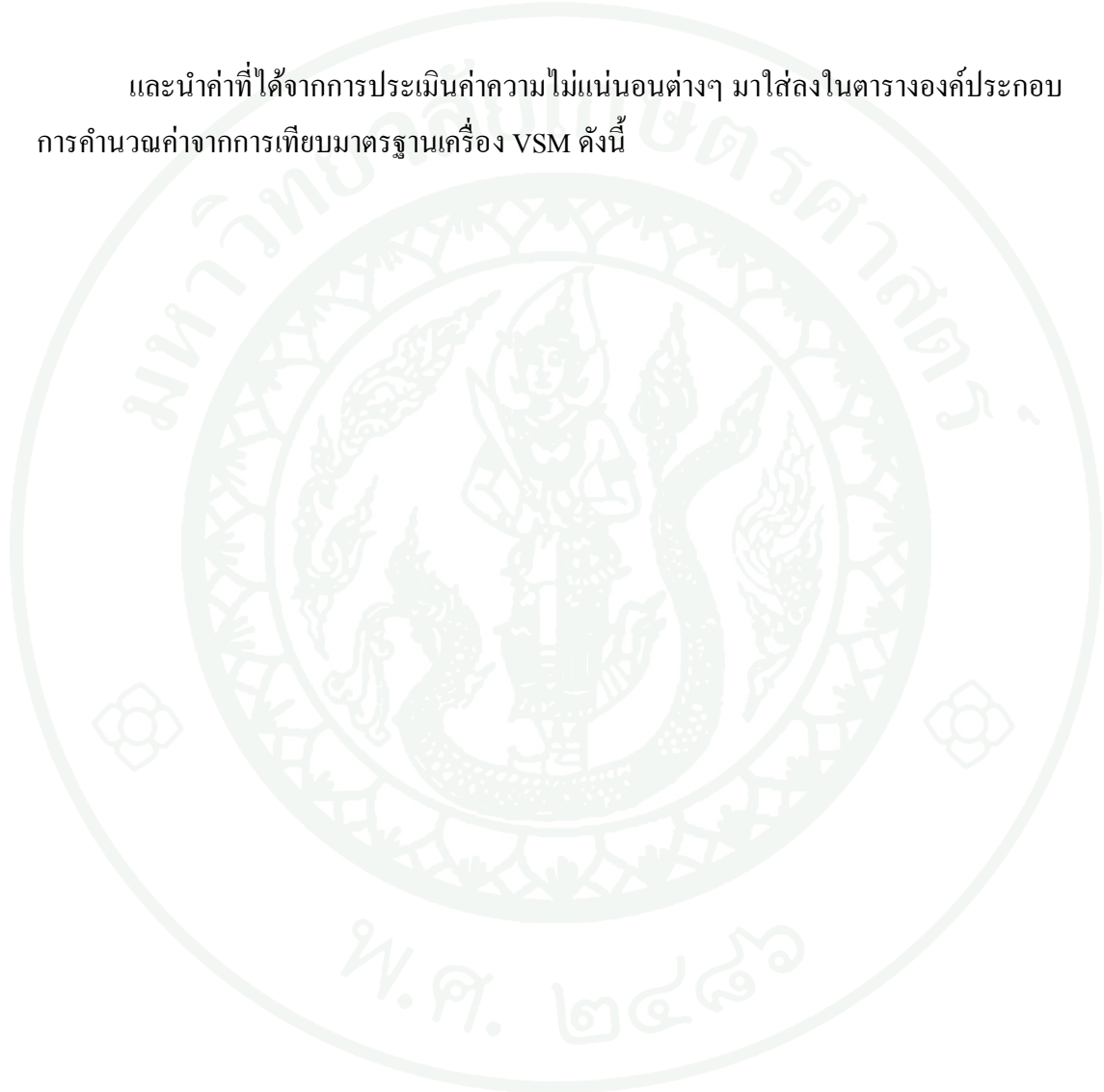
นำค่าที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนรวมมาคูณกับค่าครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ดังนี้

$$U = \pm k \cdot u_c \quad (89)$$

$$= \pm 2 \cdot (5.82 \times 10^{-4}) \text{ emu} \quad (90)$$

$$= \pm 1.16 \times 10^{-3} \text{ emu} \quad (91)$$

และนำค่าที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนต่างๆ มาใส่ลงในตารางองค์ประกอบ  
การคำนวณค่าจากการเทียบมาตรฐานเครื่อง VSM ดังนี้



ตารางผนวกที่ ข2 องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่า โมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากวัสดุแถบแม่เหล็กอ่อน ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	เครื่อง VSM	$9.60 \times 10^{-4}$	Nor.	1.732	1	$5.54 \times 10^{-4}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	$1.78 \times 10^{-4}$	Nor.	1	1	$1.78 \times 10^{-4}$	4
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage Factor k=			$5.82 \times 10^{-4}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย			2		$1.16 \times 10^{-3}$	$\infty$



ภาคผนวก ค  
ตารางผนวก

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการวัดทดสอบความถี่สั้นกำหนดของหัววัด R-VSM ที่ความถี่ 30-40 Hz

ความถี่ (Hz)	ค่าความต่างศักย์ (mVrms)	ความถี่ (Hz)	ค่าความต่างศักย์ (mVrms)
30.0	5.639	36.0	7.203
31.0	5.638	36.1	7.151
32.0	5.640	36.2	7.110
33.0	5.707	36.3	7.081
34.0	5.891	36.4	7.067
35.0	6.438	36.5	6.949
35.1	6.610	36.6	6.913
35.2	6.740	36.7	6.833
35.3	6.902	36.8	6.78
35.4	7.031	36.9	6.738
35.5	7.070	37.0	6.700
35.6	7.191	38.0	6.242
35.7	7.200	39.0	5.955
35.8	7.214	40.0	5.799
35.9	7.229		

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการทดสอบวงจรตรวจวัดแอมพลิฟิเคชันของตัวอย่างที่กำลังขยาย 100 เท่า  
จากการวัดจำนวน 30 ครั้ง

ครั้งที่	จากเครื่องกำเนิดความถี่ ( HP 33120A) ที่ความถี่ 35.9 Hz แอมป์ริจูด 250 $\mu$ Vrms		
	ความต่างศักย์ (mVAC)	ค่าเฉลี่ย (mVAC)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	25.0004		
2	25.0573		
3	25.0769		
4	25.0637		
5	25.0958		
6	25.0589		
7	25.0439	25.0459	$\pm 0.0279$
8	25.0861		
9	25.0618		
10	25.0300		
11	25.0145		
12	25.0220		
13	25.0287		

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

ครั้งที่	จากเครื่องกำเนิดความถี่ ( HP 33120A) ที่ความถี่ 35.9 Hz แอมป์ริจูด 250 $\mu$ Vrms		
	ความต่างศักย์ (mVAC)	ค่าเฉลี่ย (mVAC)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
14	25.0156		
15	25.0002		
16	25.0500		
17	25.0507		
18	25.0934		
19	25.0486		
20	25.0230		
21	25.0075		
22	25.0138	25.0459	$\pm 0.0279$
23	25.0606		
24	25.0495		
25	25.0842		
26	25.0116		
27	25.0414		
28	25.0730		
29	25.0478		
30	25.0215		

ตารางผนวกที่ ค5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัด 30 ครั้ง ที่สนามแม่เหล็ก 5 kOe

ครั้งที่	เครื่องวัด VSM	เครื่องวัด R-VSM	ครั้งที่	เครื่องวัด VSM	เครื่องวัด R-VSM
1	0.125	0.125	17	0.125	0.125
2	0.125	0.125	18	0.125	0.125
3	0.125	0.125	19	0.124	0.125
4	0.125	0.125	20	0.124	0.125
5	0.125	0.125	21	0.124	0.125
6	0.125	0.125	22	0.125	0.125
7	0.125	0.125	23	0.124	0.125
8	0.125	0.125	24	0.125	0.125
9	0.125	0.125	25	0.124	0.125
10	0.125	0.125	26	0.124	0.125
11	0.125	0.125	27	0.124	0.125
12	0.125	0.125	28	0.124	0.125
13	0.125	0.125	29	0.124	0.125
14	0.125	0.125	30	0.124	0.125
15	0.125	0.125	ค่าเฉลี่ย	0.125	0.125
16	0.125	0.125	SD	$\pm 2.15 \times 10^{-4}$	$\pm 4.08 \times 10^{-5}$

ตารางผนวกที่ ๑๖ องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	วัสดุทรงกลม निकเกิด	0.00187	Nor.	2	1	$9.35 \times 10^{-4}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	$3.25 \times 10^{-4}$	Nor.	1	1	$3.25 \times 10^{-4}$	4
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage Factor k=			$9.90 \times 10^{-4}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย			2			$1.98 \times 10^{-3}$

ตารางผนวกที่ ๗ องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ในการวัด 5 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

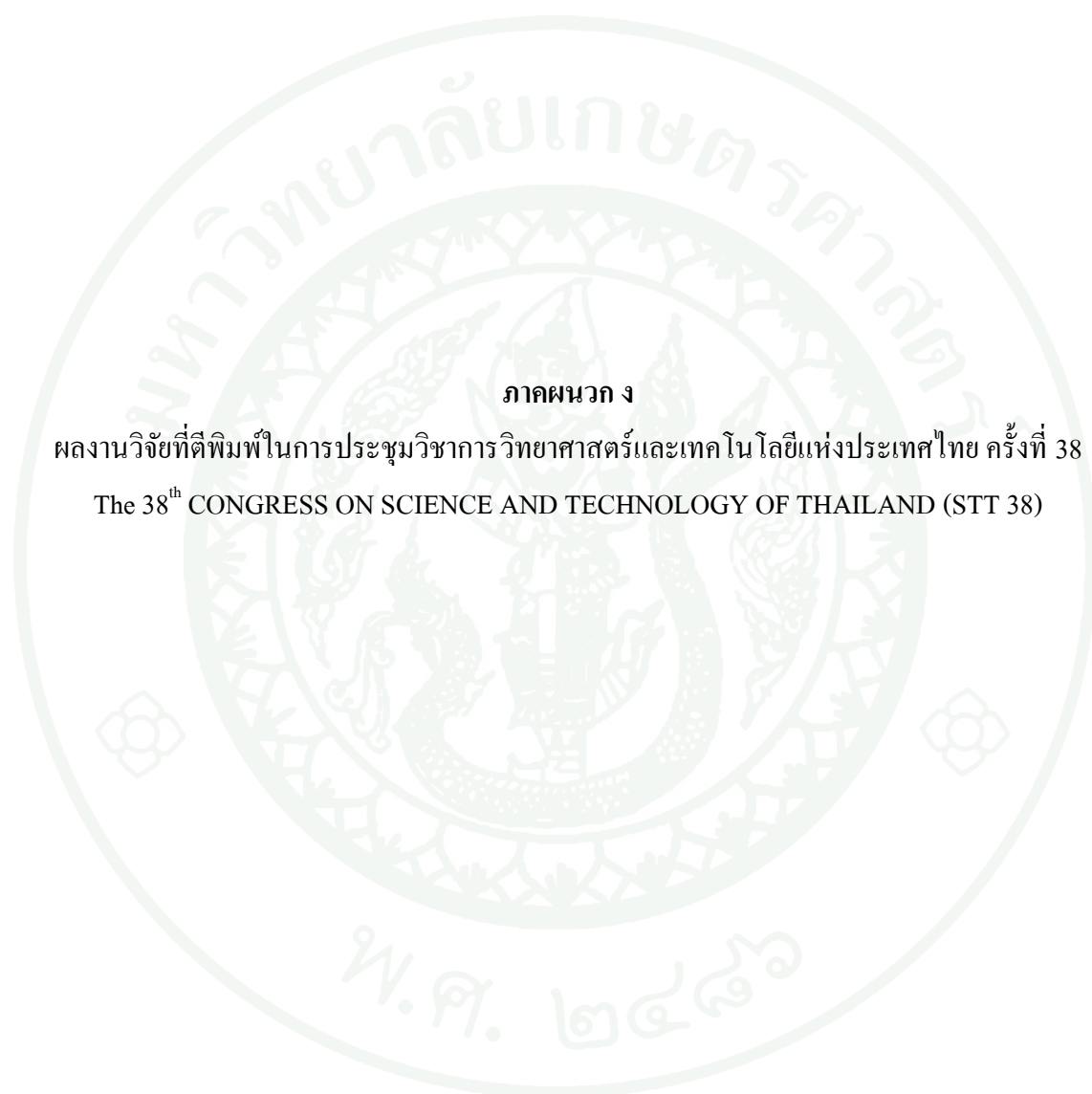
Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	เครื่อง VSM	$1.98 \times 10^{-3}$	Rec.	1.732	1	$1.14 \times 10^{-3}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	0.000416	Nor.	1	1	$1.86 \times 10^{-3}$	4
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage Factor k=			$2.18 \times 10^{-3}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย			2		$4.36 \times 10^{-3}$	$\infty$

ตารางผนวกที่ ค8 องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ในการวัด 30 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	วัสดุทรงกลม निकเกิด	$9.40 \times 10^{-4}$	Nor.	2	1	$4.69 \times 10^{-4}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	$3.93 \times 10^{-5}$	Nor.	1	1	$3.93 \times 10^{-5}$	29
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage Factor k=			$4.71 \times 10^{-4}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย			2			$9.41 \times 10^{-4}$

ตารางผนวกที่ ค9 องค์ประกอบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่อง R-VSM ในการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (m) จากแถบวัสดุ  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ในการวัด 30 ครั้ง ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

Symbols	Source Uncertainty	Measured (emu)	Prob. Dis	Divided	Coeff Sen	Uncertainty (emu)	DOF
$u_b$	เครื่อง VSM	$9.41 \times 10^{-4}$	Rec.	1.732	1	$5.43 \times 10^{-4}$	$\infty$
$u_a$	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	$7.45 \times 10^{-6}$	Nor.	1	1	$7.45 \times 10^{-6}$	29
$u_c$	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage Factor k=			$5.43 \times 10^{-4}$	$\infty$
$U$	ความไม่แน่นอนขยาย			2		$1.09 \times 10^{-3}$	$\infty$



ภาคผนวก ง

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
The 38<sup>th</sup> CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THAILAND (STT 38)



## DESIGN AND CONSTRUCTION OF RESONANCE VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER

Ratipat Yamyim, Pongsakorn Jantaratana\*

Department of Physics, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

\*e-mail: fscipsj@ku.ac.th

**Abstract:** The resonance vibrating sample magnetometer (R-VSM) was constructed for magnetic hysteresis loop measurements of thin films and nanostructures magnetic materials. The performance of the R-VSM was tested and compared with that of the vibrating sample magnetometer (VSM). The measurement of hysteresis loops of  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{138}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ribbon and magnetic tape show that the R-VSM is a valuable tool for investigation magnetic properties of nanostructures magnetic materials.

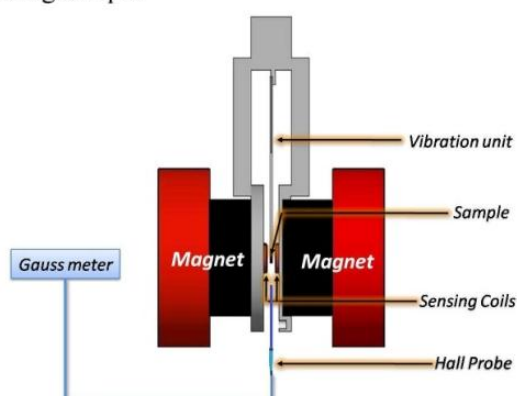
**Introduction:** Vibrating sample magnetometer (VSM) was developed for the first time by Foner in 1959.<sup>1</sup> For magnetic properties measurement, the sample is vibrated perpendicular to the external magnetic field generated by an electromagnet. A set of sensing coils is used to measure magnetic properties of the material. The voltage induced ( $V$ ) in the VSM sensing coils is given by:

$$V = mAfS,$$

where  $m$  is magnetic moment of the sample,  $A$  is the amplitude of vibration,  $f$  is the frequency of vibration and  $S$  is the sensitivity function of the sensing coils. The cgs unit of  $m$ ,  $A$ ,  $f$  and  $S$  are emu, cm,  $\text{s}^{-1}$  and  $\text{Vcm}^{-1}\text{emu}^{-1}$  respectively. It is clear from the expression that the moment sensitivity can be improved by increasing  $A$ ,  $f$  and  $S$ . The moment sensitivity of VSM, is known as the calibration constant, can be found by measuring magnetic moment of small high purity nickel sphere.

In recent years there has been extensive experimental in the thin magnetic films and nanostructures.<sup>2-4</sup> The magnetic properties of these structures are becoming difficult to measure owing to the decreasing of the magnetic moment signal. In this paper, R-VSM system was designed and constructed in order to use for magnetic hysteresis loop measurements of thin film magnetic materials.

**Methodology:** The R-VSM, shown schematically in figure 1, consists of an electromagnet providing the dc magnetic field, a vibration unit and detection coils generating the signal voltage due to the vibrating sample.

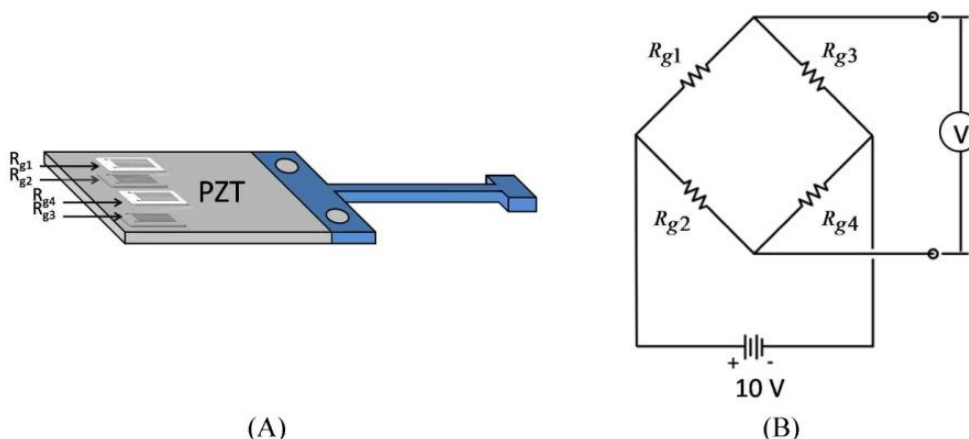


**Figure 1.** Schematic diagram of the R-VSM.

An electromagnet (Walker Scientific Inc. model HV-4H with a power supply) was used to generate the applied field  $H$ . A gaussmeter (LakeShore model 455) equipped with a Hall



probe (LakeShore model HMMT-6J04-VR) was used for measuring the magnetic field. The field was controlled by adjusting the current of the power supply. The piezoelectric bending actuator (Piezo Systems Inc. model D220-A4-503YB) with four strain gages (figure 2) was used as the vibration unit. A power amplifier (TOA Corporation model A-2120H) was used to amplify the sinusoidal signal from the lock-in amplifier (Stanford Research Systems model SR850) and then supplied to a piezoelectric bending actuator to vibrate the sample.



**Figure 2.** Schematic diagram of the vibration unit: (A) bending actuator with four strain gages; and (B) gage position in the Wheatstone bridge.

In order to detect amplitude of the vibration, the strain gages were wired into a Wheatstone bridge and supplied by a constant voltage 10 V as shown in figure 2. The sample under test was attached to the end of an epoxy strip which oscillates in parallel to the direction of applied field. Two similar sensing coils connected in series and opposite direction were used as the sensing coils. The induced voltage at the sensing coils was measured by the lock-in amplifier. The performance of the R-VSM system was tested and compared with that of VSM.

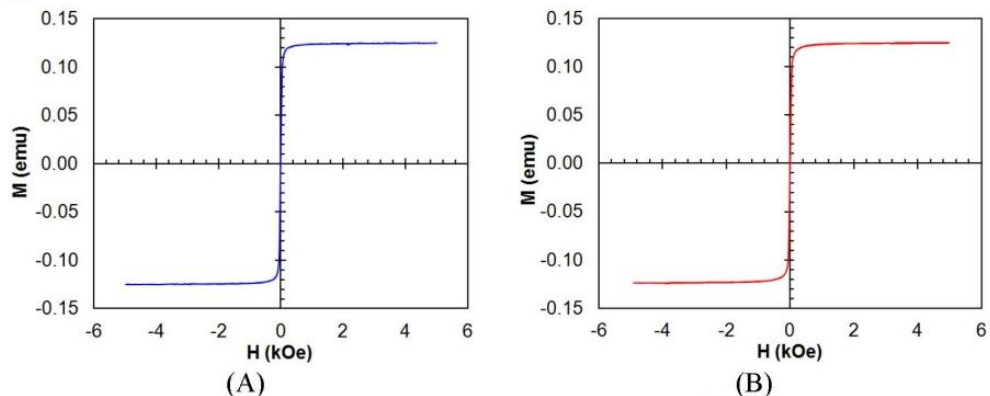
**Results, Discussion and Conclusion:** The VSM used in this study was calibrated by using a nickel sphere (LakeShore model 730908). The magnetic moment of  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  (Metglas<sup>TM</sup> 2826MB) ribbon under magnetic field of 5 kOe was measured by the VSM and used as reference for the R-VSM. The reference  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ribbon was attached to the end of the epoxy strip of the R-VSM which oscillated at the resonance frequency of 35.9 Hz with the constant amplitude. The calibration constant of  $246.4 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{V}$  (equivalent to 246.4 emu/V in the cgs unit system) was obtained by measuring induced voltage of the sensing coils under applied magnetic field of 5 kOe. The obtained calibration constant can then be used to convert the measuring voltage to the magnetic moment of the sample under test.

The in-plane magnetic hysteresis loops of  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ribbon measured by VSM and R-VSM are shown in figure 3. Data were collected at room temperature under applied magnetic field of 5 kOe aligned in-plane and parallel to the easy axis of the sample. According to the results, it is confirmed that the R-VSM can be used to measure magnetic property of the soft ferromagnetic ribbon.

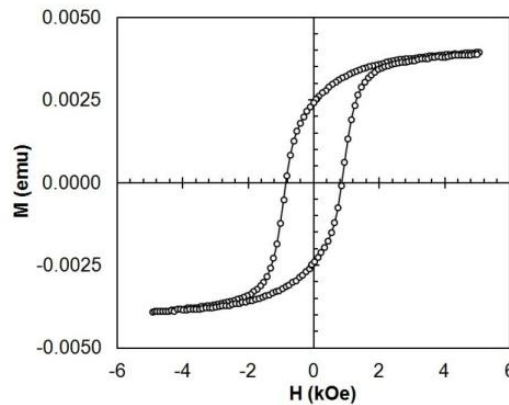


B\_B0004

3



**Figure 3.** Hysteresis loops of  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$  ribbon (Metglas<sup>TM</sup> 2826MB) measured by VSM (A) and R-VSM (B).



**Figure 4.** Hysteresis loop of magnetic tape measured by the R-VSM.

Figure 4 show the in-plane hysteresis loop for a magnetic tape sample (3 mm×3 mm) cutting from the commercial 3.25 inch floppy disk. The results show the quite good signal-to-noise ratio when the peak-to-peak of data fluctuation is only a few 10  $\mu\text{emu}$ .

In conclusion, the designed R-VSM is sensitive enough for hysteresis loop measurements of magnetic thin films and ribbons. The cost of designed system is very lower than those of the commercial VSMs.

#### References:

1. Foner S. Rev Sci Instr 1959;27:548
2. Zivotsky O, Postava K, Kraus L, Jiraskova Y, Juraszek J, Teillet J, Barcova K, Svec P, Janickovic D, Pistora J, J Magn Magn Mater 2008;320:1535-1540.
3. Modak SS, Kane SN, Gupta A, Mazaleyrat F, LoBue M, Coison M, Celegato F, Tiberto P, Vinai F, Thin Solid Films 2012;520:3499-3504.
4. Maklakov SS, Maklakov SA, Ryzhikov IA, Rozanov KN, Osipov AV, J Magn Magn Mater 2012;324:2018-2112.

**Acknowledgements:** The authors would like to thank the Department of Chemistry, Khon Kaen University for the nickel sphere standard support.

**Keywords:** hysteresis loop, magnetic moment, magnetometer, nanostructure, thin film

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายรติพัทธ์ แยมยิ้ม  
เกิดวันที่ 23 กรกฎาคม 2528  
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก  
ประวัติการศึกษา วท.บ. (ฟิสิกส์อุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

