

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของวัสดุแม่เหล็ก

The Development of Magnetic Susceptibility

Measuring Instrument



สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะผู้ดำเนินการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของวัสดุแม่เหล็ก

The Development of Magnetic Susceptibility

Measuring Instrument

หัวหน้าโครงการ

1. นายสุรพล รักรวิชัย

ผู้ร่วมทำวิจัย

2. นายอารีย์ วิเชียรฉาย

3. นายวิชิต ศิริโชติ

4. นายชนะ จินะกุล

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่า susceptibility ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) โดยอาศัยหลักการของฟาราเดย์วัดค่าแรงปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กที่มีสนามไม่สม่ำเสมอ เครื่องมือที่สร้างขึ้นมีความไวถึง $2 \mu\text{g}$ (ค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่างน้อยที่สุดที่วัดได้) หรือมีความไว $3 \times 10^{-10} \frac{\text{emu}}{\text{Oe}}$ ในเทอม $m\chi$ เครื่องมือวัดค่า susceptibility ที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้ทั้งสารไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก เฟอร์รี-เฟอร์โรแมกเนติก ในสภาวะของแข็งและผงผลึก เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเป็นแบบโยคคู่ (ตัว C ประกอบ) แกนแม่เหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 cm ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 7.6 kG ที่ระยะระหว่างขั้ว 2.54 cm กระแส 6 A และค่าผลคูณระหว่างเกรเดียนท์กับความเข้มสนาม $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่เท่ากับ $6.4 \text{ kG}^2/\text{cm}$ มีปริมาตร 4 cm^3 เมื่อนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นไปวัดค่า susceptibility ของสาร ดิบบุกออกไซด์ (SnO_2 99.98 %) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.74% วานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5 9.99%) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 1.27% คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO 99.998 %) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.03% ซามเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3 99.9%) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.28% นิกเกิลออกไซด์ (NiO 99.999%) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.35% โคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3 99.998 %) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.22% นีโอเดียมออกไซด์ (Nd_2O_3 99.99%) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 2.69% แมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3 98 %) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 0.010% และแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3 99.999%) ได้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด 1.24%

RCH

๐๘

๗๕๔. ๒

๕๘

๘๕๕๕

เลขหม.....๘๕๕๕

เลขทะเบียน.....33295

วัน, เดือน, ปี 2.1 ก.ค. 2542



T033295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

The research present the design and development of Magnetic Susceptibility Measuring Instrument. The principle of instrument is based on Faraday method used for measuring force on a sample suspended between the pole tips in nonuniform magnetic field. The instrument's sensitivity is $2 \mu g$ (that corresponds to magnetic force sensitivity of sample.) or in term of $m\chi$ is $3 \times 10^{-10} \frac{emu}{Oe}$ and any samples of any materials measurements are possible such as diamagnetic ; paramagnetic , and ferri - ferromagnetics for samples of arbitrary forms of solids and powders. An electromagnet is double yokes type with pole sizes of 10.2 cm in diameter. For the interpole gap 2.54 cm and coils currents of 6 A give the field strengths 7.6 kG and constant value of $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ is $6.4 \text{ kG}^2/\text{cm}$. The operating volume about 4 cm^3 (within $\pm 2\%$ constancy of magnetic force.) Preliminary test of the instrument was done by determination of reading accuracy with high purity sample of Tin (IV) oxide (99.998 %), Vanadium (V) oxide (99.9%) , Copper oxide (99.998 %), Samarium (III) oxide (99.9%) , Nickel oxide (99.999%) , Cobalt (III) oxide (99.99%) , Neodymium (III) oxide (99.99%) Manganese (III) oxide (98 %) , Gadolinium (III) oxide (99.999%) are 0.74 , 1.27 , 0.03 , 0.28 , 0.35 , 0.22 , 2.69 , 0.01 , 1.24 percentage respectively

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	IX
คำขอและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการ.....	3
2. สมบัติทางฟิสิกส์ของสารแม่เหล็ก.....	4
2.1 โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน.....	4
2.2 โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอม.....	6
2.3 พฤติกรรมของสารภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	9
2.4 สารไดอามagnetic.....	12
2.5 สารพาราแมกเนติก.....	15
2.6 สารเฟอร์โรแมกเนติก.....	20
2.7 สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	22
2.8 สารเฟอร์รีแมกเนติก.....	23
3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	27
3.1 หลักการพื้นฐานของการวัดค่าซ์เซพติบิลิตี.....	27
3.2 การวัดค่าซ์เซพติบิลิตีโดยวิธีการของฟาราเดย์.....	30
3.3 การคำนวณค่าโมเมนต์แม่เหล็กและค่าซ์เซพติบิลิตี.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 เครื่องมือการวัดค่าชั้สเขตคิบลิตีและการสอบเทียบ.....	35
4.1 โยค.....	37
4.2 แกนแม่เหล็ก.....	40
4.3 ขดลวดและการพันขดลวด.....	45
4.4 เครื่องชั่ง.....	52
4.5 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	57
4.6 สนามและเกรเดียนท์.....	63
5 การทดลอง.....	103
5.1 แรงที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง.....	103
5.2 ขั้นตอนการวัดค่าชั้สเขตคิบลิตีของสารตัวอย่าง.....	105
5.3 ความถูกต้องในการวัด.....	105
5.4 การทดลองวัดค่าชั้สเขตคิบลิตีของสารตัวอย่าง.....	108
6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	118
บรรณานุกรม.....	123
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดค่าชั้สเขตคิบลิตี.....	125
ภาคผนวก ข. หน่วยและการแปลงหน่วย.....	128
ภาคผนวก ค. ตารางธาตุและตารางค่าชั้สเขตคิบลิตีของสารตัวอย่าง.....	131
ที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ.....	
ประวัติผู้เขียน.....	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	36
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของธาตุที่เป็นสาร ไดอะแมกเนติกและ พาราแมกเนติกบางชนิด.....	36
4.3 รายละเอียดของเครื่องชั่งรุ่น MT5 (Microbalance).....	54
4.4 การสอบเทียบเครื่องชั่งรุ่น MT5 ด้วยมวลมาตรฐาน.....	55
4.5 รายละเอียดของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ารุ่น PAD70-15L.....	58
4.6 ค่า ripple และ noise ของกระแสไฟฟ้าที่ให้แกขดลวด.....	60
4.7 กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของขดลวดทองแดง.....	61
4.8 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้วและค่ากระแสต่างๆ.....	63
4.9 กระแสไฟฟ้าอุณหภูมิของขดลวดทองแดงและความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	65
4.10 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	69
4.11 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2cm...	72
4.12 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	73
4.13 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm..	76
4.14 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	77
4.15 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm..	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.....	81
4.17 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	83
4.18 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	86
4.19 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	87
4.20 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	90
4.21 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์ และผลคูณระหว่างความเข้ม สนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	91
4.22 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	94
4.23 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 , 6 , 7 A ระยะ ห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	96
4.24 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน x ที่ระยะ 0 - 4.5 cm จากแนว กลางขั้วแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้า 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y ที่ระยะ 0 - 1.0 cm. จากจุด กลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	99
5.1 ค่าน้ำหนักของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างในสนามแม่เหล็ก.....	107
5.2 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของดีบุกออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	109
5.3 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของวานาเดียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	110
5.4 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของกอปเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	111
5.5 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของซันมาเรียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	112
5.6 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของนิเกิลออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	113
5.7 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	114
5.8 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของนีโอไดเมียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	115
5.9 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของแมงกานีสออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	116
5.10 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของกาโดลิเนียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาตรสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง.....	117
6.1 ประสิทธิภาพของเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีที่สร้างขึ้น.....	119
6.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน และความคลาด เคลื่อนในการวัด.....	120

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการโคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน.....	4
2.2 แสดงการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน.....	6
2.3(ก) แสดงโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมอิสระ.....	7
2.3(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมอิสระในสนามแม่เหล็ก	8
2.4 แสดงกราฟการแมกเนโตเซชัน.....	10
2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง μ กับ H ในสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก	11
2.6 แสดงผลของสนามแม่เหล็กต่อวงโคจรของอิเล็กตรอน.....	13
2.7 แสดงกราฟแลงวินฟังก์ชัน.....	18
2.8 แสดงกราฟการแมกเนโตเซชัน.....	18
2.9 แสดงการวางตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติก.....	20
2.10 แสดงการเกิดแมกเนโตเซชันในสารเฟอร์โรแมกเนติก.....	22
2.11 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กและโครงข่ายย่อยของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก	23
2.12 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก.....	24
3.1 แสดงการเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบของแท่งแม่เหล็กที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ.....	27
3.2 แสดงการเกิดแรงแม่เหล็กเมื่อวางวัสดุแม่เหล็กในสนามที่ไม่สม่ำเสมอ.....	28
3.3 แสดงสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอและสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านวัสดุที่มีค่า $\mu > 1$	29
3.4 แสดงการวางตำแหน่งของแท่งไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติกในสนามแม่เหล็ก.....	30
3.5 แสดงการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กและซัสเซพติบิลิตีตามวิธีของฟาราเดย์....	31
4.1 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและส่วนประกอบที่สร้างขึ้น.....	36
4.2 ขนาดของโซลและแกนแม่เหล็ก.....	37
4.3 ขนาดมิติของโซลที่ได้ออกแบบ.....	40
4.4 การเกิดสนามในแกนแม่เหล็กรูปทรงกระบอกเนื่องจากขดลวด.....	41
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุแกนแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	43
4.6 ลักษณะขั้วแม่เหล็กที่ทำให้เกิดเกรเดียนท์.....	44
4.7 มิติขนาดของแกนแม่เหล็กที่สร้างขึ้น.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ภาพตัดขวางของขดลวดที่ออกแบบ.....	45
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีภายนอกกับความยาวของขดลวด สำหรับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่แกนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นทรงกระบอก	48
4.10 ขนาดของขดลวดและลวดที่ใช้.....	49
4.11 โยคด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก.....	50
4.12 ขดลวดทองแดงปราศจากขดลวดเย็นที่พันขึ้น.....	50
4.13 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	51
4.14 รูปถ่ายภายนอกเครื่องชั่งรุ่น MTS (Microbalance).....	53
4.15 กราฟ Nominal Value และ Corrected Value ของเครื่องชั่ง.....	55
4.16 รูปถ่ายมวลมาตรฐาน 5-10 mg.....	56
4.17 รูปถ่ายการสอบเทียบเครื่องชั่งด้วยมวลมาตรฐาน.....	56
4.18 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ารุ่น PAD70-15L.....	57
4.19 รูปลักษณะสัญญาณ Ripple และ Noise ของกระแสที่ให้แก่ขดลวด.....	60
4.20 กราฟค่ากระแสที่ให้แก่ขดลวดเวลา 0-60 นาที.....	62
4.21 กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของขดลวดเมื่อให้กระแส 6 A เวลา 0-60 นาที.....	62
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแส ไฟฟ้า ที่ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก 1 , 2.54 , 5.1 cm.....	64
4.23 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแส 6 A เวลา 0-60 นาที.....	67
4.24 การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างขั้วแม่เหล็ก....	68
4.25 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	71
4.26 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ ต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm...	71
4.27 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 -1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2 cm.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	75
4.29 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2 cm.....	75
4.30 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ ระยะ 0.8 -1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะ ห่างระหว่างขั้ว 2 cm.....	76
4.31 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้ว แม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	79
4.32 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ ต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm...	79
4.33 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 -1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2 cm.....	80
4.34 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ ระยะ 0.8 -1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2 cm.....	82
4.35 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้ว แม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	85
4.36 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	85
4.37 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ ระยะ 0.8-1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	89
4.39 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	89
4.40 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	90
4.41 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	93
4.42 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	93
4.43 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	94
4.44 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	95
4.45 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	95
4.46 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.....	97
4.47 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน x ที่ระยะ 0 - 4.5 cm จากแนวกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะระหว่างขั้ว 2.54 cm..	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.41	กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y ที่ระยะ $0 - 1.0$ cm จากแนวกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm..	100
5.1	รูปถ่ายของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่ทำจากแผ่นทองแดง.....	104



คำย่อและสัญลักษณ์

$\mu_{(orbit)}$	โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอน โคจรรอบนิวเคลียส
$\mu_{(spin)}$	โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน
μ_B	(Bohr magnetic)
p	ความแรงขั้วแม่เหล็ก หน่วยเป็น $(g^{1/2} cm^{3/2} sec^{-1})$
d	ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก หน่วยเป็น cm
i	กระแสไฟฟ้า หน่วยเป็น (A)
H	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น (Oe)
B	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ หน่วยเป็น (gauss)
k	ผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$
M	ค่าแมกเนโตเซชัน หน่วยเป็น $(erg/Oe cm^3)$ หรือ (emu/cm^3)
μ	ค่าโมเมนต์แม่เหล็ก หน่วยเป็น (erg/Oe)
κ	Volume susceptibility หน่วยเป็น $emu/cm^3 Oe$
χ	Mass susceptibility หน่วยเป็น $emu/g Oe$
χ_A	Atomic susceptibility หน่วยเป็น $emu/gatom Oe$
χ_M	Molecular susceptibility หน่วยเป็น $emu/gmol Oe$
F_g^0	น้ำหนักของสารตัวอย่างกับภาชนะบรรจุสารตัวอย่างเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น g
F_g^1	น้ำหนักของสารตัวอย่างกับภาชนะบรรจุสารตัวอย่างเมื่อมีสนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น g
m	มวลสารตัวอย่าง หน่วยเป็น (g)
ΔF	แรงแม่เหล็กระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่าง หน่วยเป็น dyne
Φ	(Magnetic flux) หมายถึง ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านแกนหรือโยค
N	จำนวนรอบของขดลวด
f	(Space factor) อัตราส่วนของปริมาตรตัวนำต่อปริมาตรของขดลวด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในการศึกษาและวิจัยวัสดุทางแม่เหล็กเครื่องมือวัดสมบัติทางแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและสำคัญ เพื่อจะนำมาใช้ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของวัสดุ แต่เนื่องจากเทคโนโลยีการสร้างและการพัฒนาเครื่องมือวัดสมบัติทางแม่เหล็กยังไม่แพร่หลายมากนัก และมีราคาแพง ทำให้วงการวิจัยในประเทศไม่สามารถจัดหาได้โดยสะดวก จึงเป็นอุปสรรคที่ขัดขวางการวิจัยและพัฒนาของงานในด้านแม่เหล็ก ทำให้งานวิจัยทางด้านวัสดุแม่เหล็กของประเทศไม่ก้าวหน้าทันตามอารยะประเทศ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญการพัฒนาเครื่องมือวัดจึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญของสารแม่เหล็กคือค่าซัสเซพติบิลิตีทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) ที่มีความไวถึง $10 \mu\text{g}$ (แรงแม่เหล็กน้อยสุดที่วัดได้) และให้สามารถวัดได้กับสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ เช่น สารแม่เหล็กไดอะพาราแมกเนติก และเฟอร์โร ที่อยู่ในสถานะของแข็งโดยอาศัยหลักการของฟาราเดย์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือวัดเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของวัสดุแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการของฟาราเดย์นี้ มีวัตถุประสงค์อยู่ 4 ประการคือ

1. เพื่อสร้างเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 3 - 7 kG โดยใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศ

2. ศึกษาถึงการวัดค่าซัสเซพติบิลิตี โดยอาศัยหลักการของฟาราเดย์

3. ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น

4. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้น

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การวัดค่าชั้สเขตพิบัติติของสารแม่เหล็ก โดยวิธีการของฟาราเดย์ ทำได้โดยอาศัยการวัดค่าแรงปฏิกริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่าง ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยให้สารตัวอย่างอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและวัดค่าแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับสนามแม่เหล็กโดยเครื่องชั่งที่อ่านค่าได้ไวดึง 10 μg จากค่าความเข้มสนาม ค่าเกรเดียนท์ของสนาม ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้และค่าแรงแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องชั่ง สามารถคำนวณหาค่าชั้สเขตพิบัติติของสารตัวอย่างได้ ค่าชั้สเขตพิบัติติที่ได้สามารถตรวจสอบความถูกต้องหรือตรวจสอบความมาตรฐานของเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ โดยการวัดค่าชั้สเขตพิบัติติของสารตัวอย่างที่เป็นสารบริสุทธิ์ และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของสารบริสุทธิ์นั้น

1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยในระดับเบื้องต้น โดยได้ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ให้ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับค่าเกรเดียนท์ของสนามเพียงพอต่อการใช้งานและปริมาตรระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ค่าผลคูณนี้คงที่มีขนาดเพียงพอของการวางตำแหน่งของตัวอย่าง การวัดค่าแรงแม่เหล็กระหว่างสารตัวอย่างกับขั้วแม่เหล็กจะใช้เครื่องชั่งที่อ่านค่าได้ละเอียดถึง 10 μg เครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดได้กับสารแม่เหล็ก โคอาและพารา สำหรับเครื่องมือวัดค่าชั้สเขตพิบัติติที่ดีกว่านี้จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมต่อไป

1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิจัย

แผนการดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นที่ 1. ศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับการวัดค่าแม่เหล็กและชั้สเขตพิบัติติของวัตถุทั่วไปโดยอาศัยหลักการของฟาราเดย์ โดยได้ศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง หลักการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและส่วนประกอบทั้งหมด

ขั้นที่ 2. ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย โยค แกนแม่เหล็ก ขดลวด และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 3. ทำการตรวจคุณภาพและประสิทธิภาพของเครื่องที่สร้างขึ้น เพื่อเป็นการกำหนดกระแส และระยะระหว่างขั้วแกนแม่เหล็ก รวมทั้งปริมาตรที่ได้ของเครื่อง (บริเวณที่ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ มีค่าคงที่)

ขั้นที่ 4. คิดตั้งระบบและทดสอบการใช้งาน ทำการคิดตั้งระบบให้สมบูรณ์และทดสอบการใช้งาน ดูว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่อย่างไร

ขั้นที่ 5. วัดค่าสัมประสิทธิ์บิลิตีของสารตัวอย่างที่เป็นสารมาตรฐาน (สารบริสุทธิ์) ที่ทราบค่าโมเมนต์แม่เหล็กและสัมประสิทธิ์บิลิตีอยู่แล้ว เปรียบเทียบผลการวัดที่ได้กับค่ามาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อดูว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้มาตรฐานหรือไม่

ขั้นที่ 6. ปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่พบ

ขั้นที่ 7. สรุปการทำวิจัย และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

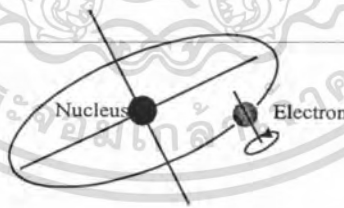
บทที่ 2

สมบัติทางฟิสิกส์ของสารแม่เหล็ก

2.1 โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน.

ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่และขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ในบริเวณที่ประจุเคลื่อนที่หรือรอบขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและจากโครงสร้างอะตอม ประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลางและมีอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นต่าง ๆ เคลื่อนที่รอบ ๆ นิวเคลียส การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมี 2 แบบคือ เคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบนิวเคลียส (Orbital) และการหมุนรอบตัวเอง (Spin) ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็ก การเคลื่อนที่เป็นวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจะเหมือนกับการไหลของกระแสในวงปิด (Loop) ของลวดที่ไม่มีค่าความต้านทาน ค่าโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสคือ

$$\mu_{(orb)} = \pi R^2 i \mu_o = \frac{A i}{10} \text{ ergs/Oe} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการโคจรรอบนิวเคลียสและการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

เมื่อ A เป็นพื้นที่วงปิดของอิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยตารางเซนติเมตร และจากทฤษฎีของ บอร์ (Bohr Theory) อิเล็กตรอนในอะตอมเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v วงโคจรรัศมี R ถ้า e เป็นประจุของอิเล็กตรอนในหน่วย esu c เป็นค่าความเร็วแสงหน่วย m/s และค่า e/c เป็นค่าประจุในหน่วย emu กระแสหรือประจุที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยเวลาคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (e/c)(v/2πR) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป (2.2) ะโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\mu_{(orbit)} = \frac{\pi R^2 ev}{2\pi Rc} = \frac{evR}{2c} \quad (2.3)$$

จากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจะมีค่าโมเมนตัมเชิงมุมบางค่าซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการควอนไทเซชัน (quantization) และมีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของ $h/2\pi$ เมื่อ h เป็นค่าคงที่ของพลังค์ นั่นคือ

$$mvR = nh / 2\pi \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.3) จะได้ว่า

$$\mu_{(orbit)} = eh / 4\pi \cdot mc \quad (2.5)$$

เป็นค่าโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนที่วงโคจรแรก ($n = 1$)

สำหรับการหมุนรอบตัวเอง (Spin) ของอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทุก ๆ สภาวะของวัสดุ ทุกค่าอุณหภูมิ กล่าวคือ อิเล็กตรอนจะหมุนรอบตัวเองไปพร้อม ๆ กับโคจรรอบนิวเคลียสและจะทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองคือ

$$\mu_{(Spin)} = eh / 4\pi \cdot mc \quad (2.6)$$

แทนค่าในหน่วย erg/Oe ได้คือ

$$\mu_{(Spin)} = \frac{(4.80 \times 10^{-10} \text{ esu})(6.62 \times 10^{-27} \text{ erg sec})}{4\pi(9.11 \times 10^{-28} \text{ g})(3.00 \times 10^{10} \text{ cm / sec})} \quad (2.7)$$

$$\mu_{(Spin)} = 0.927 \times 10^{-20} \quad \text{erg / Oe}$$

ค่า $\mu_{(Spin)}$ ในสมการที่ (2.7) ข้างต้นเป็นค่าโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการสปินของอิเล็กตรอนในวงโคจรแรก (First Bohr Orbit) และได้กำหนดเป็นค่าพื้นฐานของโมเมนต์แม่เหล็กไว้คือ μ_B (Bohr magneton) ดังนี้

$$\mu_B = eh/4\pi mc = 0.927 \times 10^{-20} \text{ erg/Oe} \quad (2.8)$$

เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับ โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการสปินของอิเล็กตรอนจะขอยกตัวอย่างโดยการพิจารณาอิเล็กตรอนว่ามีลักษณะทรงกลมที่มีประจุกระจายอยู่บนผิวการหมุนของประจุจะทำให้เกิดวงปิดของกระแสขนาดเล็กจำนวนมากดังรูปที่ 2.2 แต่ละวงปิดจะทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่มีทิศทางเดียวกันกับแกน หมุนแต่ถ้าเราคำนวณผลรวมทั้งหมดทุกวงปิด โมเมนต์ที่ได้จะเป็นค่าตอบที่ไม่ถูกต้องคือได้ $5\mu_B / 6$ แทนที่จะได้ μ_B ทั้งนี้เนื่องจากสมมติฐานได้สมมติให้ประจุมีการกระจายสม่ำเสมอแต่ความเป็นจริงเราไม่ทราบทั้งรูปร่างและการกระจายของประจุบนอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 แสดงการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน

2.2 โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอม.

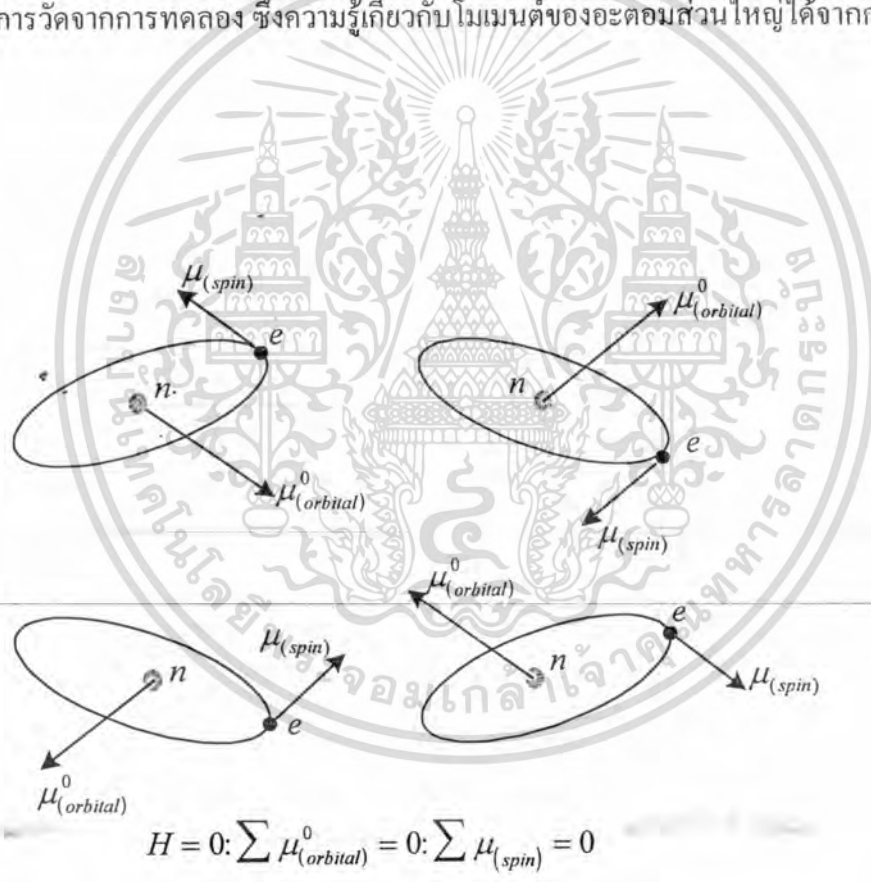
อะตอมจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากที่มีการสปินรอบแกนและการเคลื่อนที่เป็นวงโคจร โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แต่ละแบบจะเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกับแกนสปินและตั้งฉากกับระนาบของวงโคจรตามลำดับ โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมก็คือผลรวมแบบเวกเตอร์ทั้งหมดของ โมเมนต์เนื่องจากประจุไฟฟ้าทั้งหมดและสิ่งที่เกิดขึ้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

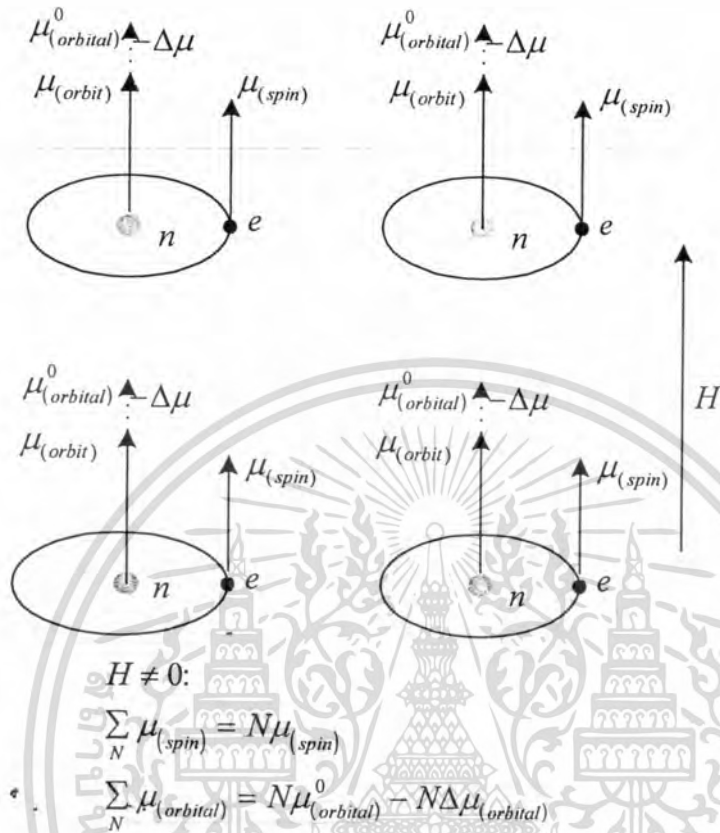
1. โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนทั้งหมดในกรณีที่มีการวางตัวของโมเมนต์เกิดการหักล้างกันหมดจะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กจากอิเล็กตรอนเหลืออยู่ ซึ่งเป็นเงื่อนไขของสารไดอะแมกเนติก

2. ถ้าการหักล้างกันของโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากประจุเกิดขึ้นบางส่วนทำให้อะตอมจะมีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิ เนื่องจากสารประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากที่มีสมบัติอย่างนี้ซึ่งจะแสดงสมบัติทางแม่เหล็กเป็นพารา , เฟอร์โร , แอนติเฟอร์โรและเฟอร์ริแมกเนติก

การคำนวณค่าโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนทั้งหมดของแต่ละอะตอมเป็นปัญหาที่ซับซ้อนยุ่งยากมากทีเดียวและการคำนวณเพื่อที่จะให้ได้ค่าที่ถูกต้องนั้นยังเป็นไปไม่ได้แต่ค่าที่ได้นั้นเป็นค่าที่ได้โดยการวัดจากการทดลอง ซึ่งความรู้เกี่ยวกับ โมเมนต์ของอะตอมส่วนใหญ่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.3 (ก) แสดงโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมอิสระ



รูปที่ 2.3 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมอิสระในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม H

เมื่อ

n -นิวเคลียสของอะตอม

e -อิเล็กตรอน

N -จำนวนอะตอมต่อหน่วยปริมาตร

$\mu_{(spin)}$ -โมเมนต์แม่เหล็กของเนื่องจากสปินอิเล็กตรอนอิสระ

$\mu_{(orbital)}^0$ -โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนอิสระ

$\mu_{(orbital)}$ -โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็ก H

$\Delta\mu_{(orbital)}$ -โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากการโคจรของอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูก

เหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก H

2.3 พฤติกรรมของสารเมื่อมีสนามแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กก็คือการเกิดโมเมนต์แม่เหล็ก โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำให้วัสดุแสดงความเป็นแม่เหล็กโดยวัดในเทอมของค่าแมกเนไตเซชันหรือค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร

$$M = \frac{\mu}{V} \quad \text{emu/cm}^3 \quad (2.9)$$

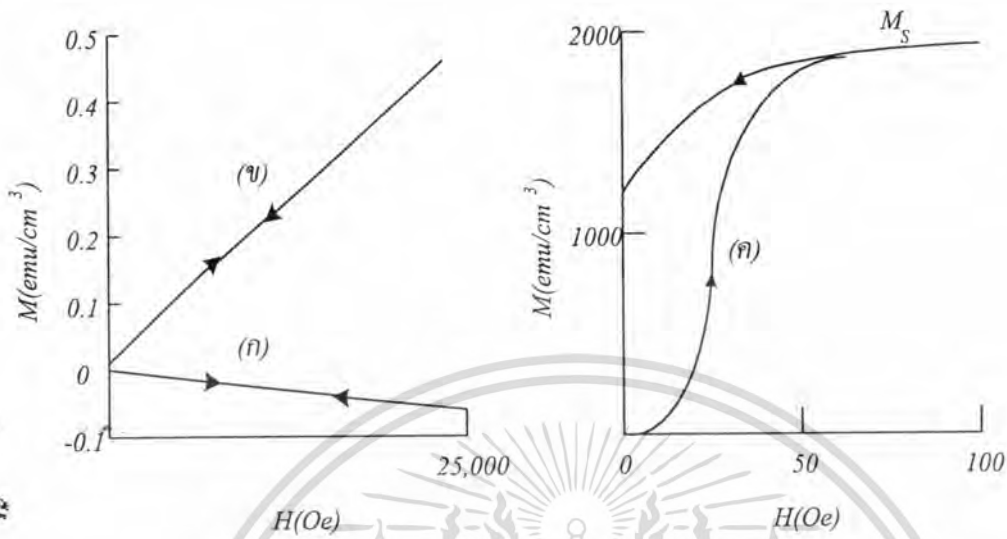
สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุไม่เพียงแต่จะบอกด้วยขนาดและเครื่องหมาย M เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการบอกด้วยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า M กับ H โดยอัตราส่วนของ 2 ปริมาณนี้เรียกว่า Susceptibility (κ) โดยที่

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad \text{emu/cm}^3 \cdot \text{Oe} \quad (2.10)$$

เนื่องจาก M คือค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น κ จึงหมายถึงปริมาณที่มีหน่วยเป็นปริมาตร และในบางครั้งเรียกว่าเป็น Volume susceptibility ในการคำนวณค่า Susceptibility จะนิยามดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \chi &= \kappa / \rho && \text{mass susceptibility (emu/g Oe) โดยที่ } \rho \text{ คือความหนาแน่น} \\ \chi_A &= \chi / A && \text{atomic susceptibility (emu/g atom Oe) โดยที่ } A \text{ คือน้ำหนักอะตอม} \\ \chi_M &= \chi / M' && \text{molecular susceptibility (emu/g mol Oe) โดยที่ } M' \text{ คือน้ำหนักโมเลกุล} \end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.10) ทำให้เราสามารถบอกถึงสมบัติทางแม่เหล็กของสารต่างๆ ได้โดยการนำสารนั้นไปวางในสนามแม่เหล็กแล้วพิจารณาการแมกเนไตเซชันซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟการแมกเนไทเซชัน

จากรูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง M กับ H เรียกว่ากราฟการแมกเนไทเซชัน ของสารชนิดต่าง ๆ โดยกราฟตามเส้น (ก) และ (ข) เป็นกราฟของสารที่มีค่า Volume susceptibility ระหว่าง -2×10^{-6} และ $+20 \times 10^{-6}$ ตามลำดับ โดยที่สารจำพวกนี้จะมีสมบัติเป็นสาร ไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก หรือสารแอนติเฟอร์โร เส้นกราฟ M, H เป็นเชิงเส้นภายใต้สภาวะปกติ กล่าวคือ ไม่มีความเป็นแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วนเส้นกราฟ (ค) เป็นกราฟของสารเฟอร์โรแมกเนติก หรือ เฟอร์รีแมกเนติก ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันมากเพราะเป็นเส้นกราฟที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งค่า κ จะแปรตามค่าสนามแม่เหล็ก H และเมื่อผ่านไปยังค่าสูงสุดประมาณ 40 Oe จากรูปที่แสดง จะเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างขึ้นคือ

1. เกิดสถานะอิ่มตัวเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็ก H มากเพียงพอ ทำให้ค่าแมกเนไทเซชันมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง (มีค่าเท่ากับ M_s)

2. Hysteresis หรือ irreversibility หลังจากสถานะอิ่มตัวและลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H จนกระทั่งเป็นศูนย์ จะไม่ได้ทำให้ค่า M ลดลงเป็นศูนย์ด้วยปรากฏการณ์นี้จะเกิดกับสารจำพวก เฟอร์โรแมกเนติก และ เฟอร์รีแมกเนติก ซึ่งสารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นแม่เหล็กถาวรได้

สิ่งที่น่าสนใจในการเปลี่ยนแปลงของ M กับ H ก็คือทำให้สามารถหาค่าซัสเซพทิบิลิตีได้ โดยตรงซึ่งค่าซัสเซพทิบิลิตีนี้เป็นค่าที่ใช้ในการแบ่งแยกชนิดของสารได้ อีกค่าหนึ่งที่น่าสนใจก็คือ

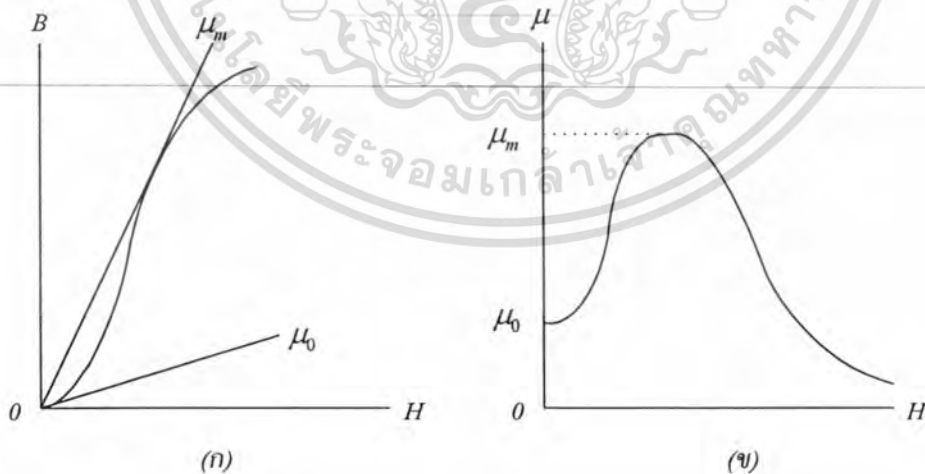
ค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H จากกราฟแมกเนไตเซชัน โดยอัตราส่วนของ B กับ H เรียกว่าค่าเพอร์มิอะบิลิตี (Permeability) μ : นั่นคือ

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.11)$$

เนื่องจาก $B = H + 4\pi M$ จะได้

$$\begin{aligned} B/H &= 1 + 4\pi(M/H) \\ \mu &= 1 + 4\pi\kappa \end{aligned} \quad (2.12)$$

ค่า μ ไม่ใช่ค่าความชัน dB/dH ของกราฟ B, H แต่จะเป็นความชันของเส้นกราฟในตอนเริ่มต้นไปยังจุดสำคัญบนกราฟ 2 ค่า คือค่าเพอร์มิอะบิลิตีตอนเริ่มต้นคือ μ_0 และค่าเพอร์มิอะบิลิตีสูงสุดคือ μ_m ดังแสดงตามรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่าง μ กับ H ในสารจำพวกเฟอร์ริแมกเนติก *



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง μ กับ H ในสารจำพวก เฟอร์ริแมกเนติก

ดังนั้นในการพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุจะพิจารณาถึงลักษณะพฤติกรรมทางแม่เหล็กของสารแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากค่า κ และ μ คือ

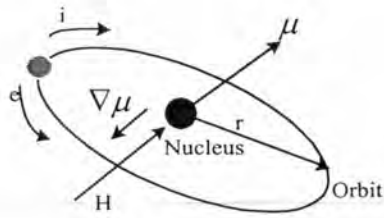
1. ในอากาศค่า $\kappa = 0$ เนื่องจากไม่มีวัสดุที่ถูกแมกเนไทเซชันและ $\mu = 1$
2. ในสารจำพวก ไดอะแมกเนติกค่า κ จะมีค่าน้อยและเป็นลบ ค่า μ มีค่าน้อยกว่า 1
3. ในสารจำพวก พาราแมกเนติกและ แอนติเฟอร์โรแมกเนติก ค่า κ มีค่าน้อยและเป็นบวกและ μ มีค่ามากกว่า 1 เล็กน้อย
4. ในสารจำพวก เฟอร์โรแมกเนติก และ เฟอร์ริแมกเนติก ค่า κ และค่า μ จะมีค่ามากและค่าทั้งสองจะเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.4 สารไดอะแมกเนติก

ไดอะแมกเนติกหมายถึง สารที่มีค่าซเซพิบิลิตีและค่าเพอร์มิอิตีวิตีน้อยกว่า 1 กล่าวคือ โมเมนต์แม่เหล็กลัพธ์ของอะตอมเป็นศูนย์และ โมเมนต์แม่เหล็กเหนี่ยวนำจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกพิจารณากรณีที่ให้สนามแม่เหล็กแก่อิเล็กตรอนที่กำลังเคลื่อนที่ดังรูปที่ (2.6) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเหมือนกับการไหลของกระแสในวงปิดและเมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากศูนย์การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ที่ผ่านวงปิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า \mathcal{E} ในวงปิดตามกฎของฟาราเดย์คือ

$$\mathcal{E} = -10^{-8} \frac{d\phi}{dt} = \frac{-10^{-8} d(HA)}{dt} \quad \text{volts} \quad (2.13)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ของวงปิดส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นตัวชี้บอกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นปริมาณที่ตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) การโคจรของอิเล็กตรอนไม่ได้สมมุติว่าเป็นกระแสไหลในวงจรปิดตามกฎของฟาราเดย์เท่านั้น หากแต่ได้สมมุติว่ากระแสไหลในลวดตัวนำที่ไม่มีค่าความต้านทาน แรงเคลื่อนไฟฟ้า \mathcal{E} ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสและ \mathcal{E} มีค่าเป็นอนันต์ในขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กเปลี่ยนจากศูนย์เป็น H แต่ผลแบบนี้ไม่ได้เกิดขึ้นทุกขณะ โมเมนต์แม่เหล็กจะลดลงเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 2.6 แสดงผลของสนามแม่เหล็กต่อวงโคจรของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 2.6 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาทำให้กระแสที่เกิดขึ้นมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทิศทางของ โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอก สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ โมเมนต์แม่เหล็กเปลี่ยนไป $\Delta\mu$ ในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก ในทำนองเดียวกันถ้าจินตนาการว่ามีวงโคจรของอิเล็กตรอนอีกวงหนึ่งในทิศทางตามเข็มนาฬิกาโดยมีระนาบขนานกับวงปีดวงแรกกระแสก็จะทวนเข็มนาฬิกา โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอกดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กจากทั้งสองวงโคจรจะหักล้างกันพอดี แต่ทั้งสองวงโคจรจะทำให้เกิด โมเมนต์แม่เหล็กที่ตรงกันข้ามเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกในทำนองเดียวกัน โมเมนต์เนื่องจากอิเล็กตรอนทั้งหมดในอะตอมที่วางตัวต่างกัน ในสเปซจะหักล้างกันพอดีและแต่ละวงโคจรจะสร้าง โมเมนต์ขึ้นมาเพื่อด้านสนามแม่เหล็กภายนอก(ทิศทางตรงกันข้าม)

เราสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่า โมเมนต์แม่เหล็กของวงโคจรได้ถ้า E เป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้ารอบ ๆ วงโคจรที่มีความยาว l แล้ว

$$E = \frac{\mathcal{E}}{l} = \frac{-10^{-8} A dH}{l dt} = \frac{-10^{-8} \pi \cdot r^2 dH}{2\pi \cdot r dt} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{-10^{-8} r dH}{2 dt} \quad \text{Volts/cm} \quad (2.15)$$

แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเนื่องจากสนามคือ

$$F = 10^8 E(e/c) = ma \quad \text{dynes} \quad (2.16)$$

$$\text{จะได้ค่าความเร่ง } a = \frac{dv}{dt} = 10^8 \frac{E_e}{mc} = \frac{-er dH}{2mc dt} \quad \text{cm/sec}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ให้แก่วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนจากศูนย์เป็น H หากสมมติว่ารัศมีวงโคจรไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะได้ว่า

$$\int_{v_1}^{v_2} dv = -\frac{er}{2mc} \int_0^H dH$$

$$v_2 - v_1 = \Delta v = -\frac{erH}{2mc} \quad \text{cm/sec} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของอิเล็กตรอนจะทำให้โมเมนตัมแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงด้วย

$$\Delta\mu = \frac{er\Delta v}{2c} = -\frac{e^2 r^2 H}{4mc^2} \quad \text{erg/Oe} \quad (2.18)$$

ค่าที่ได้ตามสมการที่ (2.18) เป็นค่าที่ได้ตามเงื่อนไขที่ว่าสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ในกรณีต่างๆ ไปจะทำงานแตกต่างกันไป ดังนั้นค่า r ในสมการที่ (2.18) จะเป็นเงาของรัศมี R บนระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กดังรูปที่ (2.6) รัศมี R ของวงโคจรที่ทำมุม θ กับสนามตั้งนั้นค่าจึงต้องเป็นค่า r^2 เฉลี่ยของทั้งหมดที่เป็นไปได้จะได้ว่า

$$\langle r^2 \rangle = \langle R^2 \sin^2 \theta \rangle = \left(R^2 \int \sin^2 \theta dA \right) / A \quad (2.19)$$

$$dA = 2\pi R^2 \sin \theta d\theta$$

$$\langle r^2 \rangle = \left[R^2 \int_0^{\pi/2} \langle \sin^2 \theta \rangle (2\pi R^2 \sin \theta d\theta) \right] / 2\pi R^2$$

$$\langle r^2 \rangle = \frac{2R^2}{3}$$

แทนค่า $\langle r^2 \rangle$ ลงในสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$\Delta\mu = -\frac{e^2\langle R^2\rangle H}{6mc^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ R เป็นรัศมีของวงโคจรที่เป็นไปได้ ส่วนในกรณีของอะตอมที่ประกอบด้วย Z อิเล็กตรอนค่า $\Delta\mu$ จะเป็นผลรวมของ Z เทอมซึ่งจะได้

$$\Delta\mu_{(\text{per atom})} = -\frac{e^2 H}{6mc^2} \sum R_n^2 \quad (2.21)$$

เมื่อ R_n เป็นรัศมีวงโคจรที่ n ค่า $\sum R_n^2$ อาจแทนได้ด้วยค่า $Z\langle R^2\rangle$ เมื่อ $\langle R^2\rangle$ เป็นค่าเฉลี่ยของทุก ๆ วงโคจรและถ้า $N\rho/A$ เป็นจำนวนอะตอมต่อหน่วยปริมาตรโดยที่ N เป็นเลขอาโวกาโดร (Avogadro's number) ρ เป็นค่าความหนาแน่น ส่วน A เป็นค่าน้ำหนักอะตอมเขียนได้ว่า

$$\Delta\mu_{(\text{per cm}^3)} = -(N\rho/A) \left(e^2 Z \langle R^2 \rangle / 6mc^2 \right) \quad (2.22)$$

แต่เราได้สมมติว่าแต่ละอะตอมมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กลัพธ์เป็นศูนย์เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ค่าโมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตรที่หาได้ในสมการที่ (2.22) ก็คือ แมกเนโตเซชัน M และจากค่าซัสเซพทิบิลิตี $\kappa = M/H$ จะได้ว่า

$$\kappa = -(N\rho/A) \left(e^2 Z \langle R^2 \rangle / 6mc^2 \right) \text{ emu/cm}^3 \cdot O_e \quad (2.23)$$

หรือ

$$\chi = -(N/A) \left(e^2 Z \langle R^2 \rangle / 6mc^2 \right) \text{ emu/g} \cdot O_e \quad (2.24)$$

2.5 พาราแมกเนติก

ในวัสดุที่มีโมเมนต์ถาวรลัพธ์ การวางตัวจะเป็นไปแบบสุ่ม (random) ทั้งนี้เนื่องจากการถูกระคายด้วยความร้อนทำให้เกิดการสั่นของโครงข่ายของผลึกผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรจากทุกอะตอมจะเป็นศูนย์และไม่มีแมกเนโตเซชันที่เกิดจากโมเมนต์ถาวรแต่เมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปโมเมนต์ถาวรของอะตอมจะพยายามวางตัวให้ขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทั้งนี้เพื่อให้พลังงานศักย์เชิงแม่เหล็กมีค่าน้อย (magnetic potential energy) นอกจากนี้โมเมนต์ถาวรย่อยที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของโมเมนต์แม่เหล็กรวม (โมเมนต์แม่เหล็กของแต่ละอนุภาค) จะมีการส่ายรอบเส้นแรงดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว

การวางตัวของโมเมนต์แม่เหล็กดาวในทิศทางที่ขนานกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแมกเนไตเซชันที่มีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก ถ้า E_p เป็นพลังงานศักย์ทางแม่เหล็กของแต่ละอะตอมที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก μ ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก H แล้ว

$$E_p = -\mu \cdot H = -\mu H \cos\theta \quad (2.25)$$

ค่าในสมการที่ (2.25) คือค่าพลังงานศักย์ทางแม่เหล็ก ในกรณีที่เราได้พิจารณาค่าอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กกับสนามแม่เหล็ก

ถ้าเราพิจารณาว่าวัสดุที่มี n อะตอมต่อหน่วยปริมาตรซึ่งแต่ละอะตอมมีโมเมนต์แม่เหล็ก μ และมีจำนวน dn ที่ทำมุมกับสนามแม่เหล็กภายนอกอยู่ระหว่าง θ ถึง $\theta + d\theta$ สภาวะสมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิ (T) ความน่าจะเป็นที่จะพบอะตอมมีพลังงาน E_p จะมีค่าสอดคล้องกับแฟกเตอร์ของโบลสมาน (Boltzmann factor) $e^{-E_p/KT}$ เมื่อ K เป็นค่าคงที่ของโบลสมานจำนวนของโมเมนต์ที่อยู่ระหว่างมุม θ ถึง $\theta + d\theta$ ที่มีพื้นที่ dA ($dA = 2\pi \sin\theta d\theta$) ซึ่งเป็นพื้นที่ของวงกลมหนึ่งหน่วยจะได้ว่า

$$dn = KdAe^{-E_p/KT} = 2\pi Ke^{(\mu H \cos\theta)/KT} \sin\theta d\theta \quad (2.26)$$

$$\int_0^\pi dn = \int_0^\pi 2\pi Ke^{a \cos\theta} \sin\theta d\theta \quad \text{เมื่อ} \quad a = \mu H / KT \quad (2.27)$$

$$n = 2\pi K \int_0^\pi e^{a \cos\theta} \sin\theta \cdot d\theta \quad (2.28)$$

สมการที่ (2.28) จำนวนโมเมนต์แม่เหล็กรวมทั้งหมดในทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอกต่อหน่วยปริมาตรที่พิจารณาค่าแมกเนไตเซชัน M หาได้จากผลคูณระหว่างจำนวนอะตอม (dn) กับโมเมนต์แม่เหล็กในทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอกจะได้ว่า $\mu \cos\theta$

$$M = \int_0^\pi \mu \cos\theta dn \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.29) จะได้ว่า $M = 2\pi K\mu \int_0^\pi e^{a \cos \theta} \sin \theta \cos \theta d\theta$

$$= \frac{n\mu \int_0^\pi e^{a \cos \theta} \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^\pi e^{a \cos \theta} \sin \theta d\theta} \quad (2.30)$$

เราหาค่าสมการที่ (2.30) ได้โดยให้ $x = \cos \theta$ และ $dx = -\sin \theta d\theta$ จะได้ว่า

$$M = \frac{n\mu \int_{-1}^1 x e^{ax} dx}{\int_{-1}^1 e^{ax} dx}$$

$$M = n\mu \left(\frac{e^a + e^{-a}}{e^a - e^{-a}} - \frac{1}{a} \right) = n\mu \left(\coth a - \frac{1}{a} \right) \quad (2.31)$$

แต่ค่า $n\mu$ เป็นโมเมนต์สูงสุดที่เป็นไปได้ของวัสดุ ถ้าสถานะที่โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมวางตัวขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอกอย่างสมบูรณ์ เราเรียกสถานะนี้ว่าสถานะอิ่มตัว (Saturation) และค่าแมกเนไตเซชันที่สถานะนี้เท่ากับ M_0 จะได้ว่า

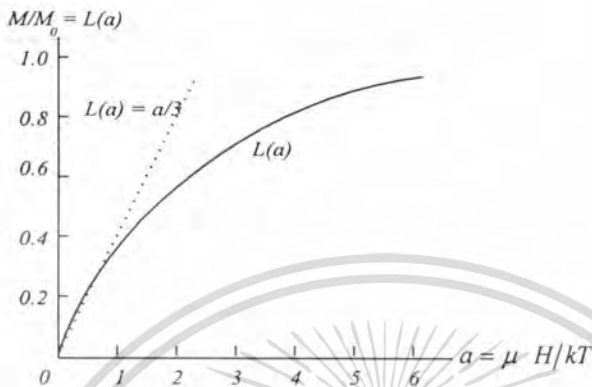
$$\frac{M}{M_0} = \coth a - \frac{1}{a} \quad (2.32)$$

เทอมทางขวามือของสมการที่ (2.32) คือฟังก์ชันลิงก์ซ์ (Langevin function) เขียนแทนด้วย $L(a)$ ซึ่ง

$$L(a) = \frac{a}{3} - \frac{a^3}{45} + \frac{2a^5}{945} \quad (2.33)$$

$L(a)$ เป็นฟังก์ชันคี่ของ a เราสามารถเขียนกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง a กับ $L(a)$ ได้ดังรูปที่ 2.7 จากรูปเมื่อ a มีค่ามากค่า $L(a)$ จะมีค่าเข้าสู่ 1 และที่ a มีค่าน้อย ๆ ค่าความ

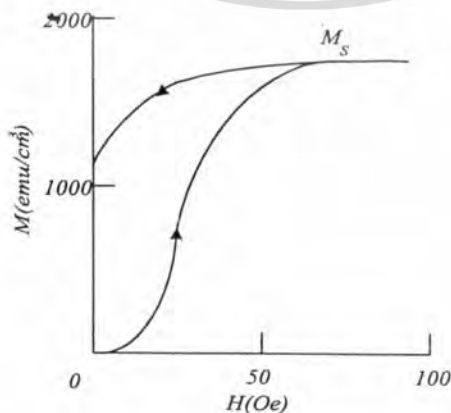
ชันของกราฟจะมีค่า $\frac{1}{3}$ ซึ่งเห็นได้จากสมการที่ (2.33) และเมื่อ a มีค่าน้อยกว่า 0.5 กราฟที่ได้จะเป็นกราฟเส้นตรง



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟของแรงแม่เหล็ก

จากทฤษฎีของลอมแวงจะได้ว่า

1. สภาวะอิ่มตัวจะเกิดขึ้นเมื่อ $(a = \mu H / kT)$ มีค่ามากอย่างเพียงพอ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ้าค่า H มากหรือ T มีค่าน้อยหรือทั้ง 2 เงื่อนไขเกิดขึ้นพร้อมกัน โมเมนต์แม่เหล็กส่วนมากจะวางตัวขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอกความไร้ระเบียบของ โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากความร้อนน้อยลง
2. ที่อุณหภูมิสูงหรือที่ค่าสนามต่ำ (a มีค่าน้อย) แมกเนไตเซชัน M จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับ H โมเมนต์จะวางตัวแบบสุ่ม ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ M, H จะได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟแมกเนไตเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของลองแวงทำให้ได้กฎของคูรี (Curie law) ที่ค่า a มีค่าน้อย $L(a) = a/3$ สมการที่

(2.33) เขียนได้ว่า

$$M = \frac{n\mu a}{3} = \frac{n\mu^2 H}{3kT} \quad (2.34)$$

และ

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} = \frac{M}{\rho H} = \frac{n\mu^2}{3\rho kT} \quad (2.35)$$

แทนค่า n จำนวนอะตอมต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเท่ากับ $N\rho/A$ ดังนั้น

$$\chi = \frac{N\mu^2}{3AkT} = \frac{C}{T} \quad \text{emu/gO}_e \quad (2.36)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ของคูรี (Curie Constant หน่วยต่อกรัม) ซึ่ง

$$C = \frac{N\mu^2}{3Ak} \quad (2.37)$$

ทฤษฎีพาราแมกเนติกของลองแวงทำให้ได้กฎของคูรีที่มาจากข้อสมมติฐานที่ว่า แต่ละอะตอมหรือโมเลกุลจะมีโมเมนต์แม่เหล็กอยู่ (ไม่ทำปฏิกิริยากัน) แต่ทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กภายนอกและอุณหภูมิเท่านั้น สารพาราแมกเนติกจำนวนมากไม่ได้เป็นไปตามกฎนี้แต่จะเป็นไปตามกฎของคูรี-ไวส์ในรูปแบบสมการทั่วไปคือ

$$\chi = C/(T - \theta) \quad (2.38)$$

ลองแวงได้สมมติค่าความเข้มของสนามของโมเลกุลสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแมกเนโตเซชัน

$$H_m = \gamma M \quad (2.39)$$

เมื่อ γ เป็นค่าคงที่สนาม โมเลกุล สนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อกันในวัสดุคือ

$$H_t = H + H_m \quad (2.40)$$

จากกฎของคูรีเขียนได้ว่า

$$\chi = M / \rho \cdot H = C / T \quad (2.41)$$

แทนค่า H ด้วย H_t จะได้

$$\frac{M}{\rho(H + \gamma M)} = \frac{C}{T} \quad \text{และ} \quad M = \frac{\rho C H}{T - \rho C \gamma} \quad (2.42)$$

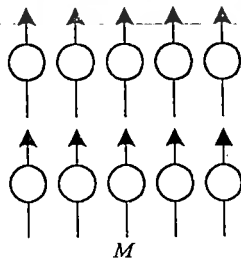
จะได้ว่า

$$\chi = \frac{M}{\rho H} = \frac{C}{T - \rho \cdot C \gamma} = \frac{C}{T - \theta} \quad (2.43)$$

เมื่อ $\theta = C\gamma$ สำหรับสารที่เป็นไปตามกฎของคูรีค่า $\theta = \gamma = 0$

2.6 สารเฟอร์โรแมกเนติก

เฟอร์โรแมกเนติกเป็นสารที่มีลักษณะของแม่เหล็กธรรมชาติกล่าวคือมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรถึงแม้ไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกก็ตามหรือกล่าวได้ว่าอะตอมแต่ละตัวมีโมเมนต์แม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากันและวางตัวในทิศทางเดียวกัน



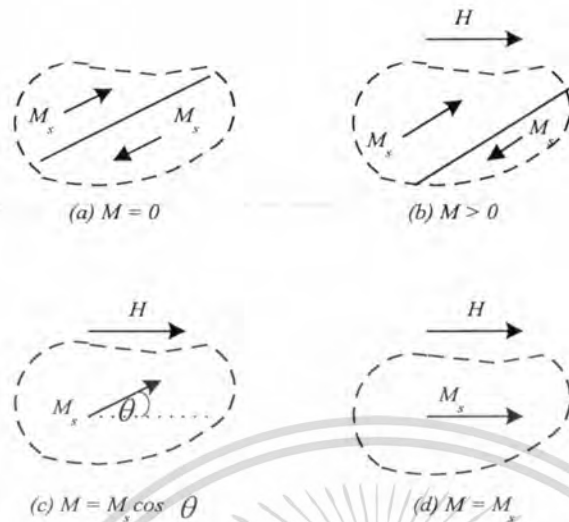
รูปที่ 2.9 แสดงการวางตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติก

ถ้าสถานะอิมตัวของสารเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าแมกเนไตเซชัน M_s ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกเราจะได้ค่า $M = 0$ ถึง M_s ส่วนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้เกิดการอิมตัวนั้น ไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเฟอร์โรแมกเนติก อย่างเช่นผลึกเดี่ยวของเหล็กบริสุทธิ์สามารถเหนี่ยวนำให้อิมตัวได้ที่ค่าความเข้มประมาณ $50 O_e$ ซึ่งแต่ละลูกบาศก์เซนติเมตร จะมีโมเมนต์แม่เหล็กประมาณ $1,700 \text{ emu}$ และที่ค่าความเข้มสนามเดียวกันสารพาราแมกเนติกจะมีค่าแมกเนไตเซชันประมาณ 10^{-3} emu/cm^3

จากกฎของคูรี-ไวส์ได้ว่า $\chi = C/(T - \theta)$ ที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องของสารพาราแมกเนติกเห็นได้ว่า θ สัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเข้มสนามโมเลกุล H_m เพราะว่า $\theta = \rho \gamma C$ และ $H_m = \gamma M$ เมื่อ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสนามโมเลกุลถ้า θ มีค่าบวกความหมายก็คือว่า H_m และ M มีทิศทางเดียวกันหรือสนามโมเลกุลจะเสริมกันกับสนามภายนอกในการแมกเนไตเซชันของเฟอร์โรแมกเนติก

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) สารเฟอร์โรแมกเนติกจะเปลี่ยนเป็นสภาวะพาราแมกเนติกและจะมีค่าชัสมหัพทบัญญัติ ตามกฎของคูรี-ไวส์ ค่า θ จะประมาณได้เท่ากับค่า T_c ค่า θ มีค่ามาก (มากกว่า $1,000 \text{ K}$ สำหรับเหล็ก) ค่า χ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิเข้าใกล้ค่า T_c ซึ่งบอกถึงสภาวะเป็นเฟอร์โรแมกเนติกและในช่วง $T < T_c$ แมกเนไตเซชันจะอิมตัวและมีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ $T = 0 \text{ K}$ ดังนั้นในขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลงไปเรื่อยๆ จะเกิดไดโพลเพิ่มขึ้นในทิศทางของแมกเนไตเซชันภายในสาร

เฟอร์โรแมกเนติกอาจแบ่งออกเป็นเขตแม่เหล็ก (magnetic domain) ซึ่งแต่ละโดเมนมีแมกเนไตเซชันที่เกิดขึ้นเองในทิศทางต่าง ๆ และมีค่าอิมตัว M_s เนื่องจากมีทิศทางต่างกันจึงทำให้แมกเนไตเซชันสุทธิเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก การมีสภาวะแม่เหล็ก (magnetism) เกิดขึ้นเองก็คือการที่โมเมนต์แม่เหล็กภายในเขตแม่เหล็กเรียงตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ส่วนที่อุณหภูมิสูง ๆ แมกเนไตเซชันจะถูกทำลายไป สภาวะเฟอร์โรแมกเนติกจะเปลี่ยนเป็นพาราแมกเนติก การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นตรงจุดคูรี

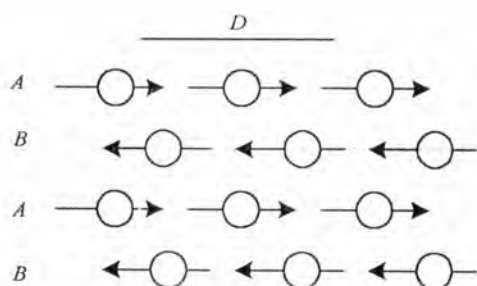


รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดแมกเนโตเซชันในสารเฟอร์โรแมกเนติก

จากรูปที่ 2.10(a) เส้นที่แบ่งเราเรียกว่าผนังโดเมน (Domain wall) 2 โดเมนที่มีสถานะเป็นแม่เหล็กจะมีทิศทางที่ต่างกันทำให้แมกเนโตเซชันของผลึกนี้เท่ากับศูนย์ ส่วนในรูป (b) แสดงให้เห็นถึงการขยายของผนังโดเมนเมื่อป้อนค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปของแมกเนโตเซชันที่อยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ส่วนในรูป (c) แสดงถึงการหมุนของแมกเนโตเซชันให้มีทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กภายนอกและ (D) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดเกิดขึ้น ถ้าแมกเนโตเซชันมีทิศทางเดียวกับ M_s

2.7 สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

สารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เป็นสารที่โมเมนต์แม่เหล็กที่อยู่ติดกันวางตัวสวนทิศทางกัน ซึ่งแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.11 และอาจพิจารณาได้ว่าสารที่แสดงภาวะแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ประกอบด้วยโครงสร้างของสารเฟอร์โรแมกเนติก 2 โครงสร้างย่อย โดยที่แค่โครงสร้างย่อยจะมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กและแสดงอำนาจแม่เหล็กขึ้นมาเองแต่โครงข่ายทั้งสองแมกเนโตในทิศทางตรงกันข้ามกัน



รูปที่ 2.11 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กและ โครงข่ายย่อยของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

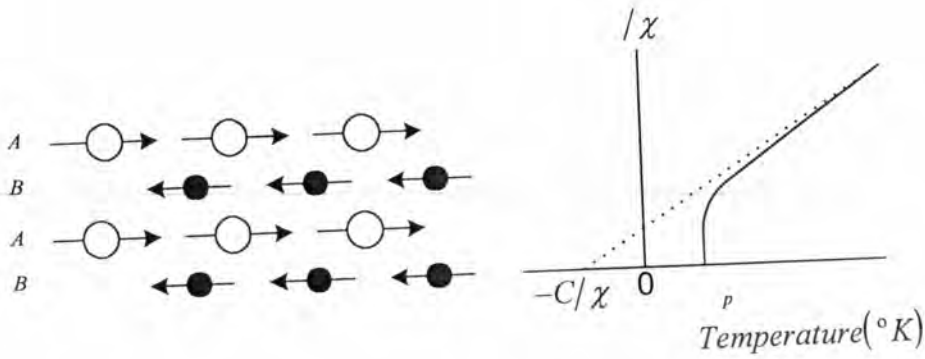
ค่า susceptibility ของสารประเภทนี้จะมีค่าเป็นบวกเล็กน้อยที่ทุก ๆ อุณหภูมิแต่จะแปรค่าตามค่าอุณหภูมิ ซึ่งภาวะแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะเกิดภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิเนล (Neel's Temperature) T_N สารจะมีสมบัติเป็นสารพาราแมกเนติกเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_N ปกติแล้วอุณหภูมินี้นี้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิห้องมาก ดังนั้น การวัดค่า susceptibility จึงต้องทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าห้อง เพราะที่อุณหภูมิห้องสารจะแสดงภาวะพาราแมกเนติกในการวิจัยนี้เป็นเพียงการวิจัยพื้นฐานจึงไม่ได้ทำการวัดค่า susceptibility ของสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า susceptibility กับอุณหภูมิก็เป็นไปตามสมการของคูรี - ไวส์ หากแต่ค่า θ จะมีค่าเป็นลบเท่านั้น

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T + \theta}{C}$$

หรือ
$$\chi = \frac{C}{T + \theta} = \frac{C}{T - (-\theta)} \quad (2.46)$$

2.8 สารเฟอร์ริแมกเนติก

สารเฟอร์ริแมกเนติกเป็นสารที่ประกอบด้วย โครงข่ายย่อย 2 โครงข่ายซึ่งแสดงอำนาจขึ้นเองแต่แมกเนไตในทิศทางตรงกันข้าม เช่นเดียวกับกับสารแอนติเฟอร์โรแมกเนติกแต่โมเมนต์แม่เหล็กที่โครงข่ายย่อยทั้งสองมีขนาดไม่เท่ากันจึงมีค่าแมกเนไตสุทธิในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง



รูปที่ 2.12 แสดงโมเมนต์แม่เหล็กของสารเฟอร์ริแมกเนติก

สารเฟอร์ริแมกเนติกส่วนใหญ่เป็นพวกเฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นผลึกของออกไซด์แม่เหล็กที่มีสูตรเคมี $M\text{OFe}_2\text{O}_3$ เมื่อ M เป็นพวกโลหะต่าง ๆ สารเฟอร์ไรต์มีมากมายหลายชนิด ได้แก่ NiOFe_2O_3 , ZnOFe_2O_3 , MgOFe_2O_3 เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของสารพวกนี้จะประกอบด้วย 2 ด้านคือ ด้าน A (tetrahedral) และด้าน B (octahedral) ซึ่งเรียกโครงสร้างนี้ว่า "normal spinel" ดังนั้นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนทั้งหมดคือ AA , AB และ BB และถ้าจำนวนไอออนแม่เหล็กของแต่ละโครงข่ายมีจำนวน n ไอออนต่อหน่วยปริมาตรโดยที่แต่ละไอออนมีโมเมนต์แม่เหล็ก μ_A และ μ_B ($\mu_A \neq \mu_B$) แมกเนไตเซชันของโครงข่ายย่อย A และ B คือ

$$M_A = \lambda n \mu_A \quad (2.45)$$

หรือ $M_A = \lambda M_a$ เมื่อ $M_a = n \mu_A$ และ $M_B = \nu n \mu_b$

โดยที่ λ เป็นแฟกเตอร์เนื่องจากตำแหน่งของโครงข่ายย่อย A และ $\nu (= 1 - \lambda)$ เป็นแฟกเตอร์เนื่องจากตำแหน่งของโครงข่ายย่อย B แมกเนไตเซชันรวมทั้งหมดคือ

$$M = M_A + M_B = \lambda M_a + \nu M_b \quad (2.46)$$

สนามโมเลกุลที่กระทำบนโครงข่ายย่อย A และ B คือ

$$H_{mA} = -\gamma_{AB} M_B + \gamma_{AA} M_A \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{mB} = -\gamma_{AB} M_A + \gamma_{BB} M_B \quad (2.48)$$

เครื่องหมาย (-) ของค่าสัมประสิทธิ์สนามโมเมนต์ (γ) เนื่องจากว่าโมเมนต์แม่เหล็กของโครงข่าย
 ย่อย A และ B สวนทิศทางการกัน และเนื่องจาก γ_{AA} และ γ_{BB} มีค่าไม่เท่ากันเขียนในเทอม γ_{AB} ได้โดย
 ให้ $\alpha = \frac{\gamma_{AA}}{\gamma_{AB}}$ และ $\beta = \frac{\gamma_{BB}}{\gamma_{AB}}$ ค่าสนามโมเมนต์เขียนใหม่ได้ว่า

$$H_{mA} = \gamma_{AB} (\alpha \lambda M_a - \nu M_b) \quad (2.49)$$

$$H_{mB} = \gamma_{AB} (\beta \nu M_b - \lambda M_a) \quad (2.50)$$

สมการทั้งสองนี้สามารถใช้ได้ทั้งอุณหภูมิสูงและต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โดยในบริเวณพาราแมกเนติก
 จะมีพฤติกรรมตามกฎคูรีคือ

$$MT = \rho CH_i$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่น H_i เป็นค่าสนามรวมระหว่างสนามภายนอกและสนามโมเมนต์เมื่อ
 พิจารณาทั้งสองโครงสร้างย่อยจะได้ว่า

$$M_a T = \rho C (H + H_{mA})$$

$$M_b T = \rho C (H + H_{mB})$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่คูรีต่อกรัมของไอออนแม่เหล็ก จากสมการข้างต้นสามารถหาค่าชั๊สเซพติบิลิตีได้
 คือ

$$\chi = \left(\frac{M}{\rho H} \right) = \frac{CT - \gamma_{AB} \rho C^2 \lambda \nu (2 + \alpha + \beta)}{T^2 - \gamma_{AB} \rho C T (\alpha \lambda + \beta \nu) + \gamma_{AB}^2 \rho^2 C^2 \lambda \gamma (\alpha \beta - 1)} \quad (2.51)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T}{C} + \frac{1}{\chi_0} - \frac{b}{T - \theta}$$

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T + (C/\chi_0)}{C} - \frac{b}{T - \theta} \quad (2.52)$$

เมื่อ

$$\frac{1}{\chi_0} = \gamma_{AB} \rho (2\lambda v - \alpha \lambda^2 - \beta v^2)$$

$$b = \gamma_{AB}^2 \rho^2 C \lambda v [\lambda(1 + \alpha) - v(1 + \beta)]^2$$

และ

$$\theta = \gamma_{AB} \rho C \lambda v (2 + \alpha + \beta)$$

สมการที่ (2.52) เป็นสมการของกราฟพาราโบลา แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 เส้นกราฟตัดแกน
 "อุณหภูมิที่ θ_p ซึ่งก็คือจุดคูร์ ที่อุณหภูมิสูงเทอมสุดท้ายของสมการจะมีค่าน้อยมาก สมการจะลดรูป
 และเป็นไปตามกฎของคูร์คือ

$$\chi = \frac{C}{T + (C/\chi_0)} \quad (2.53)$$

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

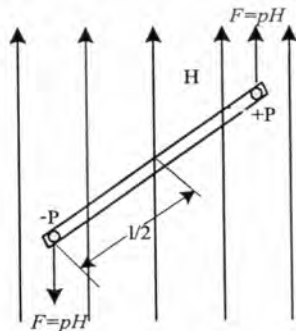
3.1 หลักการพื้นฐานของการวัดค่าพีเอชเซพติบิลิตี

ในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กและสมบัติทางแม่เหล็กของสาร โดยพิจารณาสมบัตินั้นทำได้โดยการนำสารแม่เหล็กไปวาง ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กและได้พิจารณาในระดับอนุภาคแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมทางแม่เหล็กซึ่งจะนำไปสู่การวัดค่าพีเอชเซพติบิลิตี ทั้งนี้เนื่องจากว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้วัตถุมีการแมกเนไตส์และเกิดเป็นขั้วแม่เหล็ก (*pole*) 2 ขั้วขึ้นในวัตถุนั้น และขั้วแม่เหล็กจะสร้างสนามขึ้นมารอบ ๆ และสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงบนขั้ว แรงที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของความแรงของขั้วกับความแรงของสนาม H ตามสมการ

$$F = pH \quad (3.1)$$

เมื่อ p เป็นค่าความแรงขั้ว (1 หน่วยความแรงขั้วหมายถึงขนาดของขั้วที่อยู่ห่างกัน 1 cm มีแรงกระทำต่อกันขนาด 1 dyne)

H เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 3.1 แสดงการเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบของแท่งแม่เหล็กที่วางอยู่ในสนามที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาแท่งแม่เหล็กที่มีความแรงขั้ว p วางห่างกันเป็นระยะทาง l โดยสมมติว่า แท่งแม่เหล็กวางในแนวทำมุม θ กับสนามภายนอก H จะมีแรงกระทำต่อแท่งแม่เหล็ก เพื่อที่จะหมุนให้แท่งแม่เหล็กขนานกับสนามจะได้โมเมนต์ของแรงคู่ควบ คือ

$$(pH \sin \theta)(l/2) + (pH \sin \theta)(l/2) = pHl \sin \theta \quad (3.2)$$

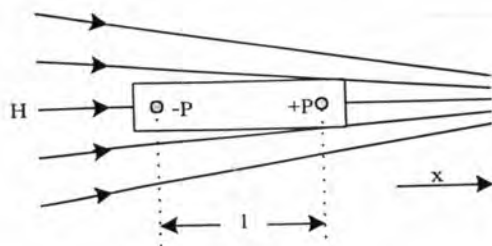
ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็ก $H = 1 \text{ Oe}$ และ $\theta = 90^\circ$ ค่าโมเมนต์แม่เหล็กจะมีค่าตามสมการ

$$\mu = pl \quad (3.3)$$

ในกรณีวางวัสดุแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งอาจเตรียมได้โดยใช้เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็กจะหมุนจนกระทั่งแกนตามยาวจะขนานกับสนามแม่เหล็กภายนอก และที่แต่ละด้านของวัสดุจะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มไม่เท่ากันและมีขั้วตรงกันข้าม ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มจากซ้ายไปขวา ดังรูปที่ 3.2 วัสดุที่มีค่าสหเสถียรบิลิตีมากเช่น สารพาราแมกเนติก ความแรงของขั้ว จะขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเพราะว่าสนามแม่เหล็กที่ขั้วเหนือแรงกว่าสนามแม่เหล็กที่ขั้วใต้ ดังนั้นแรงสุทธิที่กระทำในทางขวามือจะมีค่า

$$F_x = -pH + p \left(H + l \frac{dH}{dx} \right) \quad (3.4)$$

$$F_x = pl \frac{dH}{dx} = \mu \frac{dH}{dx} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.2 แสดงวัสดุแม่เหล็กวางในสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

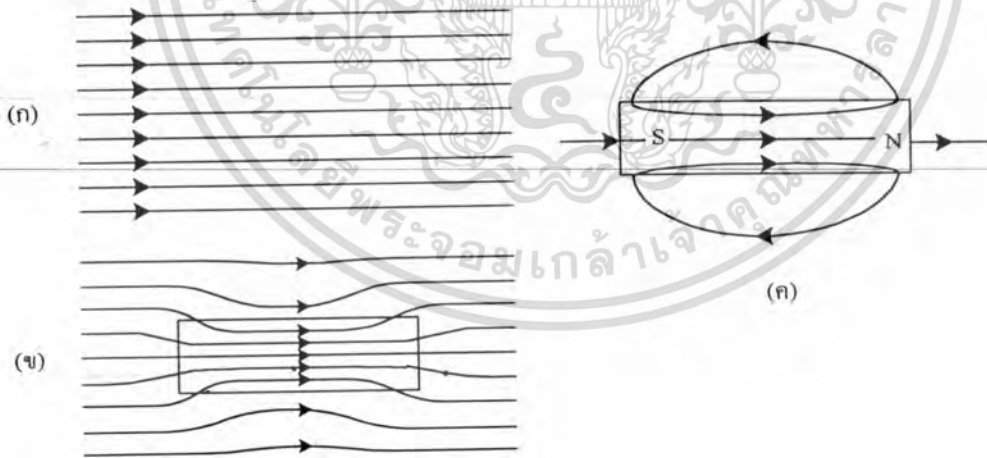
เมื่อ $\mu = pl$ และถ้าแท่งแม่เหล็กมีค่าแมกเนไตเซชัน M (จำนวนโมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร) ซึ่ง $M = \frac{\mu}{v}$ จะได้ว่า

$$F_x = Mv \frac{dH}{dx} \quad (3.6)$$

และจากสมการที่ (2.10) จะได้ว่า

$$F_x = \kappa v H \cdot \frac{dH}{dx} = \frac{\kappa v}{2} \frac{dH^2}{dx} \quad (3.7)$$

เมื่อ v เป็นปริมาตรของวัสดุ วัสดุจะเคลื่อนที่จากทางซ้ายมือไปทางขวามือ นั่นคือไปสู่บริเวณที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าหรือกล่าวได้ว่าวัสดุจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เพิ่มจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านตัวมัน อย่างเช่นเมื่อนำวัสดุมาวางในสนามที่มีค่าความเข้มสม่ำเสมอ จะเกิดเส้นแรงในวัสดุ โดยที่เส้นแรงจะพยายามพุ่งผ่านวัสดุแสดงได้ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอและสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านวัสดุที่มีค่า $\mu > 1$

และถ้าวัสดุที่นำไปวางเป็นสารจำพวกไดอะแมกเนติก ค่าซัสเซพติบิลิตีมีค่าเป็นลบ ขั้วในสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะกลับกันและทิศทางของแรงก็จะกลับกันด้วย โดยวัสดุจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มี

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นสารจำพวกไดอะแมกเนติกจะถูกผลักโดยสนามและ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางตัวของวัสดุพาราแมกเนติกหรือวัสดุไดอาแมกเนติกในสนามจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของสนาม ถ้าสนามแม่เหล็กมีความเข้มสม่ำเสมอเท่าทั้งสองจะวางตัวขนานกับสนามการวางตัวของวัสดุทั้งสองในสนามจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 แท่งพาราแมกเนติกจะวางตัวขนานกับสนามส่วนแท่งไดอาแมกเนติกจะวางตัวตั้งฉากกับสนาม ซึ่งได้พบปรากฏการณ์นี้โดยฟาราเดย์ สนามที่มีรูปร่างดังรูปจะเกิดขึ้นระหว่างปลายขั้วแม่เหล็กที่ปิดทำมุมเท่านั้น



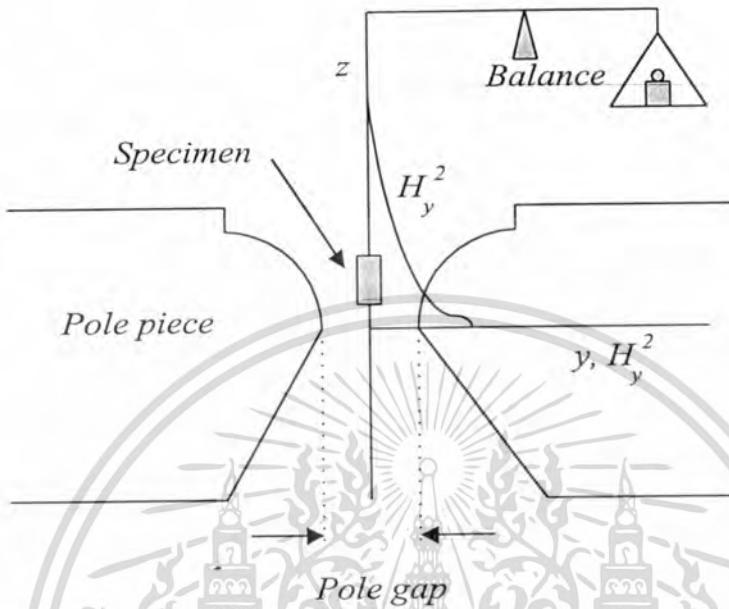
รูปที่ 3.4 แสดงการวางตำแหน่งของแท่งไดอาแมกเนติกและพาราแมกเนติก

การปิดมุมขั้วแม่เหล็กนั้นมีความสำคัญมาก ต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เพราะค่า แรงที่กระทำต่อสารตัวอย่าง ในสมการที่ (2.7) นั้นขึ้นอยู่กับค่า เกรเดียนท์ของสนาม ซึ่งการออกแบบเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่าความเข้มสนามและเกรเดียนท์ตามความต้องการนั้นจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

3.2 การวัดค่าซัสเซพติบิลิตีโดยวิธีการของฟาราเดย์

จากความสัมพันธ์เบื้องต้นค่าแรงตามสมการ (3.7) จะแปรผันโดยตรงกับค่าซัสเซพติบิลิตี ดังนั้นถ้ากำหนดให้ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับค่าเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ การวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กและซัสเซพติบิลิตีตามวิธีการของฟาราเดย์นั้นเป็นการวัดแรงแม่เหล็กที่กระทำกับสารตัวอย่าง ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีค่า ผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับค่าเกรเดียนท์ ($H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$) ของสนามคงที่สม่ำเสมอ แรงแม่เหล็กที่กระทำกับสารตัวอย่างจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของสารตัวอย่าง การวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กและค่าซัสเซพติบิลิตี โดยวิธีของฟาราเดย์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงการวัดค่าโมเมนต์แม่เหล็กและซัสเซพติบิลิตีตามวิธีของฟาราเดย์

สารตัวอย่างจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่เป็นกระเปาะซึ่งมีสมบัติเป็น สาร ไดอะแมกเนติก อย่างอ่อน เช่นทองแดง ทองคำ และเขวอนอยู่ที่กึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กทั้งสอง ดังรูป

H_y เป็นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

$\frac{\partial H_y}{\partial z}$ เป็นค่าเกรเดียนท์ของสนาม

m_1 เป็นมวลของสารตัวอย่าง

m_2 เป็นมวลของภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง

μ เป็นค่าโมเมนต์แม่เหล็กของสารตัวอย่าง

g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

χ เป็นค่าซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่าง

เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำกับสารตัวอย่าง น้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อสาร ตัวอย่าง ก็จะมีเฉพาะแรง F_g^0 (แรงโน้มถ่วงของโลก) มีค่าเท่ากับ $m_2 g$ และค่าน้ำหนักที่อ่านได้ ของเครื่องชั่งน้ำหนัก คือ

$$F_g^0 = (m_1 + m_2)g \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นน้ำหนักของสารตัวอย่างและภาชนะบรรจุ

ถ้าให้สนามแม่เหล็กกระทำกับสารตัวอย่างโดยกำหนดให้มีทิศทาง y อย่างเดียวมีความเข้ม H_y โดยที่ $H_x = H_z = 0$ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามทิศทาง y มีค่าเกือบคงที่ในระหว่างขั้วแม่เหล็ก และค่าเกรเดียนท์ทิศทาง z ของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าเกรเดียนท์ในทิศทางอื่นๆของสนามแม่เหล็กมากกล่าวคือ $\frac{\partial H_y}{\partial y} \ll \frac{\partial H_y}{\partial z}$ และ $\frac{\partial H_y}{\partial x} \ll \frac{\partial H_y}{\partial z}$ ดังนั้นเมื่อแขวนสารตัวอย่างอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กจะเกิดการเหนี่ยวนำกับสนามแม่เหล็ก H_y ทำให้เกิดแรงที่กระทำกับสารตัวอย่างคือ

$$\vec{F} = \nabla(\mu\vec{H}) \quad (3.9)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.10)$$

$$\vec{F} = \hat{i} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \hat{j} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \hat{k} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (3.11)$$

และแยกพิจารณาแต่ละองค์ประกอบได้ว่า

$$F_x = \left(\mu \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \mu_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial H_y}{\partial x} + \mu_z \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.12)$$

$$F_y = \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu_x \frac{\partial H_x}{\partial y} + \mu_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3.13)$$

$$F_z = \left(\mu \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \mu_x \frac{\partial H_x}{\partial z} + \mu_y \frac{\partial H_y}{\partial z} + \mu_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \quad (3.14)$$

จากรูปที่ (3.5) สนามแม่เหล็กพุ่งเข้าทางแกน y มีค่าความเข้ม H_y องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กทางด้าน H_x และ H_z มีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้ $\frac{\partial H_x}{\partial x} \approx \frac{\partial H_z}{\partial z} \approx 0$

$$\text{และค่า } \frac{\partial H_y}{\partial x} \ll \frac{\partial H_y}{\partial z}, \frac{\partial H_y}{\partial y} \ll \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.15)$$

แรงที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะองค์ประกอบทางแกน z เท่านั้นซึ่ง

$$F_z = \frac{\mu_y \partial H_y}{\partial z} \quad (3.16)$$

แทนค่า $\mu = m\chi H_y$ จะได้

$$F_z = m\chi H_y \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.17)$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์แม่เหล็กและซัสเซพติบิลิตี สามารถคำนวณได้จากแรงที่กระทำกับสารตัวอย่าง ตามสมการที่ (3.17)

3.3 การคำนวณค่าโมเมนต์แม่เหล็กและซัสเซพติบิลิตี

ค่าแรงในสมการที่ (3.17) เป็นค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับสนามแม่เหล็กซึ่งมีผลให้ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องชั่งลดลง น้ำหนักที่อ่านได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กคือ

$$F_g^1 = (m_1 + m_2)g - (m_1\chi_1 + m_2\chi_2) \frac{H_y \partial H_y}{\partial z} \quad (3.18)$$

เทอม $m_2\chi_2 H_y \partial H_y / \partial z$ เป็นเทอมของค่าแรงอันเนื่องมาจากภาชนะบรรจุสารตัวอย่างซึ่งวัสดุที่นำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่มีสมบัติเป็นสารไดอะแมกเนติก เช่น ทองคำ ทองแดง ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกับภาชนะบรรจุสารตัวอย่างมีค่าน้อยหรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($m_2\chi_2 H_y \partial H_y / \partial z \cong 0$) ดังนั้นเมื่อไม่พิจารณาเทอมของแรงที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากภาชนะบรรจุ น้ำหนักที่อ่านได้ก็คือ

$$F_g^1 = (m_1 + m_2)g - m_1\chi_1 \frac{H_y \partial H_y}{\partial z} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.19) น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปคือ

$$F_g^0 - F_g^1 = (m_1 + m_2)g - (m_1 + m_2)g + m_1 \chi_1 \frac{H_y \partial H_y}{\partial z} \quad (3.20)$$

$$\Delta F = m_1 \chi_1 \frac{H_y \partial H_y}{\partial z} = \mu_1 \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.21)$$

จะได้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของสารตัวอย่างคือ

$$\mu_1 = \Delta F \frac{\partial z}{\partial H_y} = \frac{\Delta F}{\frac{\partial H_y}{\partial z}} \quad (3.22)$$

และค่าซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่างคือ

$$\chi_1 = \frac{\Delta F}{m_1 H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}} \quad (3.23)$$

ค่า m_1 และ ΔF สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องชั่ง และผลคูณระหว่างค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก (H_y) กับค่าเกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) นั้นเป็นค่าคงที่ของแต่ละเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ออกแบบสร้างขึ้น เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.23) จะได้ค่าซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่างตามความต้องการ ในกรณีที่สารตัวอย่างมีสมบัติเป็นสารไดอะแมกเนติก สมการที่ (3.23) จะมีเครื่องหมายเป็นลบทั้งนี้เนื่องจากค่าโมเมนต์ของสารไดอะแมกเนติก มีค่าเป็นลบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งเมื่อมีค่าความเข้มข้น จะมีค่าน้อยกว่าตอนที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับศูนย์

บทที่ 4

เครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีและการสอบเทียบ

สิ่งที่ต้องพิจารณาถึงในการสร้างเครื่องวัดค่าซัสเซพติบิลิตีเป็นประเด็นแรกก็คือช่วงของการวัดตั้งที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะต้องวัดได้กับสารแม่เหล็กชนิดโคบอลต์ และ พารา ซึ่งค่าซัสเซพติบิลิตีของสารแม่เหล็กทั้งสองชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าซัสเซพติบิลิตีของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ

ชนิดวัสดุแม่เหล็ก		ซัสเซพติบิลิตี (χ) (emu/gOe)
สาร โคบอลต์แมกเนติก		-10^{-8} ถึง -10^{-5}
สารแม่เหล็กอ่อน	พาราแมกเนติก	10^{-8} ถึง 10^{-5}
	แอนติเฟอร์โรแมกเนติก	
	เมตต้าแมกเนติก	
สารเฟอร์โรแมกเนติก	พาราซีติกเฟอร์โรแมกเนติก	ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก
	เฟอร์โรแมกเนติก	
	เฟอร์โรแมกเนติก	

ตารางที่ 4.2 ค่าซัสเซพติบิลิตีของธาตุที่เป็นสาร โคบอลต์แมกเนติกและพาราแมกเนติกบางชนิด

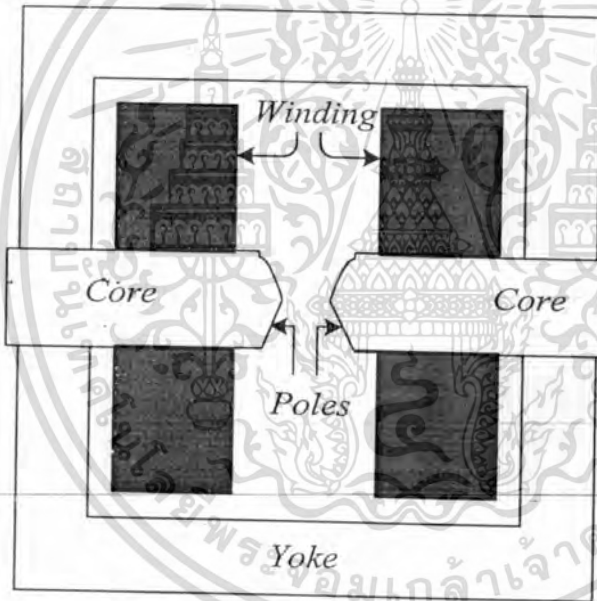
ธาตุโคบอลต์แมกเนติก	ซัสเซพติบิลิตี $x \times 10^{-6} (emu/gOe)$	ธาตุพาราแมกเนติก	ซัสเซพติบิลิตี $x \times 10^{-6} (emu/gOe)$
Cd	-0.176	Al	0.612
Cu	-0.086	Ca	0.998
Ag	-0.201	O	107.788
Sn	-0.312	Pt	1.035
Zn	-0.174	Ti	3.194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าสารที่มีสมบัติเป็นไดอะแมกเนติก ค่าซัสเซพทิบิลิตีจะอยู่ในช่วง $\approx -10^{-6} \text{ emu/gO}_e$ และพาราแมกเนติกจะอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-2} emu/gO_e ดังนั้นในการสร้างเครื่องมือครั้งนี้ได้กำหนดช่วงการวัดไว้ในช่วง $10^{-6} - 0.1 \text{ emu/gO}_e$ โดยให้มีความไว (sensitivity) 10^{-6} emu/gO_e ปริมาตรใช้งาน (บริเวณที่ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ คงที่) 1 cm^3 เป็นอย่างน้อย

เครื่องมือวัดประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและเครื่องชั่งละเอียด เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดวงปิดของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านแกน (Core) เข้าสู่โยค (Yoke) ส่วนประกอบของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 4.1



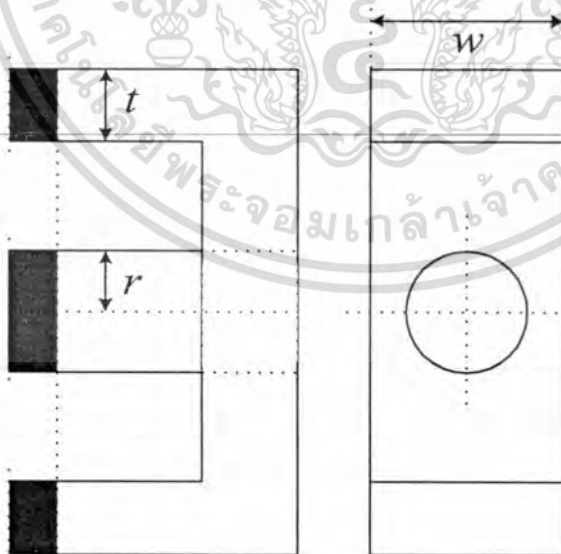
รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กและส่วนประกอบที่สร้างขึ้น

การใช้งานหรือปริมาตรที่ต้องการก็คือระยะระหว่างขั้วที่ให้ค่า $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่จึงได้ออกแบบให้สามารถปรับระยะระหว่างขั้วได้ 0 - 10 เซนติเมตร โดยที่โยคเป็นแบบโยคคู่ (ตัว C ประกอบ) ทั้งนี้ก็เพื่อให้การส่งผ่าน เส้นแรงแม่เหล็กเป็นไปอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งสามารถทำให้ปรับเปลี่ยนหรือปรับระยะระหว่างขั้วได้โดยสะดวกและเนื่องจากต้องการให้ปริมาตร ใช้งานมีปริมาตรมากแกนของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่มากตามปริมาตรที่ต้องการ แต่การสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กในครั้งนี้มีจุดประสงค์ที่จะใช้วัสดุที่หาซื้อได้ง่าย มีราคาไม่แพงมากนัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะเป็นวัสดุที่ผลิตภายในประเทศทำให้เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีข้อจำกัดพอสมควรซึ่งได้แก่ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนแม่เหล็กมีขนาด 10.2 cm. ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็กเหนียวใหญ่สุดที่หาซื้อได้ อีกประการหนึ่งคือข้อจำกัดของเหล็กที่ทำ โยค เนื่องจากความหนาของเหล็กแผ่นที่หาซื้อได้มีความหนาขนาด 15 cm. เท่านั้น ดังนั้นการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่หาซื้อได้แต่ทั้งนี้จะต้องไม่ขัดแย้งกับทฤษฎีและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

4.1 โยค

ในการสร้างเครื่องมือกำเนิดสนามแม่เหล็ก โยคที่ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมและส่งผ่านเส้นแรงแม่เหล็กคุณภาพความแรงของสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทางเลือกวัสดุที่ทำเป็นโยคและการออกแบบให้เหมาะสม ดังนั้น โยคจึงเป็นองค์ประกอบหลักที่ต้องพิจารณาถึง ถ้าพิจารณาว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่มีการสูญหายและฟลักซ์แม่เหล็กจากแกนแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปสู่โยคจะถูกจำกัดโดยโยคทำให้เกิดความต้านทานการรวบรวมเส้นแรงแม่เหล็ก (reluctance)



รูปที่ 4.2 ขนาดของโยคและแกนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $B_c = \Phi/A_c$ เป็นความหนาแน่นฟลักซ์ที่ผ่านแกนแม่เหล็ก A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กเพื่อที่จะส่งผ่านเข้าสู่โยค และถ้า $B_y = \Phi/A_y$ เป็นความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านโยคและ A_y เป็นพื้นที่หน้าตัดของโยค จะได้อัตราส่วนของพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนแม่เหล็กกับโยค คือ^[1]

$$m = A_y/A_c \quad (4.1)$$

ในทางปฏิบัติฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนอาจสูญหายไปกล่าวคือแกนแม่เหล็กทรงกระบอกที่สถานะอิ่มตัวความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B_c และความหนาแน่นของฟลักซ์ที่ผ่านโยค B_y พบว่าค่าอัตราส่วนจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ($0 < m \leq 2$)

จากรูปที่ 4.2 พื้นที่ภาคตัดขวางของโยคและแกนมีค่า A_y และ A_c ตามลำดับ จะได้ว่า

$$A_y = 2Wt \quad \text{และ} \quad A_c = \pi r^2$$

$$m = 2Wt/\pi r^2 \quad (4.2)$$

ดังนั้น

ถ้า t_0 เป็นความหนาแน่นต่ำสุดและ W_0 เป็นค่าความกว้างที่มากที่สุด ฟลักซ์ที่ผ่านแกนคือ

$$\Phi = B_c \pi r^2 \quad (4.3)$$

ฟลักซ์ที่ผ่านแกนและเข้าสู่โยคได้ความหนาแน่นของฟลักซ์ B_y หากเส้นแรงแม่เหล็กไม่มีการสูญหายแล้วจะได้ว่า

$$\Phi = B_y 2\pi r t_0 \quad (4.4)$$

เทอม $2\pi r t_0$ คือพื้นที่แกนแม่เหล็กที่สัมผัสกับโยคจากสมการที่ (4.3) และ (4.4) ในกรณีที่พิจารณาว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่มีการสูญหายจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = B_c / B_y \quad (4.5)$$

$$B_c \pi r^2 = B_y 2\pi r t_0$$

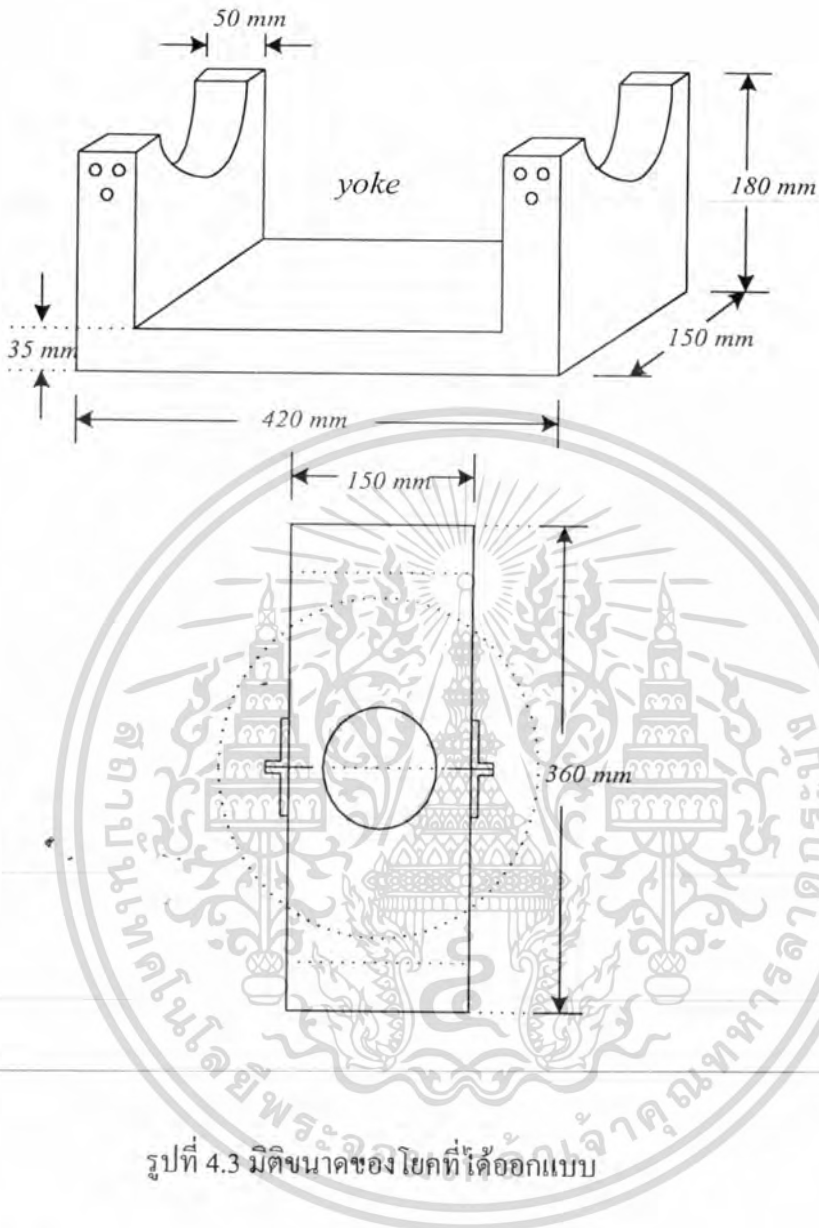
$$t_0 = \frac{mr}{2} \quad (4.6)$$

เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่าน โยคมีค่าไม่เกินค่า B_y ได้ว่า

$$B_y 2W_0 t_0 = B_y 2\pi r t_0$$

และ $W_0 = \pi r \quad (4.7)$

ค่า t_0 และค่า W_0 เป็นความหนาแน่นต่ำสุดและความกว้างที่มากที่สุดของโยคเนื่องจากขนาดของแกน (r) และความกว้างของ โยค (w) ถูกจำกัดด้วยวัสดุที่หาได้คือ วัสดุของแกนแม่เหล็กมีขนาด 5.10 cm และความกว้างของ โยค 15.0 cm และถ้าเลือก $m = 1$ จะได้ค่าความหนา (t_0) ที่สอดคล้องกับสมการ (4.1) เท่ากับ 2.7 cm และหากพิจารณาว่า เส้นแรงแม่เหล็กน่าจะมีการสูญเสียบ้างบางส่วน ถ้าต้องการให้ฟลักซ์ที่ผ่าน โยคมีค่ามากขึ้นความหนาของ โยคจึงควรมากกว่า 2.7 cm ในที่นี้เลือกให้ความหนา 3.5 cm และอัตราส่วนของพื้นที่เท่ากับ 1.28 แต่เนื่องจากได้ออกแบบ โยคเป็นแบบตัว C ประกอบจึงต้องเสียพื้นที่บางส่วนเพื่อติดตั้งอุปกรณ์จับยึดดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียฟลักซ์แม่เหล็กได้เพิ่มความหนาของ โยคในส่วนนี้เป็น 5.0 cm ซึ่งขนาดของ โยคแสดงดังรูปที่ 4.3



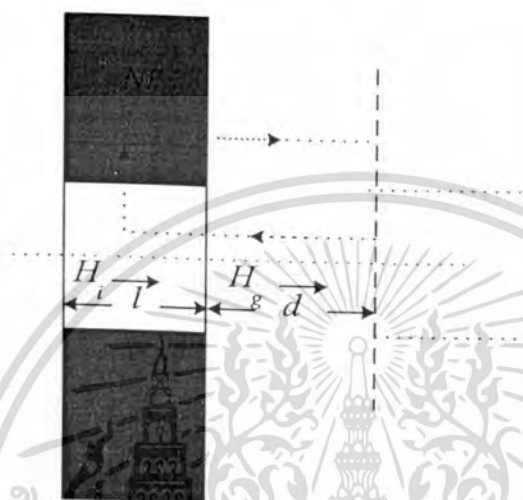
รูปที่ 4.3 มิติขนาดของ โยคที่ได้ออกแบบ

4.2 แกนแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพราะว่าแกนแม่เหล็กจะมีผลโดยตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เหล็กอ่อนที่มี มหณ อง ธาตุคาร์บอนต่ำ ได้แก่เหล็กประเภทเพลลาขาวหรือแกนที่หล่อโดยควบคุมปริมาณของธาตุคาร์บอน จากการพิจารณาการนำเอาสนามแม่เหล็กที่กำเนิดไปใช้งานจะพบว่าต้องการสนามแม่เหล็กสถิตมากกว่าต้องการสนามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงสามารถเลือกเหล็กชนิดที่ไม่มีข้อจำกัดมากนักในด้านสนามตกค้างในแกนแม่เหล็ก ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกเหล็กเพลลาขาวหรือเหล็กอ่อน แต่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดเรื่องขนาดเพราะในท้องตลาดไม่มีขนาดต่างๆตามที่ต้องการจึงได้เลือกและออกแบบขนาดของเหล็กที่หาซื้อได้



รูปที่ 4.4 การเกิดสนามในแกนแม่เหล็กรูปทรงกระบอกเนื่องจากขดลวด

จากสมการของ แมกเวลล์

$$\text{div}B = 0$$

$$\text{Curl}H = 0.4\pi Ni$$

สมการแรกของแมกเวลล์นั้นบอกว่าฟลักซ์ที่เข้าสู่ปริมาตรใดๆเท่ากับฟลักซ์ที่พุ่งออกปริมาตรนั้นหรือกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง ส่วนสมการที่สองบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างลูปกระแสกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive) m.m.f.

ในวงจรแม่เหล็กปิดดังรูปที่ 4.4 จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อขดลวดมีกระแส i

$$\oint H \cdot dl = \frac{4\pi Ni}{10} = 0.4\pi Ni \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ H เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เฮอร์สเทท (Oe)

N เป็นจำนวนลูปกระแสหรือจำนวนรอบของขดลวด

i เป็นกระแสที่ในแต่ละลูปมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

Ni เป็นกระแสรวมทั้งหมดหาได้โดยการคูณจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดกับ

กระแสแต่ละขด ส่วนแฟคเตอร์ 10 ในสมการที่ (4.8) เป็นแฟคเตอร์ที่ได้จากหน่วยทางแม่เหล็กไฟฟ้าของกระแส (electromagnetic unit) มีค่า 10 A ค่า $\int H dl$ เรียกว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก และจากวงจรนี้องค์ประกอบของวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนของแกนแม่เหล็กและช่องว่างสมการที่ (4.8) เขียนได้ว่า

$$\int_0^l H_i dl + H_g d = 0.4\pi Ni \quad (4.9)$$

$$H_i l + H_g d = 0.4\pi Ni \quad (4.10)$$

เมื่อ H_i เป็นค่าความเข้มสนามภายในแกนแม่เหล็ก

H_g เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็ก

l ความยาวของแกนแม่เหล็กบริเวณที่พันด้วยขดลวด

d ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก

จากความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H คือ $B = H + 4\pi M$ เมื่อ M เป็นค่าแมกเนโตเซชันแทนค่า H_i ในสมการที่ (4.9) ด้วย $B - 4\pi M$ จะได้ว่า

$$(B - 4\pi M)l + H_g d = 0.4\pi Ni$$

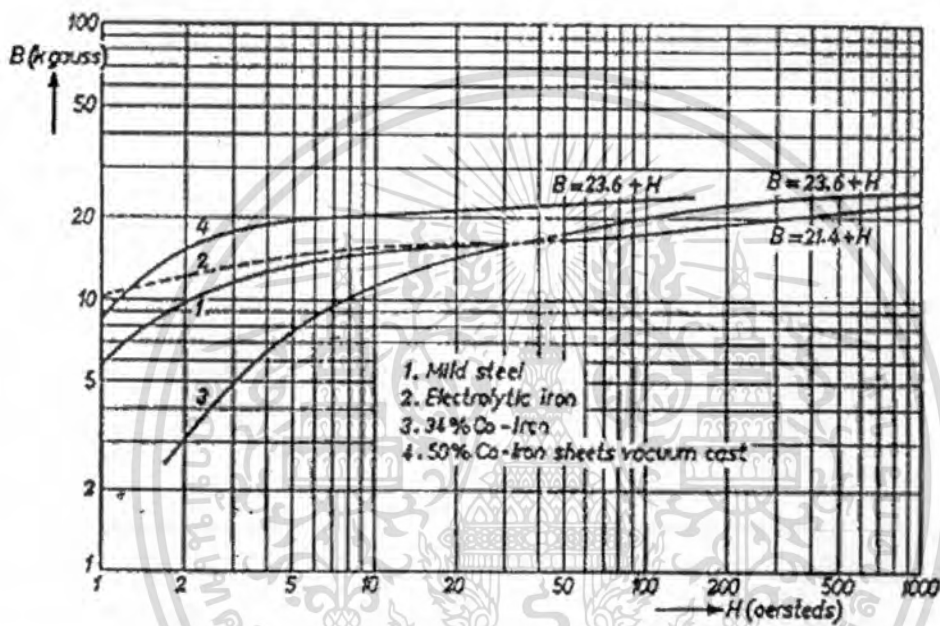
$$\text{หรือ} \quad H_g d = 0.4\pi Ni - B_r l + 4\pi M l \quad (4.11)$$

ถ้า (B_r) เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกน และ M_0 เป็นค่าแมกเนโตเซชันของแกนเหล็กที่สภาวะอิ่มตัวจะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างระหว่างขั้วคือ

$$H_g = \frac{0.4\pi Ni}{d} - \frac{B_r l}{d} + \frac{4\pi M_0 l}{d} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

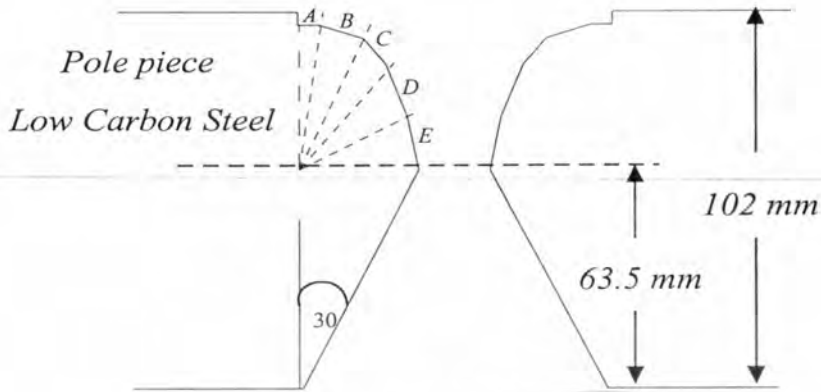
สมการที่ (4.12) ทำให้พิจารณาได้ว่าการเลือกวัสดุนำมาทำเป็นแกนแม่เหล็กจะต้องหาวัสดุที่มีค่า $4\pi M_0$ มากและ (B_r) จะต้องมีค่าน้อย เพื่อให้จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วสูง ค่า $4\pi M_0$ จะขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H กับ $4\pi M_0$ ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟฮิสเทอรีซิสลูปของวัสดุต่างๆ ที่แสดงค่า $(4\pi M_0)$ และ (B_r) สนามแม่เหล็กคงค้าง และแรงที่ใช้ในการลบล้างสนามแม่เหล็กคงค้าง รวมทั้งสภาพความซาบซึ่มได้ของสาร



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุทำแกนแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

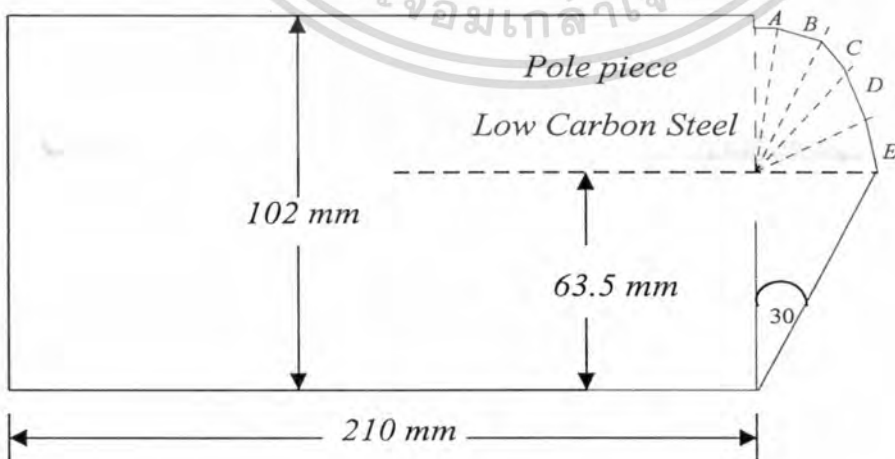
จากสมการที่ (4.12) อาจกล่าวได้ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก $0.4\pi Ni$ ที่ส่งฟลักซ์แม่เหล็กเข้าสู่แกนและผ่านช่องว่างกว้าง d ถ้าแกนแม่เหล็กไม่มีความต้านการรวมเส้นแรงแม่เหล็ก ($B_r = 0$) แล้วจะพิจารณาได้ว่า $H_g = 0.4\pi Ni/d$ ใช้ค่านี้นี้ประมาณค่าต่างๆ ได้ และจากจุดประสงค์ที่ต้องการของการสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กก็เพื่อต้องการใช้งาน บริเวณระหว่างขั้วที่ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ คงที่ ดังนั้นปลายขั้วของแกนแม่เหล็กจะต้องทำให้มีรูปแบบที่ให้ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ มีค่าคงที่และมีปริมาณเพียงพอต่อการใช้งาน โดยได้ใช้รูปแบบของแกนแม่เหล็กดังรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าเป็นรูปที่ให้ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ มีค่าคงที่มีปริมาณเพียงพอต่อการใช้งาน ส่วนมิติที่แท้จริงสำหรับแบบแกนแม่เหล็กที่ได้สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.7^[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบ	มุมกับแนวระดับ(องศา)	ความยาว(มิลลิเมตร)
A	84.5	7.5
B	73.5	14.3
C	51.0	8.7
D	28.0	10.3
E	13.0	12.3

รูปที่ 4.6 ลักษณะของขั้วแม่เหล็กที่ทำให้เกิดเกรเดียนท์



รูปที่ 4.7 มิติขนาดของแกนแม่เหล็กที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงอื่นเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขดลวดและการพันขดลวด

ขดลวดเป็นปัจจัยหลักอีกอย่างหนึ่งในการสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กเพราะจะทำหน้าที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในขดลวดและจากที่ได้กล่าวไว้ในตอนพิจารณาเลือกแกนแม่เหล็กแล้วว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยประมาณที่บริเวณช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กมีค่าตามสมการ

$$H_g = \frac{0.4\pi Ni}{d} \quad (4.13)$$

จะพบได้ว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H_g) ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด (N) และกระแส (i) ที่ไหลผ่านขดลวด ดังนั้นในการออกแบบได้พิจารณาถึงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการใช้และขนาดของขดลวดที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของขดลวดที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.8 ขดลวดมีความกว้าง l รัศมีภายใน r_0 และรัศมีภายนอก r_1 ถ้ากำหนดให้

L เป็นค่าความยาวของลวดตัวนำทั้งหมดที่ใช้ทำขดลวด

S เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของลวด

N เป็นจำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด

f เป็นค่าสเปซแฟกเตอร์ (Space factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของปริมาตรของลวดตัวนำกับปริมาตรของขดลวด ดังนั้น f เป็นปริมาณที่มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ปริมาตรของขดลวดตัวนำของขดลวดตามรูปที่ 4.8 คือ

$$LS = f\pi(r_1^2 - r_0^2) \quad (4.14)$$

และพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวนำที่กระแสไหลผ่านหรือพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดตัวนำทุกรอบรวมกันซึ่งก็คือพื้นที่ของสี่เหลี่ยมที่กว้าง l ยาว $(r_1 - r_0)$ คูณด้วยค่าสเปซแฟกเตอร์ f จะได้ว่า

$$NS = fl(r_1 - r_0) \quad (4.15)$$

ค่าความต้านทานของขดลวดมีค่า R_c โดยที่

$$R_c = \frac{\rho_0 L}{S} \quad (4.16)$$

เมื่อ ρ_0 เป็นค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุตัวนำสำหรับทองแดง $\rho_0 \approx 1.8 \times 10^{-6}$ ถึง $2.0 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (ขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิขณะใช้งาน) ดังนั้นพลังงานสูญเสียในขดลวดเมื่อมีกระแส i คือ

$$\begin{aligned} P &= i^2 R_c \\ &= \rho_0 \frac{i^2 L}{S} \end{aligned} \quad (4.17)$$

ถ้าให้ $Q = Ni$ (จำนวนรอบ-แอมแปร์) ของขดลวดแทนลงในสมการที่ (4.17) เราจะเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{\rho_0 Q^2 LS}{N^2 S^2}$$

$$P = \frac{\rho_0 Q^2 f \pi d (r_1^2 - r_0^2)}{f^2 l^2 (r_1 - r_0)^2}$$

$$P = \frac{\rho_0 Q^2 \pi (r_1 + r_0)}{f l (r_1 - r_0)} \quad (4.18)$$

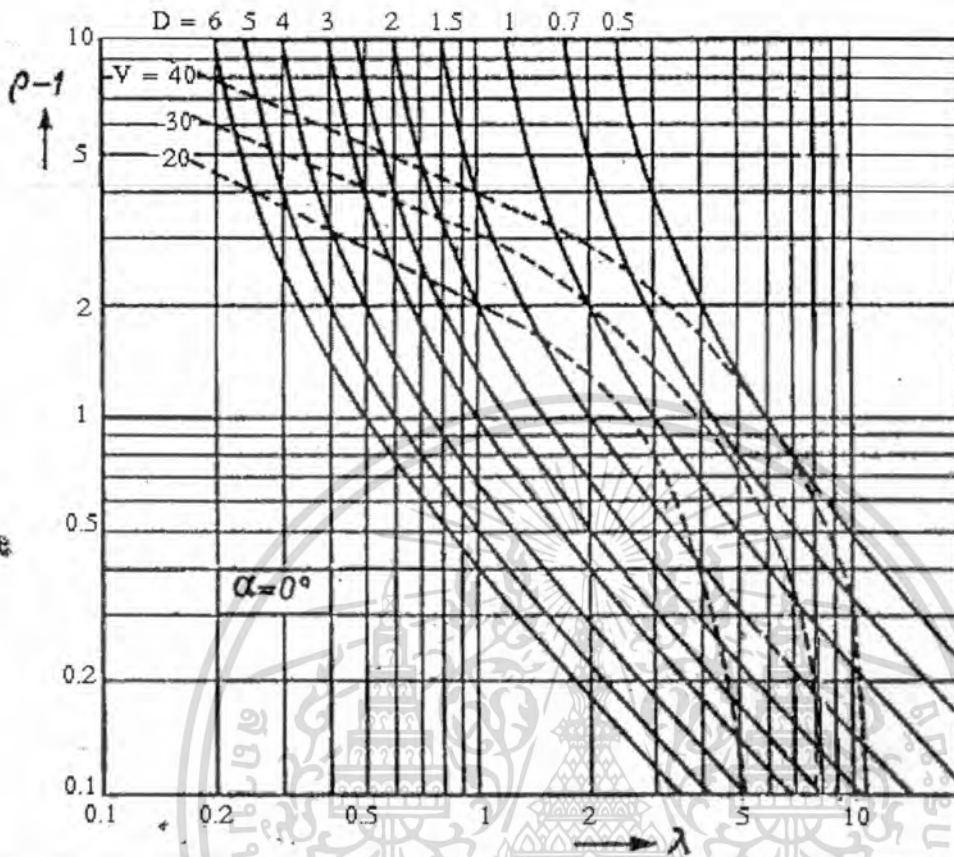
สมการ (4.18) ถ้าแทนค่า $\rho = r_1/r_0$ และ $\lambda = l/r_0$ จะได้ว่า

$$P = \frac{\rho_0 Q^2 \pi (\rho + 1)}{f \lambda r_0 (\rho - 1)} \quad (4.19)$$

หรือ

$$D = \frac{P f r_0}{\rho_0 Q^2 \pi} = \frac{\rho + 1}{\lambda (\rho - 1)} \quad (4.20)$$

D คือค่าสิ่งที่ต้องการภายนอกของขดลวดเช่น กำลัง กระแส (แอมแปร์) จำนวนรอบ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน สเปซแฟกเตอร์ รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำขดลวดซึ่งความสัมพันธ์ของค่า ρ และ λ ที่ค่า D ต่าง ๆ ของขดลวดตามรูปที่ 4.8 แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีภายนอกของขดลวดกับความยาวขดลวด สำหรับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่แกนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นทรงกระบอกรัศมี r_0 ($\rho - 1 = (r_1/r_0) - 1$) กับค่าความยาวของขดลวด $\lambda = l/r_0$)

เนื่องจากมีข้อจำกัดในการเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กกล่าวคือ ขนาดแกนแม่เหล็กมีรัศมี 5.10 cm. ดังนั้นจึงได้เลือกคาร์ซีภายในของขดลวด (r_0) มีค่า 5.20 cm. ทั้งนี้ได้พิจารณาถึงความเหมาะสมความสะดวกในการใช้งานและจากสมการที่ (4.20) ค่า D จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า P และค่า r_0 เพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ค่า r_0 และ f มีค่าคงที่แล้ว ค่า D จะมีค่ามากขึ้นตามกำลังที่สูญเสียของขดลวดและอีกประเด็นหนึ่งที่พิจารณาคือ ค่า λD ต้องมีค่ามากกว่า 1 และหากกำหนด D คงที่ รัศมีภายนอก (r_1) ของขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าค่า λ ลดลง ซึ่งหมายความว่าขดลวดที่สั้นมาก ๆ กำลังที่สูญเสียตามสมการที่ (4.18) จะสูงขึ้น หรือในกรณีแกนแม่เหล็กอิมตัวค่า D จะเพิ่มขึ้นถ้าความยาวของแกนแม่เหล็กลดลง เพราะว่าการปลั๊กซ์แม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ผ่านแกนแม่เหล็ก จึงทำให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหากความยาวแกนแม่เหล็กลดลง

ในการพิจารณาขนาดของขดลวด ๆ ได้เลือกค่า $\lambda = 2$ ซึ่งจะได้ความหนาของขดลวด $l = 10.40$ cm และจากรูปที่ (4.9) ถ้ากำหนดให้ $D = 1$ จะได้ว่า

$$2 = \frac{\rho + 1}{\rho - 1} \quad (4.20)$$

$$\rho = 3$$

จะได้ค่า $r_1 = 3 \times 5.20$ cm

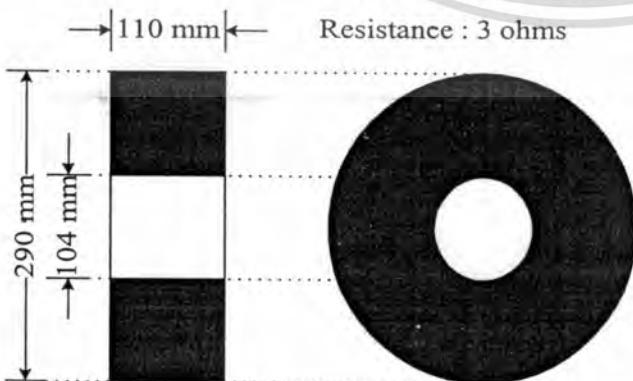
เมื่อกำหนดค่า $r_0 = 5.20$ cm , $\lambda = 2$ และ $D = 1$ จะได้ความยาวของขดลวด $l = 10.40$ cm และ $r_1 = 15.60$ cm (ในการพันขดลวดได้กำหนดให้ $l = 11.00$ cm ทำให้ได้ค่า

$r_1 = 14.48$ cm) และจากพลังงานที่สูญเสียในขดลวดมีค่า $\rho_0 \frac{i^2 L}{S}$ การลดพลังงานที่สูญเสียทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดทองแดงที่ใช้ แต่การเพิ่มพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดจะทำให้จำนวนรอบของขดลวดลดลงเมื่อกำหนดให้ขนาดของขดลวดคงที่ การพิจารณาในประเด็นนี้ได้พิจารณาจากค่าความเข้มสนามที่ต้องการ ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก และเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีอยู่ ในการพันขดลวดได้พิจารณาถึงปัจจัยทั้งสามนี้ และได้เลือกลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.60 mm ได้ค่าความต้านทานภายในของขดลวดมีค่า ≈ 3 โอห์ม ขนาดของขดลวดที่พินขึ้นแสดงดังรูปที่ (4.10)

Diameter of copper wire : 2.6 mm

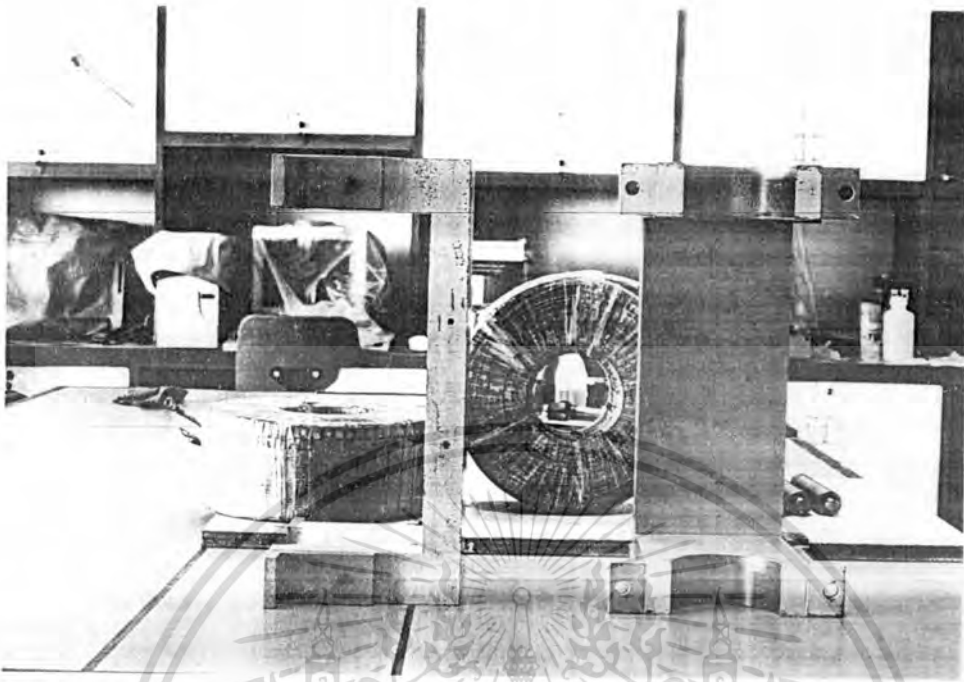
Turns : 1350

Resistance : 3 ohms

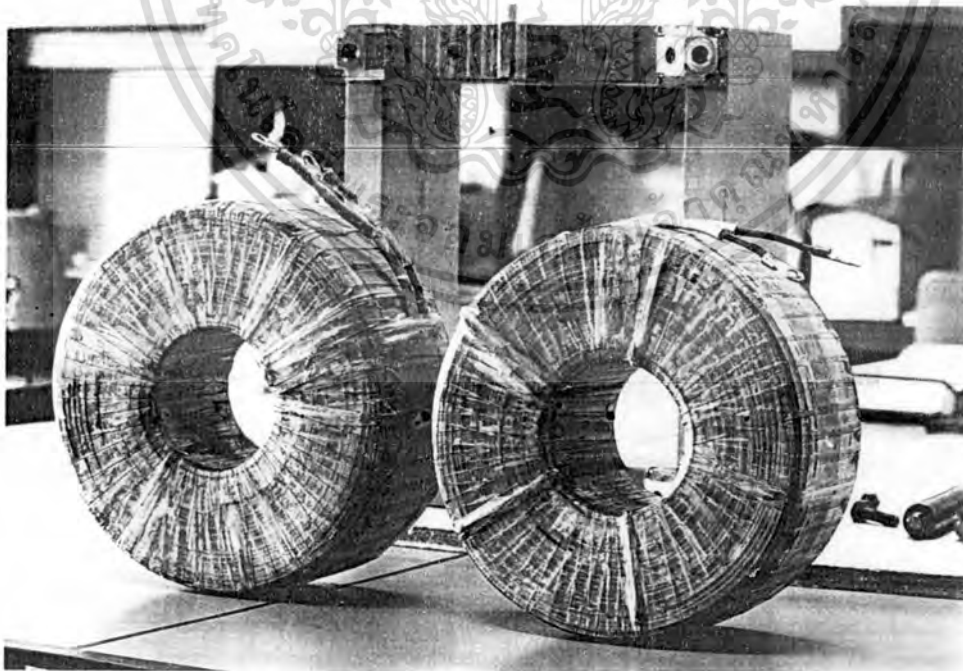


รูปที่ 4.10 แสดงขนาดของขดลวดและลวดที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 โยคคานหนาและคานข้างของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.12 ขดลวดทองแดงปราศจากขดลวดอื่นที่พันขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ประกอบขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 เครื่องชั่ง

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 เรื่องการวัดค่าชั้สเขตพิบัติโดยวิธีการฟาราเดย์ สิ่งที่ต้องการก็คือ แรงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่างตามสมการ

$$\Delta F = m_1 \chi_1 H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} \right)$$

ค่า $H_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} \right)$ นั้นเป็นค่าที่หาได้จากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น ซึ่งจะเป็นค่าคงที่แต่ละระหังขั้วและกระแสที่ใช้ ดังนั้นตัวแปรที่จะต้องทราบค่า เพื่อที่จะหาค่าชั้สเขตพิบัติ χ ตามสมการข้างต้น ได้ก็คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้และแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระทำกับสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการหาแรงกระทำโดยรวมจากเครื่องชั่งจะต้องเป็นเครื่องชั่งละเอียดอ่านน้ำหนักได้ในช่วง ไมโครกรัม ความสามารถในการชั่งได้ละเอียดของเครื่องชั่ง จะทำให้การวัดค่าชั้สเขตพิบัติ มีความละเอียดสูงขึ้น

ถ้า ΔF เป็นค่าแรงที่วัดได้จากความแตกต่างระหว่างมีสนามแม่เหล็กกับไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำกับสารตัวอย่างมีหน่วย dyne โดยที่

$$1 \text{ dynes} = 1 \text{ g cm/s}^2 ; (1 \text{ N} = 10^5 \text{ dynes})$$

m_1 มีหน่วย กรัม (g)

H_y มีหน่วย เอร์สเตด (Oersted, Oe) โดยที่ $1 \text{ Oe} = 79.6 \text{ A/m}$

χ มีหน่วย $\frac{emu}{gOe}$ และ โมเมนต์แม่เหล็ก μ หน่วย emu (electromagnetic unit)

เมื่อ หน่วยพลังงานต่อหน่วยสนามแม่เหล็กในระบบ cgs unit $\frac{\text{dyne} \cdot \text{cm}}{\text{Oe}} = \frac{\text{erg}}{\text{Oe}}$

และ $\frac{\partial H_y}{\partial z}$ มีหน่วย $\frac{\text{Oe}}{\text{cm}}$

จะได้ค่าชั้สเขตพิบัติ $\chi_1 = \frac{\Delta F}{m_1 H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}}$ ถ้า ΔF และ m_1 สามารถวัดได้ละเอียดถึง 10^{-6}

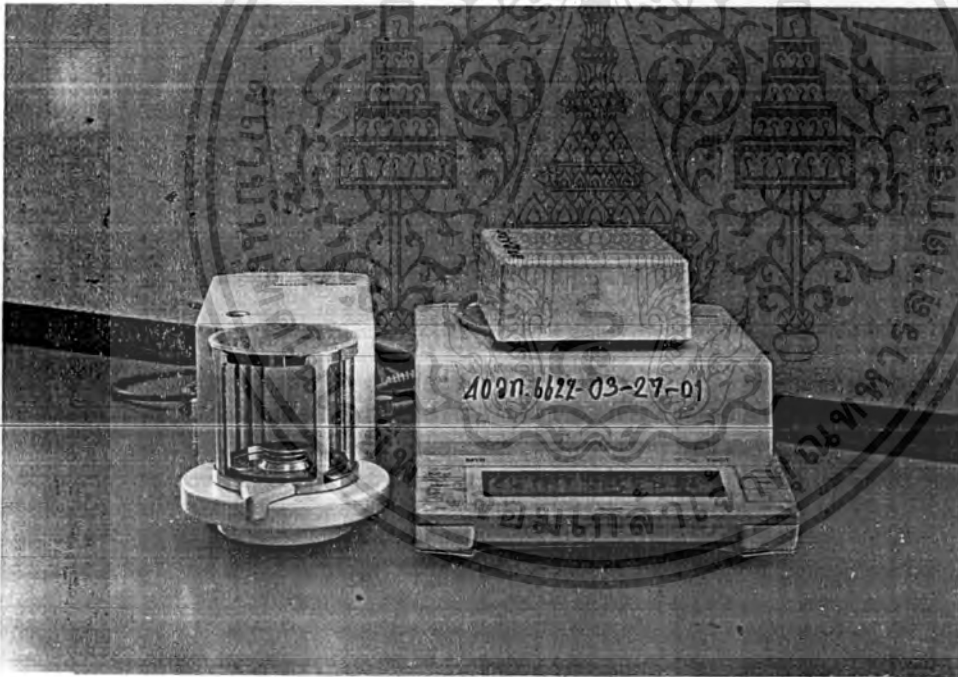
กรัม ก็จะได้ค่าชั้สเขตพิบัติละเอียดถึง $10^{-6} \frac{emu}{gOe}$ ด้วย ถ้า ΔF และ m_1 สามารถวัดได้ละเอียด

10^{-6} กรัม จะได้ค่าชั้สเขตพิบัติละเอียดถึง $10^{-6} \frac{emu}{gOe}$ หากพิจารณาถึงค่าชั้สเขตพิบัติของสารแม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กชนิดต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1 และค่าชั้สเซพติบิลิตีของสาร ไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติก
กบางชนิด ในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าชั้สเซพติบิลิตีจะอยู่ในช่วง $10^{-6} \frac{emu}{gOe}$ และตามหลักการวัดค่า
ชั้สเซพติบิลิตีโดยวิธีการฟาราเดย์ เป็นวิธีที่เหมาะสมกับสารแม่เหล็กอย่างอ่อนเท่านั้นดังนั้นการ
พิจารณาใช้เครื่องชั่งควรพิจารณาใช้เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดในช่วง ไมโครกรัม

ในการสร้างเครื่องวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีในครั้งนี้ผู้วิจัยได้มีจุดประสงค์ที่ต้องการประยุกต์ใช้
ตาชั่งนี้นำมาประกอบเป็นชุดวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีให้ได้ละเอียดถึง $10^{-6} \frac{emu}{gOe}$ โดยเครื่องชั่งที่ใช้เป็น
เครื่องชั่งที่ผลิตโดย บริษัท เมทเลอร์ - โทเลโด รุ่น MT5 (Microbalance) มาประกอบ



รูปที่ 4.14 รูปถ่ายภายนอกของเครื่องชั่งรุ่น MT5 (Microbalance)

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของเครื่องชั่งรุ่น MT5 (Microbalance)

รายการ	
Readability	1 μg
Weighing capacity	5100 mg
Taring range (by subtraction)	0.....5100 mg
Repeatability (s) with: Total load: 0...2 g	0.8 μg
2...5 g	0.9 μg
Linearity	$\pm 4 \mu\text{g}$
Linearity within 500 mg ¹⁾	$\pm 2 \mu\text{g}$
Typical stabilization time	9...12s
Calibration with external weights	5 g
Sensitivity: - Temperature drift	$\pm 1.5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
Long-term stability	on $\pm 0.00015\%$
Weighing pan*	$\phi 27 \text{ mm}$
Admissible ambient conditions	
Temperature: 5...40°C	
Relative humidity: 25...35%, noncondensing	

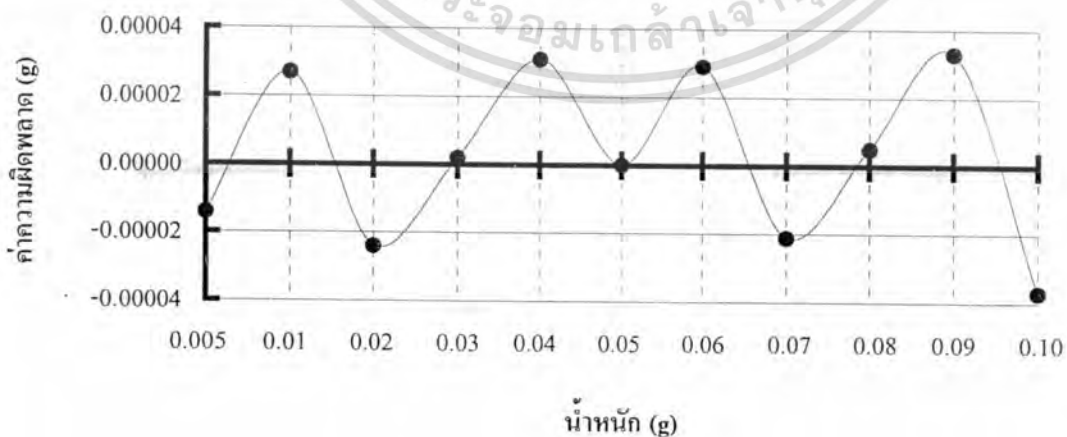
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การสอบเทียบเครื่องชั่งรุ่น MT5 ด้วยมวลมาตรฐาน 5-100 mg

Nominal Value (g)	Digital Reading (g)					Mav g	SD g	Error*1 g
	1	2	3	4	5			
0.005	0.005013	0.005014	0.005014	0.005014	0.005013	0.005014	0.000001	-0.000014
0.01	0.009974	0.009974	0.009972	0.009971	0.009973	0.009973	0.000001	0.000027
0.02	0.020025	0.020022	0.020024	0.020025	0.020024	0.020024	0.000001	-0.000024
0.03	0.029998	0.029998	0.029997	0.029998	0.029998	0.029998	0.000001	0.000002
0.04	0.039970	0.039969	0.039967	0.039969	0.039969	0.039969	0.000001	0.000031
0.05	0.050001	0.050001	0.050002	0.049999	0.049999	0.050000	0.000001	0.000000
0.06	0.059972	0.059971	0.059970	0.059971	0.059970	0.059971	0.000001	0.000029
0.07	0.070022	0.070023	0.070021	0.07002	0.070021	0.070021	0.000001	-0.000021
0.08	0.079996	0.079996	0.079994	0.079996	0.079995	0.079995	0.000001	0.000005
0.09	0.089967	0.089968	0.089966	0.089966	0.089966	0.089967	0.000001	0.000033
0.10	0.100038	0.100038	0.100036	0.100035	0.100036	0.100037	0.000001	-0.000037

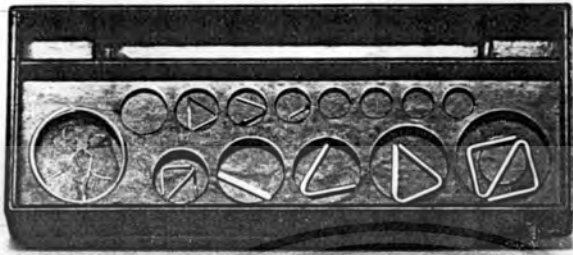
*1 Error = Nominal Value - Mav

Calibration balance

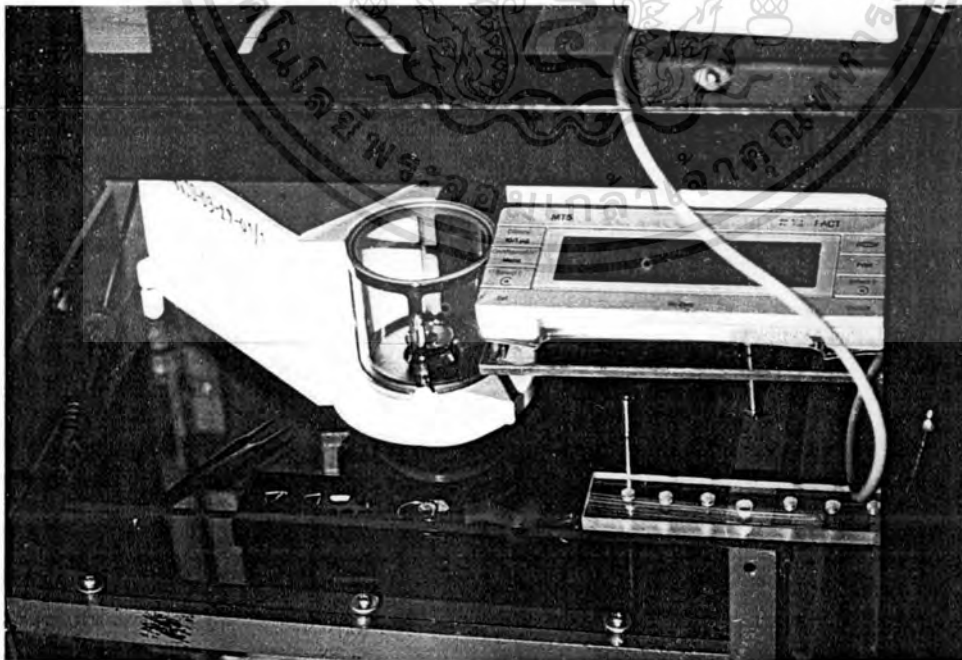


รูปที่ 4.15 กราฟค่าน้ำหนักมาตรฐานและค่าความผิดพลาดของเครื่องชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปมวลมาตรฐาน 5-100 mg

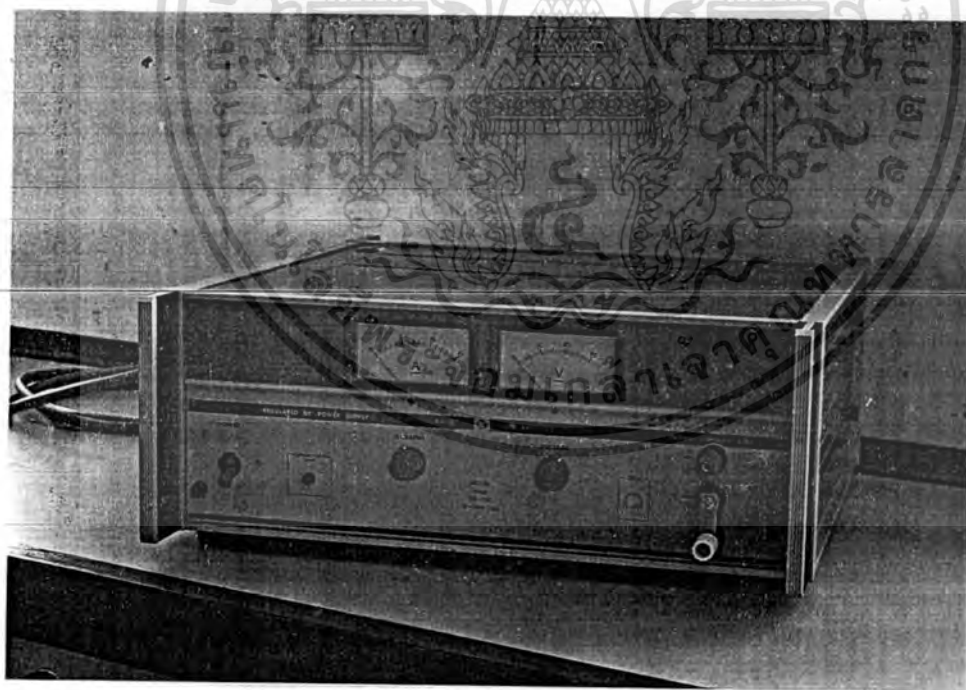


รูปที่ 4.17 รูปการสอบเทียบเครื่องชั่งรุ่น MTS ด้วยมวลมาตรฐาน 5-100 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า

เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอีกชิ้นหนึ่งของเครื่องมือวัดค่าชดเชยพหุขั้ว ดี เพราะค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ดังสมการที่ (4.13) ในกรณีที่ต้องการค่าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่เพื่อที่จะให้ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ มีค่าคงที่ ในขณะที่ทำการวัดค่าชดเชยพหุขั้วของสารตัวอย่าง จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ขดลวดมีค่าคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลา แต่เนื่องจากความต้านทานของขดลวดทองแดงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสไหลผ่านขดลวดทองแดงได้น้อยลง ดังนั้น เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดจะต้องปรับให้กระแสมีค่าคงที่ตลอดเวลาได้ ในการสร้างเครื่องวัดค่าชดเชยพหุขั้วนี้ได้ ได้ใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตโดย บริษัท KIKUSUI ELECTRONICS CORPORATION รุ่น PAD 70 - 15 L ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.18 รูปเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า รุ่น PAD70-15L

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (รุ่น PAD70-15L)

รายการ	PAD70-15L
Input	
Input supply	120/240V \pm 10%, 50Hz/60Hz AC, 1 \emptyset
Power consumption 120V AC	Approx. 1.9kVA
Rated load	
Output	
Output voltage range 10 turns	0 - 70V
Voltage resolution (theoretical value)	13 mV
Output current range 1 turns	0 - 15A
Current resolution (theoretical value)	51mA
Constant voltage characteristics	
Regulation ^{*1}	
Source effect (line regulation) (For \pm 10% change of line voltage)	0.005% + 1mV
Load effect (load regulation) (For 0 to 100% change of output current)	0.005% + 2mV 0.005% + 1mV
Ripple and noise (5Hz - 1Mhz) rms ^{*2}	1mV
Transient response (typical) ^{*3}	50 μ sec. (5 - 100% change)
Temperature coefficient (typical)	50 ppm/ $^{\circ}$ C
Remote control resistance and voltage	Approx. 0 - 10k Ω , 0 - 10 V

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

รายการ	PAD70-15L
Constant current characteristics	
Regulation	1mA
Load effect (load regulation) (For 0 to 100% change of output voltage)	3mA
Ripple and noise (5Hz - 1Mhz) rms ^{*2}	5mA
Remote control resistance/voltage, approx. [kΩ/V]	1/0.45
Operating ambient temperature range	0 - 40 °C (32 - 104 °F)
Operating ambient humidity range	10% - 90% RH
Cooling method	Forced air cooling with fan
Polarity of output voltage	Positive or negative grounded
Isolation from ground	± 250V DC

Note: *1. Measured using the terminals.

*2. Measured with the positive or negative output grounded.

*3. Recovery time within 0.05% + 10mV of the output voltage.

เนื่องจากต้องการค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กมีทั้งที่ตลอด
เวลาของแต่ละค่ากระแส และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขด
ลวด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าต้องมีค่าคงที่ตลอดเวลาเช่นกัน จากรายละเอียดของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า
รุ่น PAD70-15L ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าซัสเซพติบิลิตี ได้ทำการตรวจสอบ ripple
และ noise ที่ค่ากระแสต่างๆดังตารางที่ 4.6 และได้ตรวจสอบความคงที่ของกระแสที่จ่ายให้กับขด
ลวดเวลา 0-60 นาที ได้ค่ากระแสดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ค่า ripple และ noise ของเครื่องจ่ายกระแสรุ่น PAD70-15L

กระแส (A)	Ripple and Noise (Peak-Peak) (mA)
1	7.72
2	8.07
3	8.42
4	7.72
5	8.07
6	8.07
7	7.72
เฉลี่ย	7.97

ค่า ripple และ noise ของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าได้วัดแบบ Peak - Peak พบว่าที่ค่ากระแส 1-7 A ค่า ripple และ noise มีค่าเกือบคงที่และไม่ขึ้นกับขนาดของกระแส มีค่าเฉลี่ย 7.97 mA ซึ่งหากพิจารณาใช้กระแส 6 A ripple และ noise มีค่าเพียง 0.13เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก



รูปที่ 4.19 รูปลักษณะสัญญาณของ Ripple และ Noise เมื่อกระแส 6 A

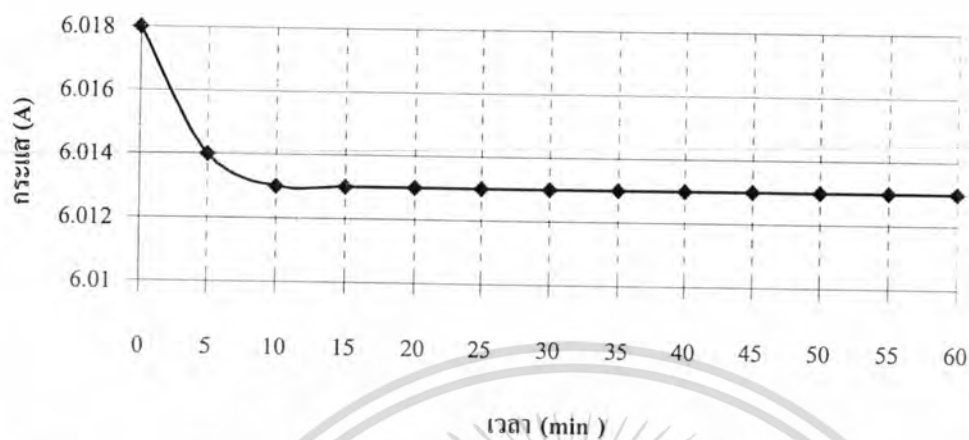
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของขดลวดทองแดง เวลา 0-60 min

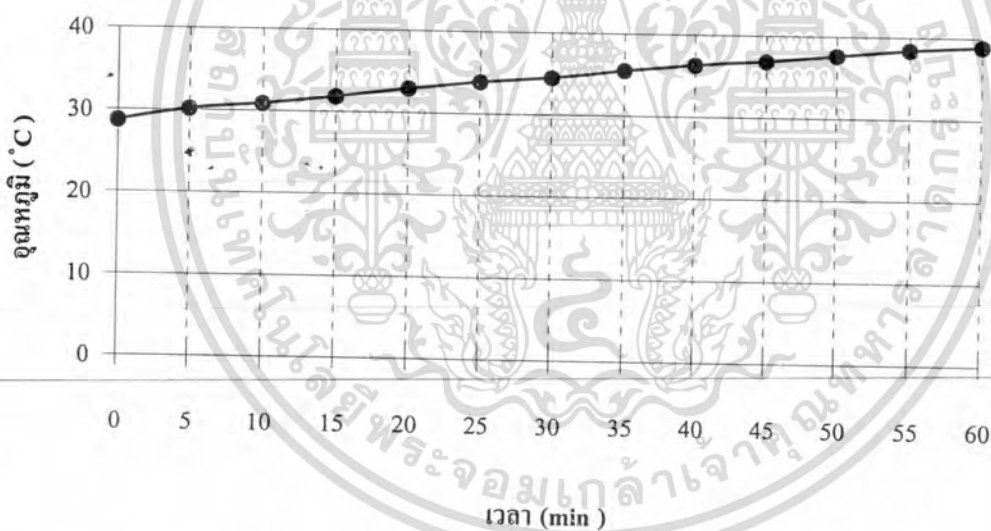
เวลา (min)	อุณหภูมิ ^{*1,2} (°C)	กระแสไฟฟ้า (A)
0	28.7	6.018
5	30.1	6.014
10	30.8	6.013
15	31.8	6.013
20	32.9	6.013
25	33.8	6.013
30	34.5	6.013
35	35.5	6.013
40	36.3	6.013
45	36.8	6.013
50	37.6	6.013
55	38.4	6.013
60	38.9	6.013

*1. อุณหภูมิห้อง 26.7° C

*2. เป็นอุณหภูมิที่วัดจากผิวค้ำนอกของขดลวดทองแดง



รูปที่ 4.20 กราฟค่ากระแสที่จ่ายแก่ขดลวดทองแดง เวลา 0-60 min



รูปที่ 4.21 กราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของขดลวดทองแดงเมื่อใช้กระแส 6 A เวลา 0-60 min

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.20 พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อยในช่วง 5 นาทีแรกของการเปิดเครื่อง และมีค่าคงที่ ที่ค่า 6.013 A หรืออาจพิจารณาตารางที่ 4.9 ค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา 0-60 นาทีที่ทำการวัด หลังจากที่กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วง 5 นาทีแรกแล้วจะมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งก็เป็นไปตามที่ระบุไว้ในรายละเอียดของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า

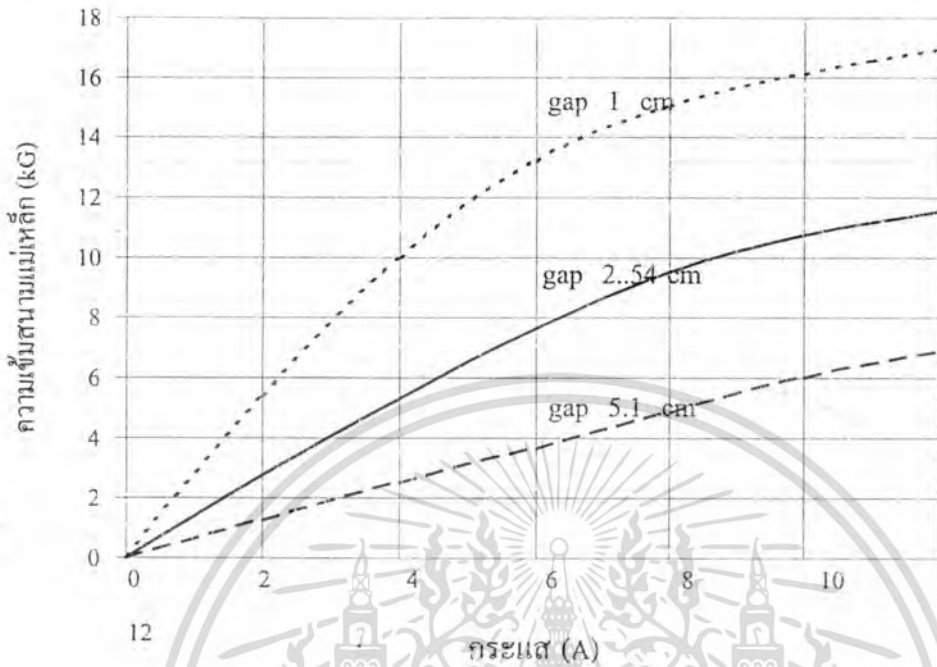
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สนามและเกรเดียนท์

ก่อนที่จะทำการทดลองวัดค่าศักซ์เซพติบิลติของสารตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้น จำเป็นต้องทราบถึงประสิทธิภาพหรือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ค่าต่าง ๆ และความเข้มสนามแม่เหล็กต้องมีค่าความคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลา ทั้งนี้เพื่อที่จะได้พิจารณาถึงการใช้ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็กและกระแสให้เหมาะสม การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ทำการวัดที่ระยะระหว่างขั้ว 1, 2.54 และ 5.10 cm. โดยให้ค่ากระแสคงที่ตั้งแต่ 0 ถึง 12 A และใช้แกนแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กหน้าตัดเรียบ ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.8 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะระหว่างขั้วและกระแสค่าต่าง ๆ

กระแสคงที่ (A)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (kOe)		
	ระยะระหว่างขั้ว	ระยะระหว่างขั้ว	ระยะระหว่างขั้ว
	1 cm.	2.54 cm.	5.10 cm.
0	0	0	0
2	5.36	2.76	1.25
4	9.95	5.30	2.50
6	13.20	7.63	3.65
8	15.00	9.51	4.84
10	16.10	10.75	6.00
12	16.90	11.55	6.85



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1, 2.54, 5.1 cm.

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ≈ 17 kG ที่ค่ากระแส 12 A ระยะระหว่างขั้ว 1.0 cm. และที่ค่าระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm. ที่กระแส 6 A ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ≈ 7.6 kG และได้ 3.65 kG ที่ระยะระหว่างขั้ว 5.10 cm. ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับสมการ (4.12) และเมื่อให้กระแสแก่ขดลวดมากขึ้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อค่า N คงที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับระยะระหว่างขั้ว (d) และกระแส แต่การเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโดยการเพิ่มกระแสแก่ขดลวด จะทำให้พลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยแฟกเตอร์ i^2 ; ($P = i^2 R_C$) เมื่อ R_C เป็นค่าความต้านทานของขดลวดทองแดง ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm. ส่วนค่ากระแสที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5 ถึง 7 A เพราะที่ค่ากระแสดังกล่าวจะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 6.5, 7.5 kG ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพียงพอต่อการทำให้เกิดแรงกระทำทางแม่เหล็กกับสารตัวอย่างชนิดต่างๆที่จะวัดค่าชัสมหัพพสมบัติโดยวิธีการของฟาราเดย์ แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเลือกค่ากระแสที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาจากค่า เกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กและบริเวณที่ให้ค่าผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามและเกรเดียนท์คงที่อีกด้วย และสนามแม่เหล็กที่ได้จากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจะต้องมี

ค่าความเข้มคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาของแต่ละค่ากระแสที่ใช้ ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะได้ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial x}$ มีค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

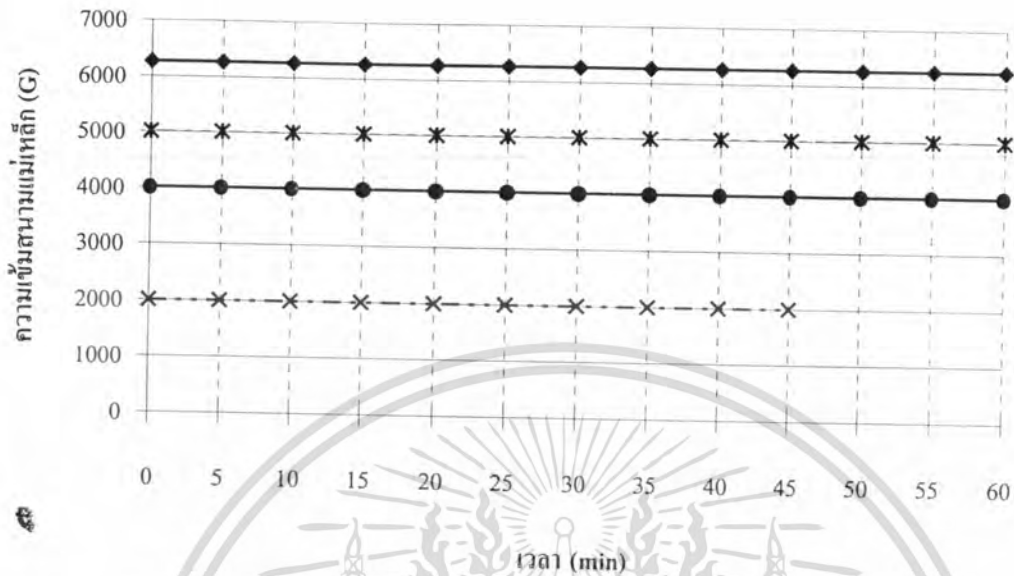
คงที่ตลอดเวลาในขณะที่ใช้งาน ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าคงที่ตลอดเวลาก็ต่อเมื่อค่าความเข้มข้นแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นก่อนที่จะพิจารณาค่าเกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่างๆกับเวลาเพื่อตรวจสอบความคงที่สม่ำเสมอของความเข้มข้นแม่เหล็กรายละเอียดดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.9 ค่ากระแสที่ใช้ อุณหภูมิของขดลวด และค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก

เวลา (min)	1			2		
	กระแส (A)	อุณหภูมิ ขดลวด (°C)	ความเข้ม สนามแม่ เหล็ก (G)	กระแส (A)	อุณหภูมิ ขดลวด (°C)	ความเข้ม สนามแม่ เหล็ก (G)
0	6.018	28.7	6261	6.018	34.9	5004
5	6.014	30.1	6261	6.016	35.8	5004
10	6.013	30.8	6261	6.015	36.4	5004
15	6.013	31.8	6261	6.015	37.0	5004
20	6.013	32.9	6261	6.015	38.0	5004
25	6.013	33.8	6261	6.015	38.8	5004
30	6.013	34.5	6261	6.015	39.4	5004
35	6.013	35.5	6261	6.015	40.1	5004
40	6.013	36.3	6261	6.015	40.5	5004
45	6.013	36.8	6261	6.015	41.0	5004
50	6.013	37.6	6261	6.015	41.7	5004
55	6.013	38.4	6261	6.015	42.3	5004
60	6.013	38.9	6261	6.015	42.8	5004

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

เวลา (min)	3			4		
	กระแสน (A)	อุณหภูมิ ขดลวด (°C)	ความเข้ม สนามแม่ เหล็ก (G)	กระแสน (A)	อุณหภูมิ ขดลวด (°C)	ความเข้ม สนามแม่ เหล็ก (G)
0	6.016	42.0	4006	6.015	46.0	2003
5	6.015	42.9	4006	6.015	46.5	2003
10	6.015	43.5	4006	6.015	47.1	2003
15	6.015	44.0	4006	6.015	47.4	2003
20	6.015	44.5	4006	6.015	47.8	2003
25	6.015	45.1	4006	6.015	48.2	2003
30	6.015	45.4	4006	6.015	48.6	2003
35	6.015	45.9	4006	6.015	48.9	2003
40	6.015	46.1	4006	6.015	49.3	2003
45	6.015	44.6	4006	6.015	49.7	2003
50	6.015	47.0	4006			
55	6.015	47.3	4006			
60	6.015	47.5	4006			



รูปที่ 4.23 กราฟความเข้มข้นแม่เหล็กกระแส 6 A เวลา 0-60 min

ในการพิจารณาค่าเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กได้ออกแบบขั้วแกนแม่เหล็กที่สร้างขึ้นตามรูปที่ (4.7) และใช้กระแส 5, 6 และ 7 A ที่ระยะระหว่างขั้ว 2 cm. และ 2.54 cm. ตามลำดับ ตำแหน่งวัดค่าความเข้มข้นแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กโดยเลื่อนระยะวัดตามแนวแกน z ตั้งแต่ 0 ถึง 4.0 cm. ดังรูปที่ (4.24)

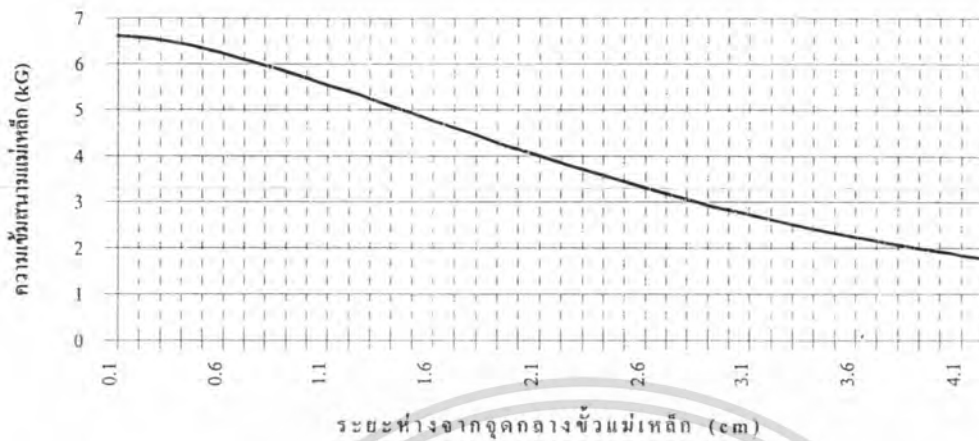
ตารางที่ 4.10 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนต์และผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์ ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก ใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.cm

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (z)(cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนต์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
0.0	6.628	-	-
1.0	6.614	-	-
0.2	6.576	0.478	3.140
0.3	6.519	0.700	4.514
0.4	6.437	0.870	5.600
0.5	6.337	1.053	6.669
0.6	6.229	1.160	7.227
0.7	6.098	1.245	7.592
0.8	5.973	1.328	7.929
0.9	5.839	1.398	8.160
1.0	5.697	1.438	8.189
1.1	5.539	1.490	8.253
1.2	5.398	1.533	8.272
1.3	5.243	1.550	8.127
1.4	5.084	1.575	8.007
1.5	4.919	1.585	7.797
1.6	4.768	1.580	7.533
1.7	4.609	1.568	7.225
1.8	4.449	1.553	6.907
1.9	4.292	1.540	6.611
2.0	4.147	1.503	6.231
2.1	3.993	1.455	5.810

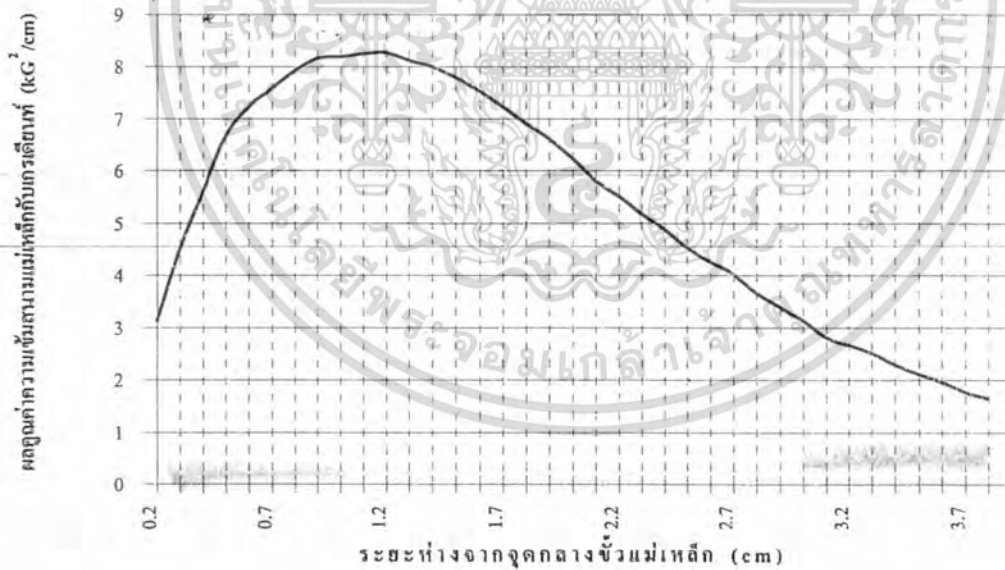
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (z)(cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
2.2	3.848	1.433	5.512
2.3	3.710	1.395	5.175
2.4	3.574	1.368	4.879
2.5	3.435	1.320	4.534
2.6	3.302	1.290	4.260
2.7	3.182	1.265	4.025
2.8	3.058	1.198	3.662
2.9	2.929	1.158	3.390
3.0	2.823	1.110	3.134
3.1	2.719	1.035	2.814
3.2	2.614	1.018	2.659
3.3	2.515	1.000	2.515
3.4	2.416	0.950	2.295
3.5	2.319	0.910	2.110
3.6	2.234	0.878	1.960
3.7	2.151	0.820	1.764
3.8	2.065	0.795	1.642
3.9	1.991	0.768	1.528
4.0	1.916	0.730	1.399
4.1	1.844	-	-
4.2	1.770	-	-



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟค่าความเข้มข้นแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

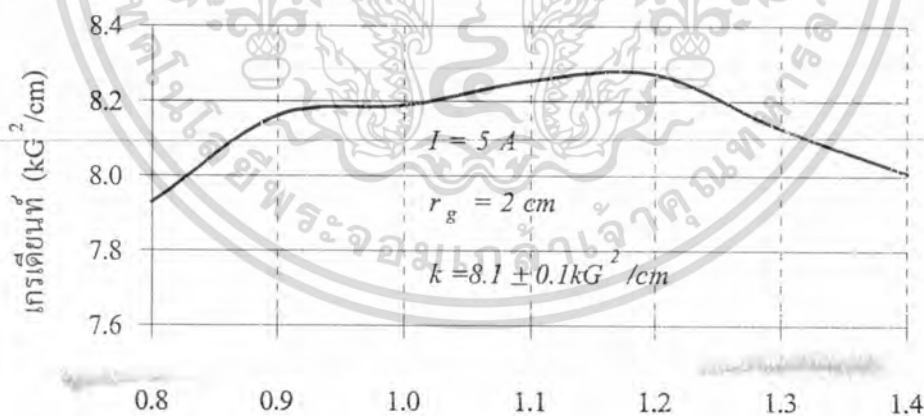


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ตารางที่ 4.11 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 -1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm)
0.8	7.9	8.1 ± 0.1
0.9	8.2	
1.0	8.2	
1.1	8.3	
1.2	8.3	
1.3	8.1	
1.4	8.0	

ผลคูณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับ



ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)

รูปที่ 4.27 แสดงกราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

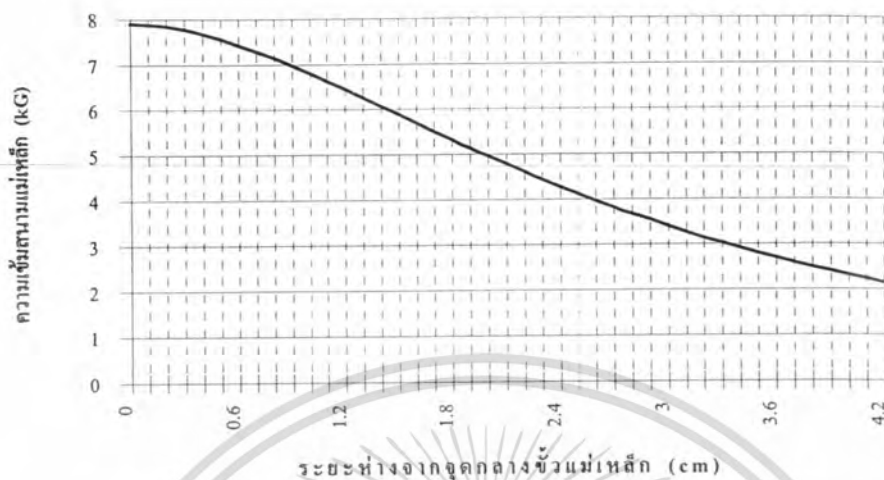
ตารางที่ 4.12 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์และผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
0.0	7.898	-	-
1.0	7.881	-	-
0.2	7.8410	0.563	4.411
0.3	7.769	0.798	6.196
0.4	7.673	1.038	7.961
0.5	7.563	1.203	9.095
0.6	7.426	1.340	9.951
0.7	7.288	1.478	10.768
0.8	7.137	1.568	11.187
0.9	6.972	1.655	11.539
1.0	6.799	1.718	11.677
1.1	6.626	1.768	11.711
1.2	6.450	1.810	11.675
1.3	6.265	1.848	11.575
1.4	6.075	1.880	11.421
1.5	5.887	1.885	11.097
1.6	5.698	1.870	10.655
1.7	5.511	1.880	10.361
1.8	5.327	1.833	9.762
1.9	5.135	1.793	9.266
2.0	4.965	1.773	8.800
2.1	4.794	1.738	8.330

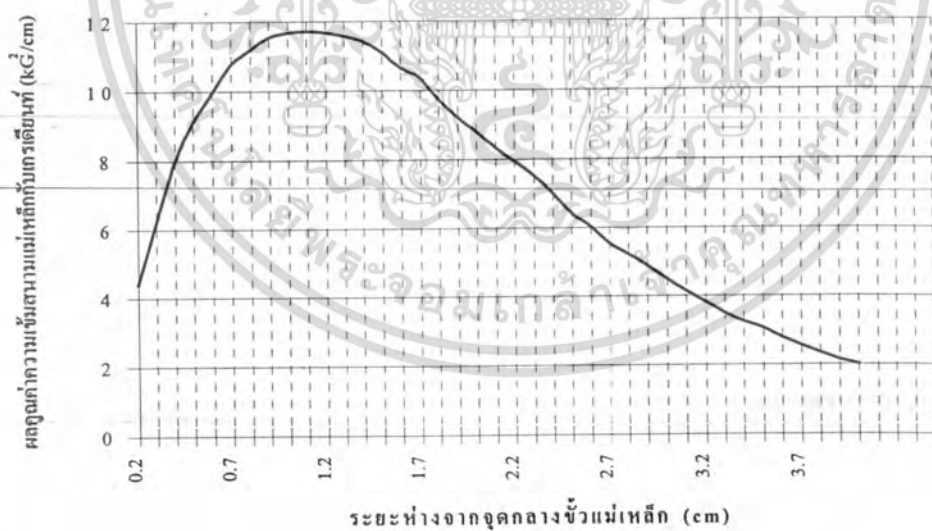
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 (ต่อ)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ $\frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
2.2	4.618	1.718	7.931
2.3	4.440	1.690	7.504
2.4	4.278	1.635	6.995
2.5	4.118	1,560	6.424
๕ 2.6	3.964	1520	6.025
2.7	3.816	1.450	5.533
2.8	3.670	1.423	5.221
2.9	3.538	1.383	4.891
3.0	3,395	1.323	4.490
3.1	3.263	1.273	4.152
3.2	3.141	1.273	3.816
3.3	3.029	1.215	3.506
3.4	2.909	1.158	3.258
3.5	2.800	1.120	3.059
3.6	2.693	1.093	2.787
3.7	2.592	1.035	2.559
3.8	2.495	0.988	2.345
3.9	2.405	0.895	2.152
4.0	2.317	0.868	2.010
4.1	2.234	-	-
4.2	2.148	-	-



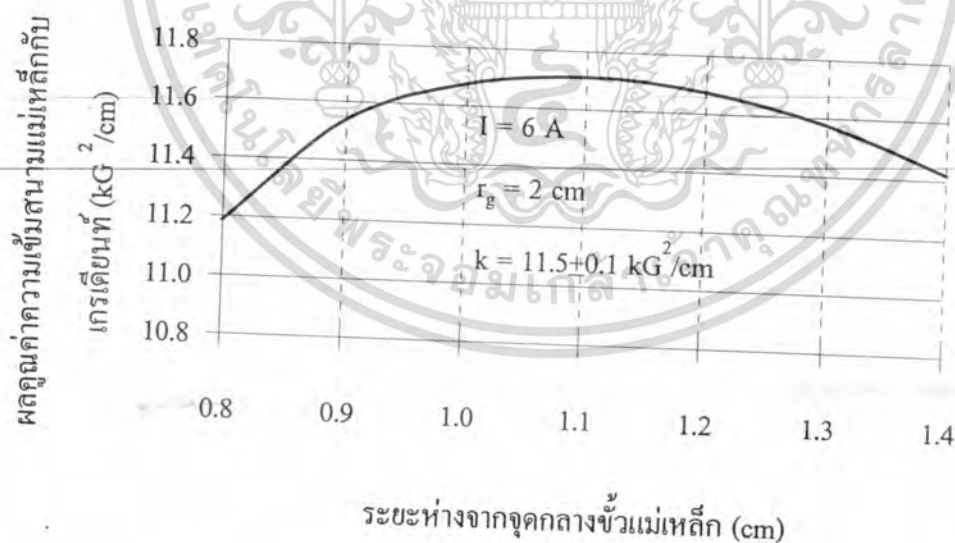
รูปที่ 4.28 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.



รูปที่ 4.29 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ตารางที่ 4.13 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 -1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm)
0.8	11.2	11.5 ± 0.1
0.9	11.5	
1.0	11.7	
1.1	11.8	
1.2	11.8	
1.3	11.5	
1.4	11.4	



รูปที่ 4.30 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ระยะ 0.8 - 1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

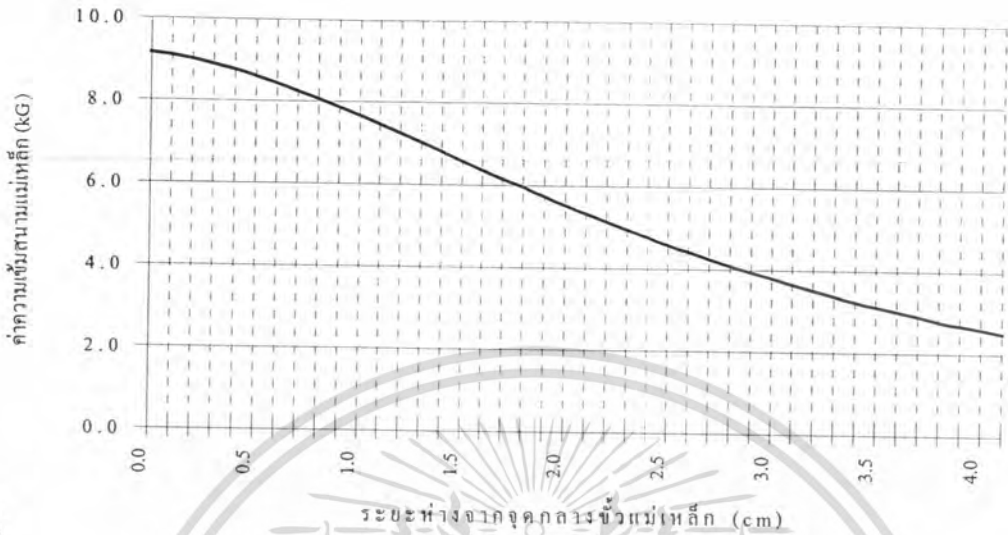
ตารางที่ 4.14 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนต์และผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์ ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนต์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm.)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm.)
0.0	9.174	-	-
1.0	9.149	-	-
0.2	9.091	0.710	6.455
0.3	9.004	0.968	8.711
0.4	8.890	1.235	10.979
0.5	8.762	1.425	12.486
0.6	8.597	1.608	13.819
0.7	8.435	1.743	14.700
0.8	8.247	1.845	15.216
0.9	8.065	1.935	15.606
1.0	7.859	2.000	15.718
1.1	7.661	2.065	15.819
1.2	7.447	2.098	15.620
1.3	7.239	2.138	15.473
1.4	7.020	2.165	15.198
1.5	6.806	2.198	14.956
1.6	6.581	2.168	14.268
1.7	6.360	2.120	13.268
1.8	6.153	2.103	12.937
1.9	5.958	2.075	12.363

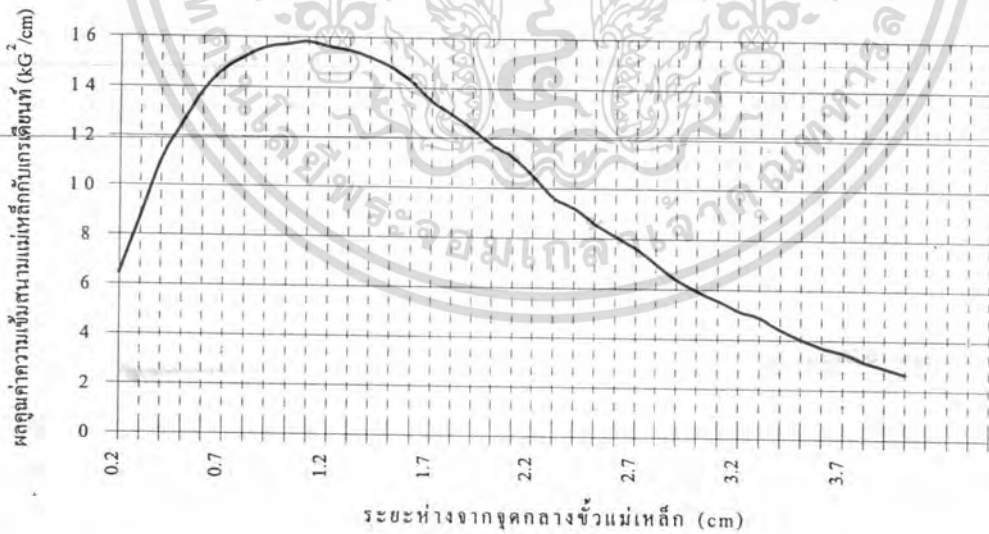
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่ เหล็ก(cm.)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm.)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm.)
2.0	5.740	2.043	11.724
2.1	5.530	2.048	11.323
2.2	5.336	1.968	10.499
2.3	5.139	1.875	9.636
2.4	4.953	1.860	9.213
2.5	4.780	1.788	8.592
2.6	4.592	1.760	8.082
2.7	4.420	1.723	7.613
2.8	4.249	1.645	6.989
2.9	4.091	1.558	5.940
3.0	3.934	1.510	5.940
3.1	3.797	1.558	5.914
3.2	3.645	1.408	5.130
3.3	3.507	1.388	4.866
3.4	3.371	1.303	4.391
3.5	3.242	1.238	4.012
3.6	3.124	1.185	3.702
3.7	3.012	1.153	3.471
3.8	2.897	1.083	3.136
3.9	2.781	1.043	2.899
4.0	2.491	0.990	2.664
4.1	2.595	-	-



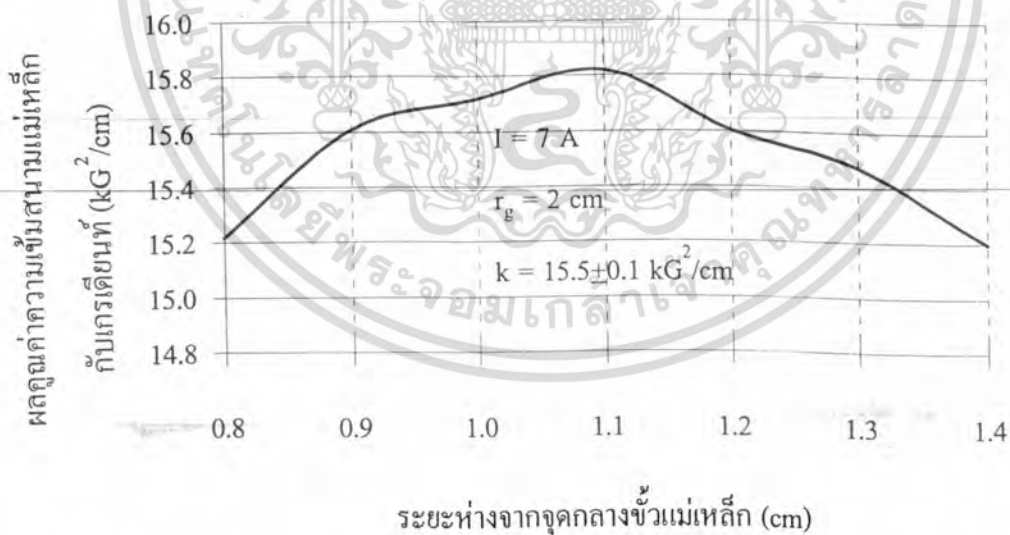
รูปที่ 4.31 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.



รูปที่ 4.32 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

ตารางที่ 4.15 ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8-1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm

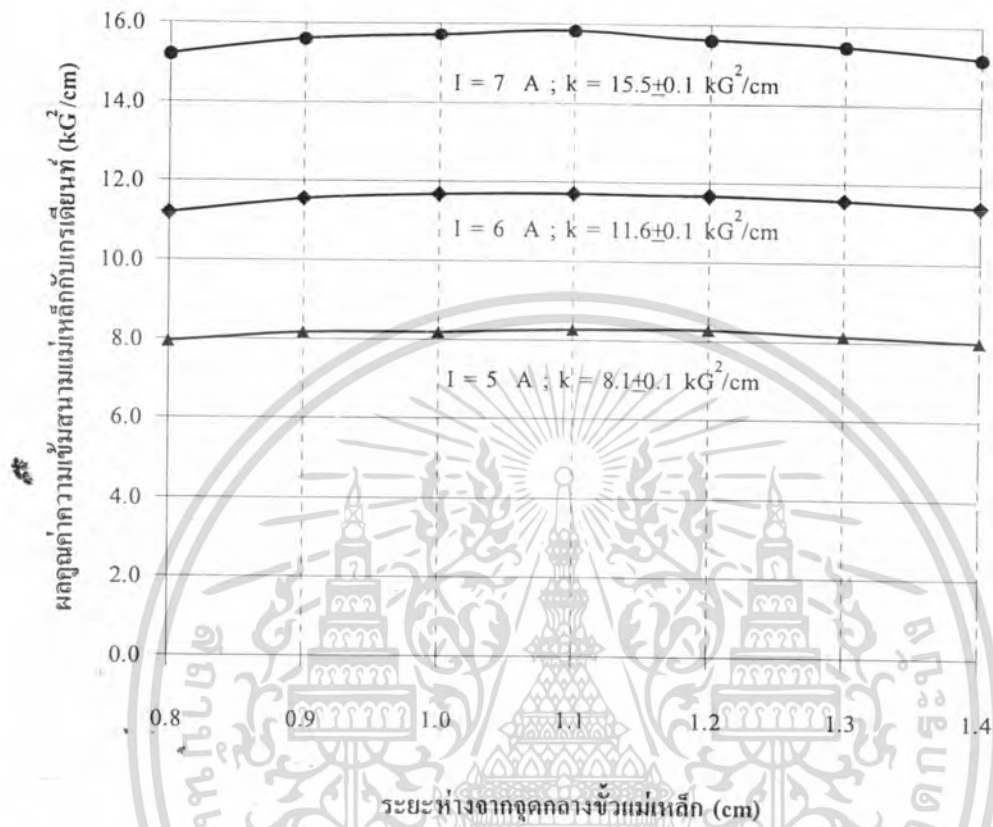
ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm)
0.8	15.2	15.5 ± 0.1
0.9	15.6	
1.0	15.7	
1.1	15.8	
1.2	15.6	
1.3	15.5	
1.4	15.2	



รูปที่ 4.33 กราฟค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8 - 1.4 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 2 cm.

ตารางที่ 4.16 ค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ (ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm. กระแสไฟฟ้า 5, 6, 7 A)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm.)	ผลคูณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ($H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG ² /cm.)		
	กระแส 5 แอมแปร์	กระแส 6 แอมแปร์	กระแส 7 แอมแปร์
0.8	7.9	11.2	15.2
0.9	8.2	11.5	15.6
1.0	8.2	11.7	15.7
1.1	8.3	11.8	15.8
1.2	8.3	11.7	15.6
1.3	8.1	11.5	15.5
1.4	8.0	11.4	15.2
ค่าสูงสุด	8.3	11.8	15.8
ค่าต่ำสุด	7.9	11.2	15.2
ค่าเฉลี่ย	8.1 ± 0.1	11.6 ± 0.1	15.5 ± 0.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.1	0.1



รูปที่ 4.34 กราฟค่าผลคูณเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ที่ระยะ 0.8-1.4 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5, 6, 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm.

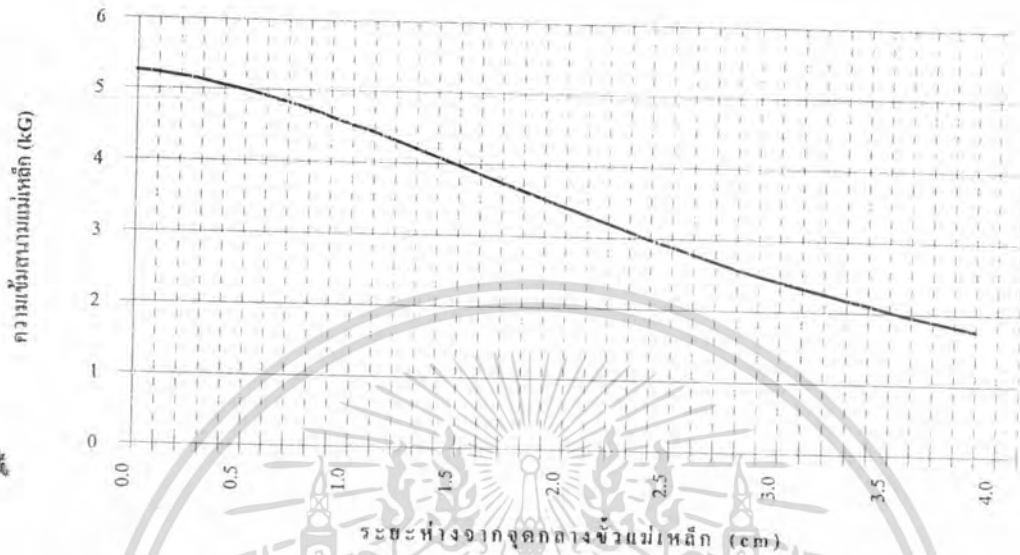
ตารางที่ 4.17 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์และผลคูณระหว่างเกรเดียนท์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm

ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก(cm)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
0.0	5.264	-	-
1.0	5.254	-	-
0.2	5.229	0.325	1.699
0.3	5.184	0.0478	2.475
0.4	5.134	0.583	2.991
0.5	5.063	0.673	3.405
0.6	4.996	0.758	3.784
0.7	4.915	0.828	4.067
0.8	4.831	0.923	4.457
0.9	4.732	0.970	4.681
1.0	4.627	1.020	4.720
1.1	4.527	1.048	4.742
1.2	4.423	1.068	4.722
1.3	4.313	1.088	4.690
1.4	4.200	1.115	4.686
1.5	4.092	1.133	4.634
1.6	3.977	1.140	4.534
1.7	3.860	1.148	4.429
1.8	3.744	1.135	4.249
1.9	3.633	1.113	4.042
2.0	3.523	1.100	3.875
2.1	3.415	1.100	3.757

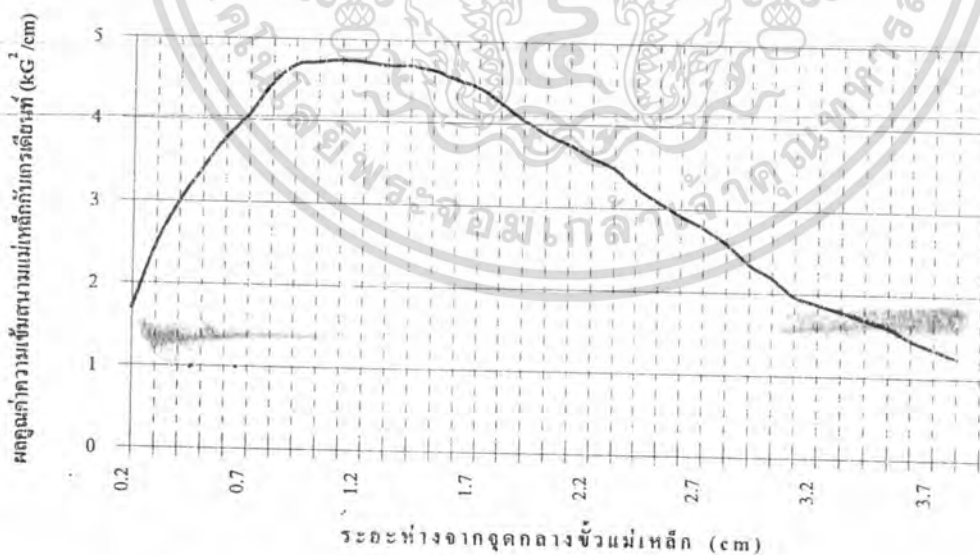
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
2.2	3.304	1.099	3.601
2.3	3.193	1.088	3.472
2.4	3.087	1.053	3.249
2.5	2.980	1.033	3.077
2.6	2.883	1.010	2.912
2.7	2.780	0.998	2.773
2.8	2.683	0.965	2.589
2.9	2.581	0.905	2.336
3.0	2.497	0.873	2.179
3.1	2.418	0.813	1.965
3.2	2.334	0.803	1.873
3.3	2.256	0.793	1.788
3.4	2.177	0.775	1.687
3.5	2.101	0.760	1.597
3.6	2.024	0.720	1.457
3.7	1.952	0.690	1.347
3.8	1.888	0.660	1.246
3.9	1.825	-	-
4.0	1.760	-	-



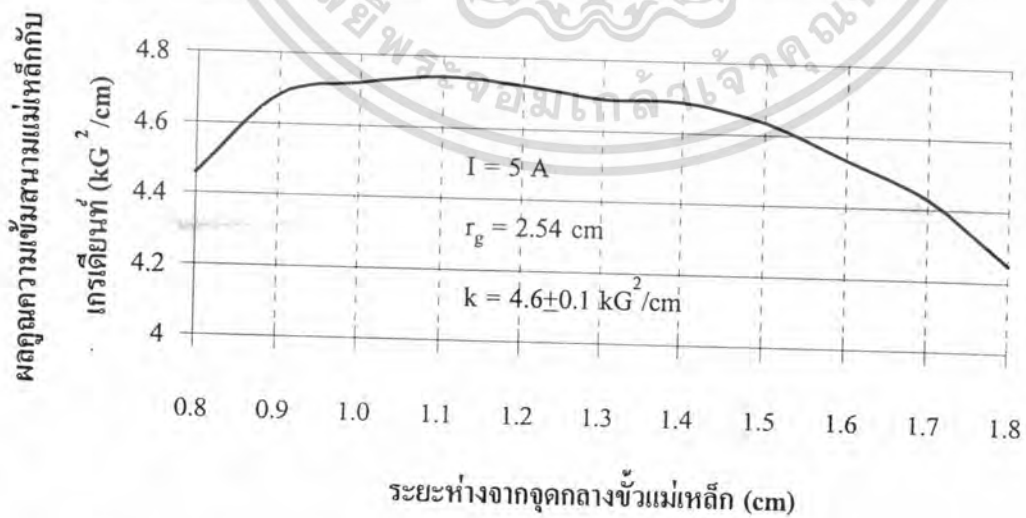
รูปที่ 4.35 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm



รูปที่ 4.36 กราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ตารางที่ 4.18 ค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm)
0.8	4.5	4.6 ± 0.1
0.9	4.7	
1.0	4.7	
1.1	4.7	
1.2	4.7	
1.3	4.7	
1.4	4.7	
1.5	4.6	
1.6	4.5	
1.7	4.4	
1.8	4.2	



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm.

จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

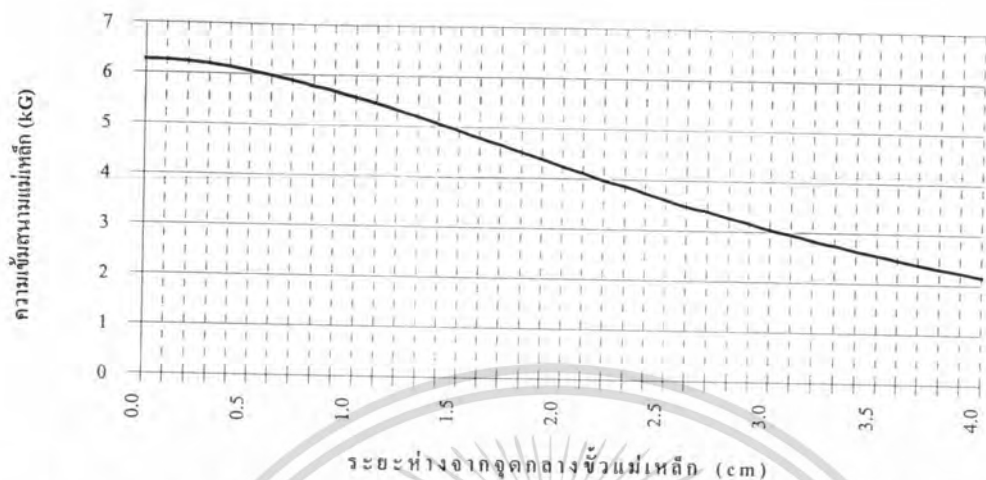
ตารางที่ 4.19 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนท์และผลคูณระหว่างเกรเดียนท์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดกลางขั้วเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
0.0	6.261	-	-
1.0	6.254	-	-
0.2	6.234	0.325	2.026
0.3	6.192	0.480	2.972
0.4	6.131	0.633	3.878
0.5	6.062	0.758	4.592
0.6	5.981	0.880	5.263
0.7	5.886	0.988	5.815
0.8	5.779	1.058	6.111
0.9	5.679	1.105	6.275
1.0	5.558	1.153	6.406
1.1	5.444	1.205	6.560
1.2	5.318	1.253	6.661
1.3	5.190	1.290	6.704
1.4	5.057	1.325	6.701
1.5	4.928	1.335	6.579
1.6	4.786	1.345	6.437
1.7	4.663	1.353	6.283
1.8	4.519	1.348	6.112
1.9	4.389	1.342	5.892
2.0	4.247	1.343	5.702
2.1	4.126	1.313	5.417

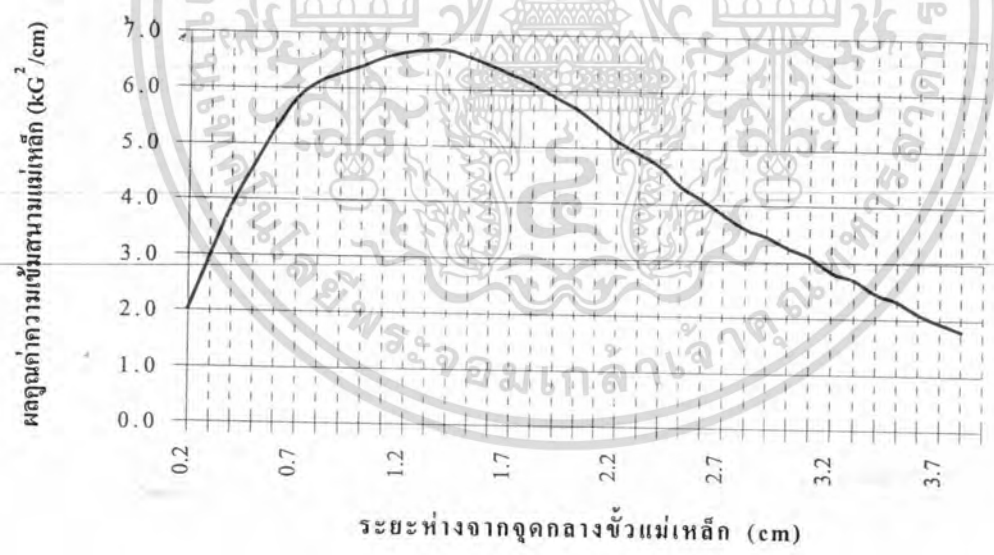
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 (ต่อ)

ระยะห่างจาก จุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
2.2	3.982	1.285	5.117
2.3	3.864	1.268	4.898
2.4	3.733	1.250	4.666
2.5	3.615	1.195	4.325
2.6	3.482	1.175	4.091
2.7	3.386	1.130	3.826
2.8	3.263	1.095	3.573
2.9	3.167	1.088	3.444
3.0	3.044	1.068	3.249
3.1	2.951	1.050	3.099
3.2	2.836	0.995	2.822
3.3	2.747	0.978	2.692
3.4	2.646	0.925	2.448
3.5	2.559	0.895	2.318
3.6	2.466	0.850	2.096
3.7	2.389	0.810	1.935
3.8	2.306	0.783	1.804
3.9	2.235	-	-
4.0	2.153	-	-



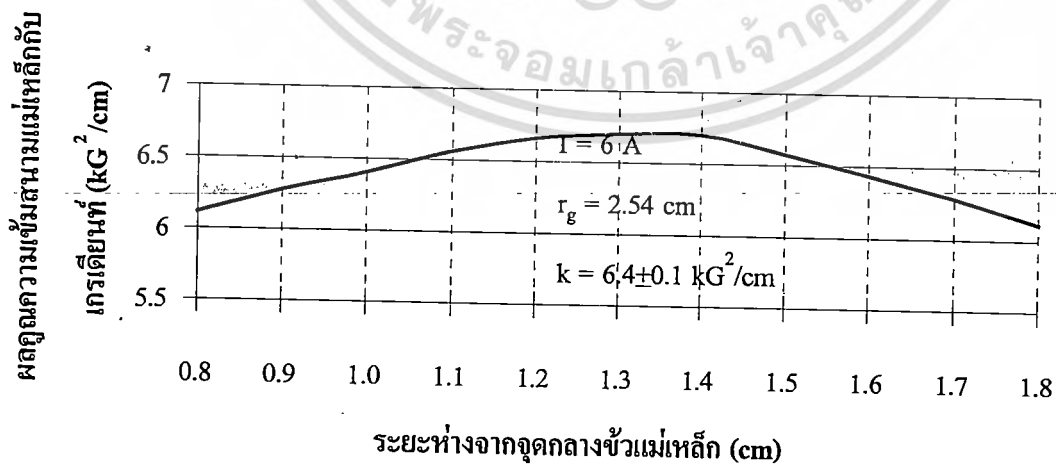
รูปที่ 4.38 กราฟค่าความเข้มนามแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.



รูปที่ 4.39 กราฟค่าผลคูณความเข้มนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ตารางที่ 4.20 ค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm.)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm.)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm.)
0.8	6.1	6.4 ± 0.1
0.9	6.3	
1.0	6.4	
1.1	6.6	
1.2	6.7	
1.3	6.7	
1.4	6.7	
1.5	6.6	
1.6	6.4	
1.7	6.3	
1.8	6.1	



รูปที่ 4.40 กราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 6 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ตารางที่ 4.21 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าเกรเดียนต์และผลคูณระหว่างเกรเดียนต์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ จากจุดกลางขั้วเมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

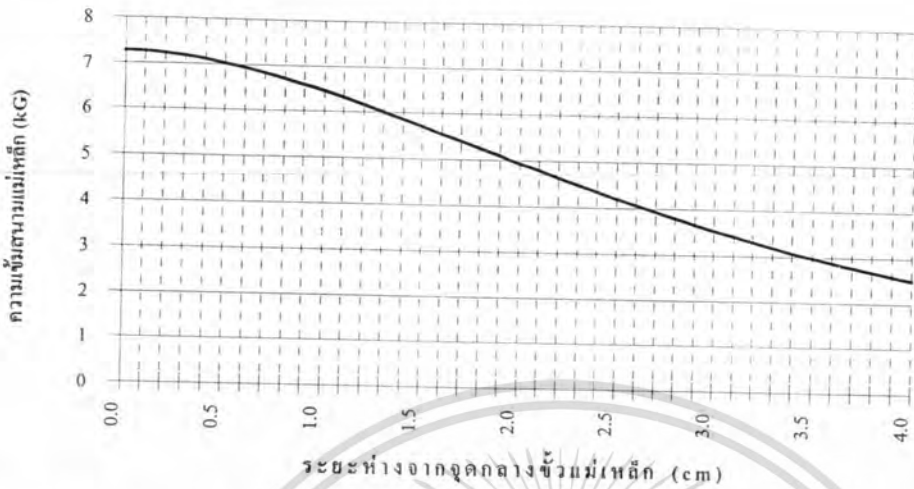
ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนต์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
0.0	7.268	-	-
1.0	7.254	-	-
0.2	7.225	0.413	2.980
0.3	7.174	0.578	4.143
0.4	7.103	0.733	5.203
0.5	7.023	0.873	6.092
0.6	6.932	0.993	6.880
0.7	6.827	1.100	7.510
0.8	6.706	1.203	8.064
0.9	6.583	1.283	8.446
1.0	6.451	1.357	8.757
1.1	6.314	1.423	8.982
1.2	6.163	1.485	9.152
1.3	6.014	1.515	9.111
1.4	5.857	1.530	8.961
1.5	5.807	1.528	8.719
1.6	5.551	1.525	8.465
1.7	5.403	1.533	8.280
1.8	5.247	1.543	8.093
1.9	5.095	1.533	7.811
2.0	4.934	1.525	7.524
2.1	4.790	1.520	7.281
2.2	4.637	1.483	6.874

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

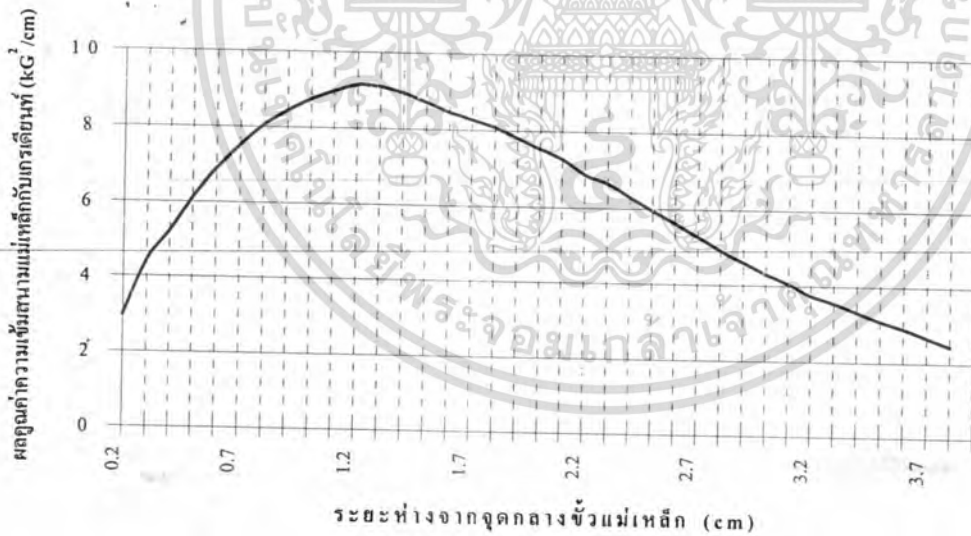
ตารางที่ 4.21 (ต่อ)

ระยะห่างจากจุดกลาง ขั้วแม่เหล็ก (cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก H_y (kG)	เกรเดียนท์ ($\frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG/cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)
2.3	4.489	1.483	6.655
2.4	4.341	1.450	6.294
2.5	4.197	1.415	5.939
2.6	4.057	1.383	5.609
2.7	3.923	1.343	5.267
2.8	3.788	1.300	4.924
2.9	3.660	1.258	4.602
3.0	3.537	1.215	4.297
3.1	3.420	1.183	4.044
3.2	3.302	1.135	3.748
3.3	3.192	1.113	3.551
3.4	3.083	1.075	3.314
3.5	2.975	1.040	3.094
3.6	2.872	1.008	2.894
3.7	2.776	0.960	2.665
3.8	2.680	0.913	2.446
3.9	2.591	-	-
4.0	2.507	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



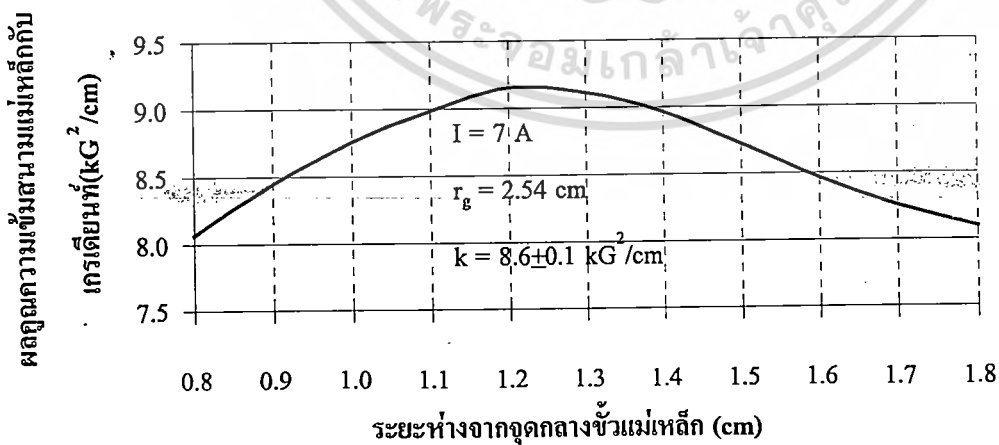
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟค่าความเข้มข้นนมแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางหัวแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.



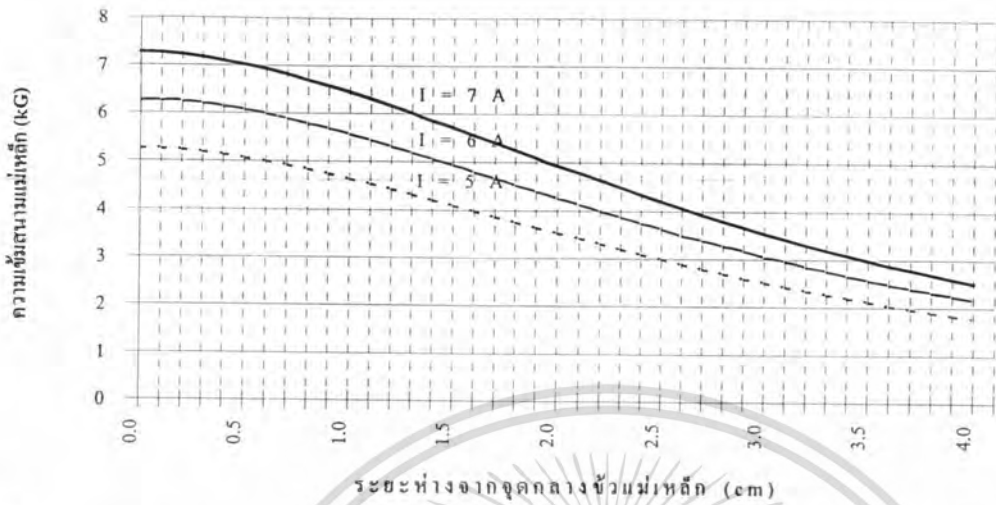
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟค่าผลคูณความเข้มข้นนมแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางหัวแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ตารางที่ 4.22 ค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

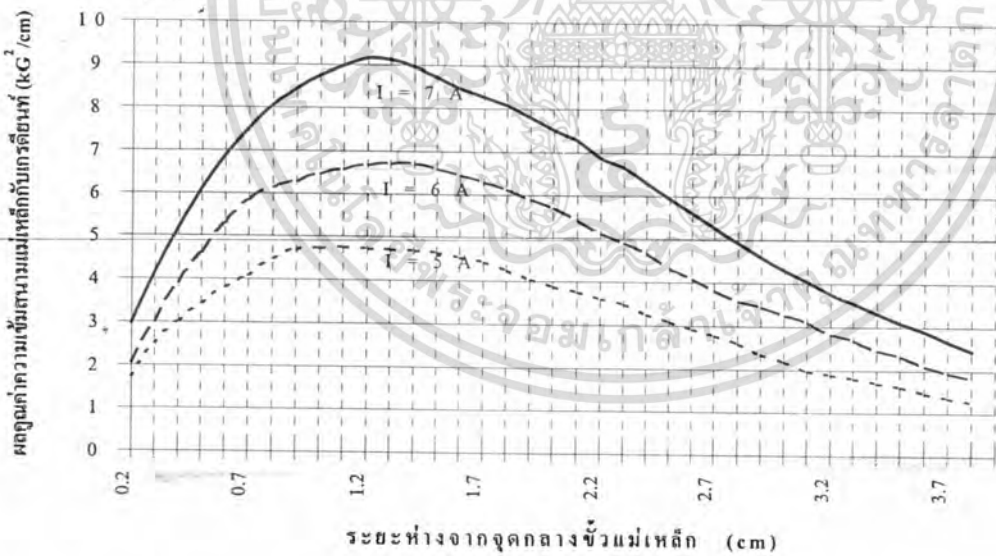
ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก (cm)	$H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ (kG ² /cm)	ค่าเฉลี่ย (kG ² /cm)
0.8	8.1	8.6 ± 0.1
0.9	8.4	
1.0	8.8	
1.1	8.9	
1.2	9.2	
1.3	9.1	
1.4	8.9	
1.5	8.7	
1.6	8.5	
1.7	8.3	
1.8	8.1	



รูปที่ 4.43 กราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.



รูปที่ 4.44 กราฟค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

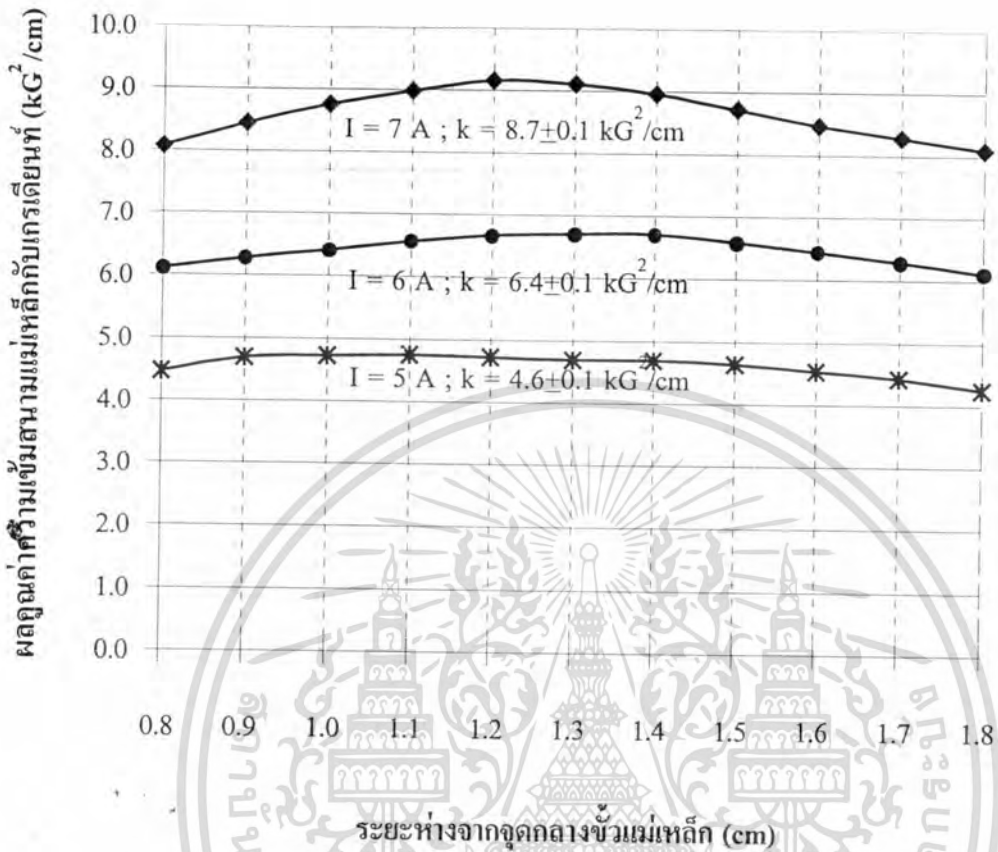


รูปที่ 4.45 กราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะต่างๆจากจุดกลางขั้วแม่เหล็กเมื่อใช้กระแส 5 , 6 , 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54cm.

ตารางที่ 4.23 ค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5, 6, 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ระยะห่างจากจุดกลาง ขั้วแม่เหล็ก (cm)	ผลคูณค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ($H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$) (kG ² /cm)		
	I = 5 A	I = 6 A	I = 7 A
0.8	4.5	6.1	8.1
0.9	4.7	6.3	8.4
1.0	4.7	6.4	8.8
1.1	4.7	6.6	9.0
1.2	4.7	6.7	9.2
1.3	4.7	6.7	9.1
1.4	4.7	6.7	9.0
1.5	4.6	6.6	8.7
1.6	4.5	6.4	8.5
1.7	4.4	6.3	8.3
1.8	4.2	6.1	8.1
ค่าสูงสุด	4.7	6.7	9.2
ค่าต่ำสุด	4.2	6.1	8.1
ค่าเฉลี่ย	4.6 ± 0.1	6.4 ± 0.1	8.6 ± 0.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.2	± 0.2	± 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



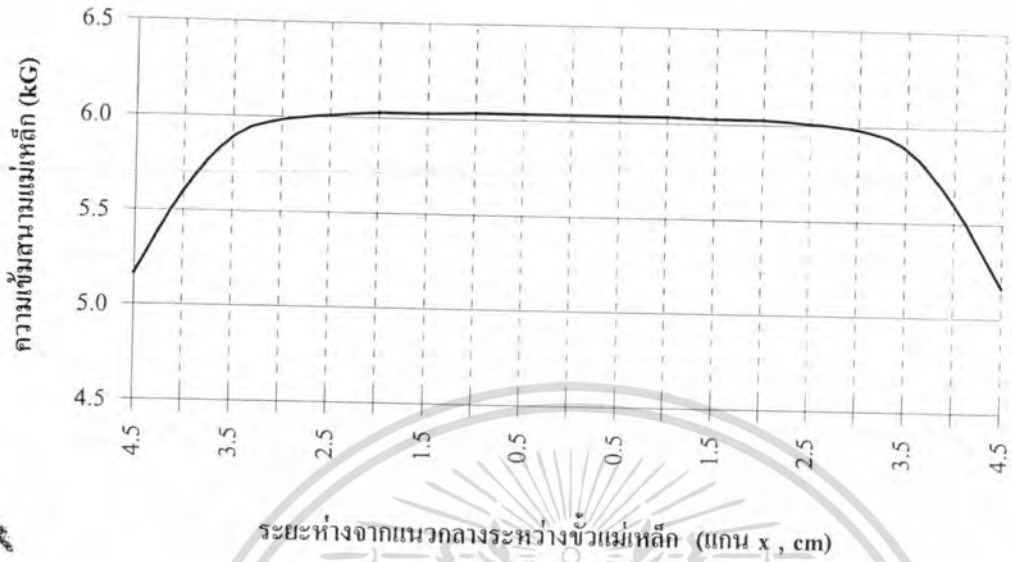
รูปที่ 4.46 กราฟค่าผลคูณความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก เมื่อใช้กระแส 5, 6, 7 A ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm.

ตารางที่ 4.24 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน x ที่ระยะ 0 - 4.5.0 cm จาก
แนวกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก

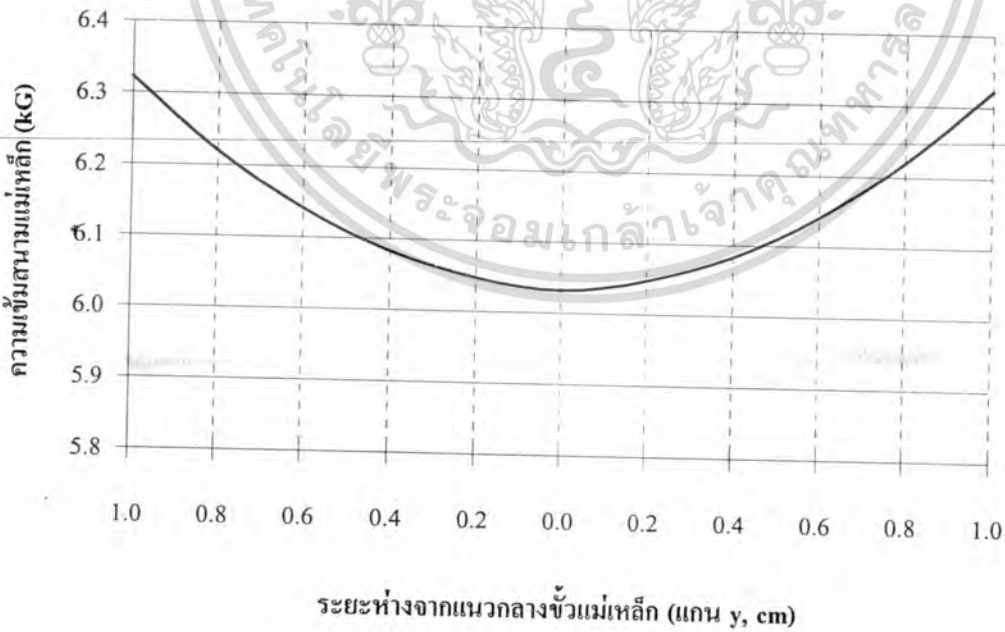
ระยะห่างจากแนวกลาง ระหว่างขั้วแม่เหล็ก (แกน x , cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก (kG)	เกรเดียนต์ $\frac{\partial H_y}{\partial x}$ (kG/cm)
4.5	5.164	0.868
4.0	5.598	0.580
3.5	5.888	0.186
3.0	5.981	0.060
2.5	6.011	0.028
2.0	6.025	0.000
1.5	6.025	0.014
1.0	6.032	0.000
0.5	6.032	0.000
-0.0	6.032	0.000
-0.5	6.032	0.000
-1.0	6.032	0.000
-1.5	6.025	0.014
-2.0	6.025	0.000
-2.5	6.011	0.028
-3.0	5.981	0.060
-3.5	5.888	0.186
-4.0	5.598	0.580
-4.5	5.164	0.868

ตารางที่ 4.25 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y ที่ระยะ 0 - 1.0 cm จากแนว
กลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก

ระยะห่างจากแนวกลาง ระหว่างขั้วแม่เหล็ก (แกน y , cm)	ความเข้มสนามแม่ เหล็ก (kG)	เกรเดียนท์ $\frac{\partial H_y}{\partial y}$ (kG/cm)
1.0	6.322	0.510
0.8	6.220	0.395
0.6	6.141	0.290
0.4	6.083	0.180
0.2	6.047	0.075
0.0	6.032	
-0.2	6.047	0.075
-0.4	6.083	0.180
-0.6	6.141	0.290
-0.8	6.220	0.395
-1.0	6.322	0.510



รูปที่ 4.47 กราฟความเข้มข้นแม่เหล็กตามแนวแกน x ที่ระยะ 0 - 4.5.0 cm จากแนวกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 4.48 กราฟความเข้มข้นแม่เหล็กตามแนวแกน y ที่ระยะ 0 - 1.0 cm จากแนวกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก

จากการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและคำนวณค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์ของสนาม เมื่อระยะห่างระหว่างขั้ว 2 และ 2.54 cm โดยใช้กระแสไฟฟ้า 5, 6 และ 7 A ตามลำดับ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 cm พบว่าบริเวณที่ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก 0.8 - 1.4 cm ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์มีค่าเกือบคงที่หรือประมาณได้ว่าคงที่ ในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.34 นั่นคือที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 cm บริเวณที่ให้ค่าผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์ มีค่าคงที่ มีระยะ 0.6 cm ซึ่งเป็นระยะที่ไม่มากนัก และที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2.54 cm กระแสไฟฟ้า 5, 6, 7 A ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เกรเดียนต์และผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนต์แสดงดังตารางที่ 4.17, 4.19 และ 4.21 และกราฟรูปที่ 4.36, 4.39 และ 4.41 ตามลำดับ จากกราฟดังกล่าวพบว่าที่ระยะห่างจากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก 0.8 - 1.8 cm ค่าผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสมการเกรเดียนต์ประมาณได้ว่ามีค่าคงที่เมื่อใช้กระแส 5 A มีค่าเท่ากับ $4.6 \pm 0.045 \text{ kG}^2/\text{cm}$. กระแส 6 A มีค่าเท่ากับ $6.4 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$ และที่กระแส 7 A มีค่าเท่ากับ $8.7 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 cm และ 2.54 cm ความกว้างของบริเวณที่ค่า $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ คงที่ คือ 0.6 cm และ 1 cm ตามลำดับและกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะมีผลต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและเกรเดียนต์ ทำให้ผลคูณของค่าทั้งสองมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะเมื่อใช้กระแส 6 A ค่า $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่า $6.4 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$ ซึ่งเป็นค่าที่มากพอสำหรับการวัดค่า

ซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาถึงปริมาตรหรือบริเวณที่ค่า $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่

จึงได้ทำการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน x และแกน y เพื่อพิจารณาค่า $\frac{\partial H_y}{\partial x}$ และค่า $\frac{\partial H_y}{\partial y}$ ที่ระยะห่าง 0 ถึง $\pm 1.0 \text{ cm}$ ตามแนวแกน x และแกน y ตามลำดับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.18, 4.19 และรูปที่ 4.41, 4.42 ซึ่งประมาณได้ว่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ในช่วง 0 ถึง $\pm 2.5 \text{ cm}$ (ช่วงความผิดพลาดเฉลี่ย 0.2%) ส่วนทางด้านแกน y ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเกือบคงที่ ที่ระยะ 0 ถึง $\pm 0.4 \text{ cm}$ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีช่วงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 0.4% แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะ 0 ถึง $\pm 0.6 \text{ cm}$ ช่วงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจะเพิ่มถึง 1% ดังนั้นการพิจารณาปริมาตรที่ค่า $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่จะพิจารณาที่ระยะทางแกน y 0 ถึง $\pm 0.4 \text{ cm}$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งด้าน x, y, z จะได้ปริมาตรที่ค่า $(H_y, \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่เท่ากับ $5.0 \times 0.8 \times 1.0 \text{ cm}^3$ ซึ่งเป็นปริมาตรที่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยได้ทำภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่มีรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 cm และสูง 0.5 cm ซึ่งค่าความสูงของของภาชนะนี้จะถูก

จำกัดโดยความกว้างของบริเวณที่ค่า $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$ คงที่เพราะการที่สารตัวอย่างวางอยู่ภายในที่ $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$ มีค่าคงที่ทำให้การวัดแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาภิรียา ระหว่างสารตัวอย่างกับสนามแม่เหล็กมีความถูกต้องมากขึ้น



บทที่ 5

การทดลอง

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและการคำนวณค่าเกรเดียนท์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 cm. และ 2.54 cm โดยใช้กระแส 5 , 6 , 7 A และได้เลือกค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามกับเกรเดียนท์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm. กระแส 6 A ซึ่งมีค่า $6.4 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$ เป็นค่าคงที่สำหรับการวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่างและ สารตัวอย่างจะวางอยู่ที่ระยะ 0.8 - 1.8 cm. จากจุดกลางขั้วแม่เหล็ก ในการทดลองวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของสารตัวอย่างเพื่อทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบกับสารบริสุทธิ์ 9 ชนิด ได้แก่ ดีบุก ออกไซด์ SnO_2 (99.98 %) วานาเดียมออกไซด์ V_2O_5 (99.99%) คอปเปอร์ออกไซด์ CuO (99.998 %) ซาเมเรียมออกไซด์ Sm_2O_3 (99.9%) นิกเกิลออกไซด์ NiO (99.999%) โคบอลต์ออกไซด์ Co_2O_3 (99.998 %) นีโอเดียมออกไซด์ Nd_2O_3 (99.99%) แมงกานีสออกไซด์ Mn_2O_3 (98 %) และ เกโดลิเนียมออกไซด์ Gd_2O_3 (99.999%) โดยได้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ($26-29^\circ\text{C}$) ซึ่งสารตัวอย่างที่เลือกนี้มีทั้งสาร ไดอะแมกเนติก สารพาราแมกเนติกอย่างอ่อนและสารพาราแมกเนติกอย่างแรง ค่าซัสเซพติบิลิตีอยู่ในช่วง -0.3 ถึง $147 \frac{\text{emu}}{\text{gOe}}$ และสามารถเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับค่าที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานจากหนังสือ CRC Hand book Chemistry and Physics ทั้งนี้เพื่อต้องการตรวจสอบความถูกต้องในการวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ผลที่ได้นั้นจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

5.1 แรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.2 เราทราบแล้วว่าทองแดงเป็นสารแม่เหล็กชนิดไดอะอย่างอ่อนและมีค่าซัสเซพติบิลิตี (χ) เท่ากับ $0.086 \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$ เมื่อวางระหว่างขั้วแม่เหล็กที่มีค่า ($H_y \frac{\partial H_z}{\partial z}$) เท่ากับ $6.4 \text{ kG}^2/\text{cm}$ แล้วค่า F_z ที่ได้ตามสมการที่ (3.17) จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสารแม่เหล็กไดอะชนิดอื่น ๆ ประกอบกับทองแดงมีสมบัติทางกลที่เหนียวสามารถทำให้เป็นแผ่นหรือขึ้นรูปได้ง่าย ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกทองแดงเป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง โดยได้ทำเป็นกระเปาะรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 cm สูง 0.5 cm และแขวนกับเครื่องชั่ง โดยใช้แท่งแก้วที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอгуฏาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าชั้สเขตพิบัติติของสารตัวอย่าง

ในการทำการทดลองวัดค่าชั้สเขตพิบัติติของสารตัวอย่าง ได้กำหนดขั้นตอนการวัดค่าต่างๆ ดังนี้

5.2.1 บรรจุสารตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าชั้สเขตพิบัติติลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่างแล้วนำไปชั่งน้ำหนักโดยการแขวนกับเครื่องชั่ง อ่านค่าน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นค่า F_g^0 ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้ $m_1 = F_g^0 - F_{c0}$ กรัม

5.2.2 เพิ่มกระแสแก่เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กจนกระทั่งถึงค่ากระแสที่ต้องการ ค่าแรงเมื่อเพิ่มกระแส อ่านเป็นค่า F_g^1 แรงที่เปลี่ยนแปลงไป $\Delta F_{sc} = F_g^0 - F_g^1$ กรัม

5.2.3 แรงปฏิกริยาระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่างหาได้จาก $\Delta F = \Delta F_{sc} - \Delta F_c$

5.2.4 ลดค่ากระแสไฟฟ้าจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์แอมแปร์ อ่านค่าน้ำหนักที่ได้เป็นค่า F_g^0

5.2.5 ทำซ้ำข้อ 5.2.2 - 5.2.4 ทุกครั้งบันทึกค่า F_g^0 และค่า F_g^1 อย่างน้อย 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

จากค่า $(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z})$ ปริมาณสารตัวอย่าง m_1 แรงแม่เหล็กระหว่างสนามแม่เหล็กกับสารตัวอย่าง (ΔF) แทนค่าทั้งสามนี้ลงในสมการที่ (3.23) ก็จะได้ค่าชั้สเขตพิบัติติของสารตัวอย่าง ดังตัวอย่างการคำนวณค่าชั้สเขตพิบัติติของสารโคบอลต์ไฮดรอกไซด์

เมื่อ

$$F_{c0} = 0.185648 \text{ g}; \text{ น้ำหนักของภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง}$$

$$F_{c1} = 0.185954 \text{ g}; \text{ น้ำหนักของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างในสนามแม่เหล็ก (กระแส 6A)}$$

ได้ค่าแรงแม่เหล็กของภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \Delta F_c &= F_{c1} - F_{c0} \\ &= 0.185954 - 0.185648 \\ &= 3.06 \times 10^{-4} \text{ g} \end{aligned}$$

จากข้อ 5.2.1 ถ้าค่า F_g^0 อ่านได้เท่ากับ 0.189333 g จะได้ปริมาณของสารตัวอย่าง (m_1) จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.189333 - 0.185648 \quad g$$

$$= 3.685 \times 10^{-3} g$$

จากข้อ 5.2.2 ถ้าค่า F_g^1 อ่านได้ เท่ากับ 0.186606 g แรงแม่เหล็กของสารตัวอย่างและ
ภาวะบรรจุนหาได้จาก

$$\Delta F_{sc} = F_g^1 - F_g^0$$

$$= 0.186606 - 0.185648$$

$$= 9.58 \times 10^{-4} g$$

แรงแม่เหล็กของสารตัวอย่างหาได้จาก

$$\Delta F = \Delta F_{sc} - \Delta F_c$$

$$= 9.58 \times 10^{-4} - 3.06 \times 10^{-4} g$$

$$= 6.52 \times 10^{-4} g$$

$$= 0.63896 \text{ dyne}, (1g = 9.8 \times 10^2 \text{ dyne})$$

นั่นคือแรงแม่เหล็กที่กระทำกับสารตัวอย่าง Co_2O_3 มวล $3.685 \times 10^{-3} g$ มีขนาด 0.63896
dyne และหาค่า susceptibility ได้จากสมการ

$$\chi = \frac{\Delta F}{m_1 H_y} \frac{\text{dyne}}{g(\text{Oe}^2/\text{cm})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\chi = 27.093 \times 10^{-6} \frac{\text{emu}}{\text{gOe}}$$

ตัวอย่างข้างต้นนี้เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าชัศเชิงเพดิบิลิตี้อย่างละเอียด ในทางปฏิบัติการวัดค่าชัศเชิงเพดิบิลิตีของแต่ละสารตัวอย่างได้ทำการวัดหลายๆครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย และเครื่องชั่งรุ่น MT5 (Microbalance) ที่ใช้นั้นสามารถปรับศูนย์ (Re-Zero) น้ำหนักที่ชั่งอยู่ขณะนั้นได้ ทำให้อ่านค่ามวลสารตัวอย่าง (m_i) แรงแม่เหล็กระหว่างภาชนะบรรจุสารตัวอย่างกับสนามแม่เหล็ก (ΔF_c) และแรงแม่เหล็กเมื่อบรรจุสารตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง (ΔF_{sc}) ได้โดยตรงและรวดเร็วขึ้น

5.3 ความถูกต้องในการวัด

ในการใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นวัดค่าชัศเชิงเพดิบิลิตีของสารตัวอย่างสิ่งสำคัญในการวัดที่ควรพิจารณาถึงอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความถูกต้องและความผิดพลาดในการวัดการพิจารณาค่าดังกล่าวของเครื่องมือได้พิจารณาจากค่าที่วัดได้ของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างในสนามแม่เหล็กดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าน้ำหนักภาชนะบรรจุสารตัวอย่างในสนามแม่เหล็ก

ค่าที่อ่านได้ (μg)								ค่าเฉลี่ย	ช่วงความผิดพลาดเฉลี่ย
1	2	3	4	5	6	7	8	(μg)	(μg)
268	265	268	265	266	267	268	265	266.50	± 1.500
271	274	271	273	272	273	272	273	272.375	± 1.488
270	272	271	272	271	272	270	271	271.125	± 1.000

จากค่าน้ำหนักของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในสนามแม่เหล็กที่อ่านได้หาช่วงความผิดพลาดเฉลี่ยที่หาได้จาก $\{(ค่าที่อ่านได้มากที่สุด - ค่าเฉลี่ย) + (ค่าเฉลี่ย - ค่าที่อ่านได้น้อยที่สุด)/2\}$ ได้ช่วงความผิดพลาดเฉลี่ยมากที่สุดมีค่า $\pm 1.5 (\mu\text{g})$ (ประมาณ $\pm 2 \mu\text{g}$) ดังนั้นในการพิจารณาค่าความถูกต้อง ในการวัดจะใช้ค่าความผิดพลาด ในการอ่านของระบบวัดมีค่าเท่ากับ $\pm 2 \mu\text{g}$ นั่นคือในการอ่านน้ำหนักที่ชั่งในแต่ละครั้งจะมีค่าความผิดพลาดอยู่ $\pm 2 \mu\text{g}$ เสมอ จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3.23) ค่าชั้สเขตบิลิตี คำนวนได้จากค่าแรงปฏิภริยาระหว่างสารตัวอย่าง (ΔF) มวลของสารตัวอย่าง (m_1) และผลภณระหว่างค่าสนามกับเกรเดียนท์ $\left(H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)$ จากค่าทั้งสามจะได้อ่า

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}}{H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}}\right)^2} \quad (5.1)$$

จากสมการที่ 5.1 สาม ารถลดค่าความผิดพลาดในการวัด ได้โดยการพิจารณาถึงชนิดของสารตัวอย่าง ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่และค่าผลภณระหว่างความเข้มสนามกับเกรเดียนท์ จากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการชั่งน้ำหนัก $\Delta m_1 = 2 \mu g$ หรือ $\Delta F \approx 0.002 \text{ dyne}$ และจากตารางที่ (4.20) ค่า $\Delta H_y \frac{\partial H_y}{\partial z} = 0.1 \text{ kG}^2 / \text{cm}$ แทนค่าในสมการที่ (5.1) จะได้อ่า

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{0.002}{F}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 10^{-6}}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{6.4}\right)^2} \quad (5.2)$$

ถ้าปริมาณของสารตัวอย่าง (m_1) มีค่ามาก แรง F ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในการวัดได้ แต่อย่างไรก็ตามการวัดค่าชั้สเขตบิลิตีของสารตัวอย่าง ได้ทำการทดลองวัดที่ปริมาณสารตัวอย่างน้อย ๆ ด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งผลการวัดค่าชั้สเขตบิลิตีของสารต่าง ๆ จะได้อ่ากล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.4 การทดลองวัดค่าชั้สเขตบิลิตีสารตัวอย่าง

ผลการทดลองวัดค่าชั้สเขตบิลิตีของสารตัวอย่างแต่ละชนิด ได้ใช้สารปริมาณที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการทดสอบเครื่องมือและหาปริมาณสารที่เหมาะสมของสารตัวอย่างแต่ละชนิด สารตัวอย่างที่ใช่และผลการวัดมีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 สารตัวอย่าง ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) มีลักษณะเป็นผงสี เทาบริสุทธิ์ 99.998 % ผลิตโดยบริษัท โทเทคเคมิกอล จำกัด ประเทศไทย ผลการทดลองวัดค่าฮอลล์เซเพทิบิลิตี เมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่างต่าง ๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองวัดค่าฮอลล์เซเพทิบิลิตีของดีบุกออกไซด์ (SnO_2) โดยใช้ปริมาณของสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าฮอลล์เซเพทิบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						เฉลี่ย	ค่าจริง
	1	2	3	4	5			
6.303	-0.272	-0.248	-0.248	-0.272	-0.248	-0.258±0.005	-0.272	
9.156	-0.284	-0.284	-0.267	-0.267	-0.267	-0.274±0.004		
12.656	-0.285	-0.285	-0.261	-0.261	-0.261	-0.275±0.005		
16.756	-0.269	-0.278	-0.259	-0.269	-0.278	-0.270±0.003		
21.010	-0.265	-0.272	-0.272	-0.265	-0.265	-0.269±0.002		
33.717	-0.269	-0.265	-0.260	-0.269	-0.265	-0.266±0.002		

ผลการทดลองวัดค่าฮอลล์เซเพทิบิลิตีของดีบุกออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 16.756 mg จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	-0.278
ค่าต่ำสุด	-0.259
ค่าเฉลี่ย	-0.270±0.003
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±0.007
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.74%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 สารตัวอย่าง วานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อนบริสุทธิ์ 99.99 % ผลิตโดยบริษัท โทเทเคมีคอล จำกัด ประเทศไทย ผลการทดลองวัดค่าซีเซพติบิลิตี เมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่างต่าง ๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองวัดค่าซีเซพติบิลิตีของ วานาเดียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าซีเซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						เฉลี่ย	ค่าจริง
	1	2	3	4	5			
6.277	0.707	0.732	0.659	0.707	0.683	0.698 \pm 0.011	0.707	
9.121	0.705	0.705	0.671	0.705	0.689	0.695 \pm 0.006		
15.461	0.693	0.654	0.663	0.654	0.693	0.671 \pm 0.008		
22.150	0.684	0.691	0.691	0.678	0.691	0.687 \pm 0.002		
29.753	0.680	0.685	0.674	0.680	0.690	0.682 \pm 0.002		

ผลการทดลองวัดค่าซีเซพติบิลิตีของวานาเดียมออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสาร ตัวอย่าง 6.277 mg จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	0.732
ค่าต่ำสุด	0.659
ค่าเฉลี่ย	0.698 \pm 0.011
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	\pm 0.025
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	1.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 สารตัวอย่าง คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีลักษณะเป็นผงสีดำบริสุทธิ์ 99.99 %
ผลิตโดยบริษัท โค้ทเคมีคอล จำกัด ประเทศอังกฤษ ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตี เมื่อใช้
ปริมาณสารตัวอย่างต่างๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตีของคอปเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างต่างๆ
ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าซ์เซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ค่าจริง
0.263	3.415	2.841	2.770	2.846	2.846	2.944 ± 0.106	
0.594	3.092	2.836	2.578	2.836	3.092	2.887 ± 0.086	
0.902	3.141	2.971	3.141	2.971	2.800	3.005 ± 0.057	
12.613	2.987	2.926	2.962	2.962	2.987	2.950 ± 0.013	3.004
15.874	3.038	3.096	3.077	3.057	3.000	3.054 ± 0.015	
20.093	3.087	3.095	3.079	3.101	3.087	3.090 ± 0.003	
47.75	3.079	3.097	3.091	3.053	3.062	3.076 ± 0.007	

ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตีของคอปเปอร์ออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง
0.902 mg จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	3.141
ค่าต่ำสุด	2.800
ค่าเฉลี่ย	3.005 ± 0.057
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.127
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.03%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 สารตัวอย่าง ซาเมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) มีลักษณะเป็นผงสีขาวบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท โค้ทเคมีคอล จำกัด ประเทศอังกฤษ ผลการทดลองวัดค่าซัสเซพติบิลิตี เมื่อใช้ ปริมาณสารตัวอย่างต่าง ๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของซาเมเรียมออกไซด์โดยใช้ปริมาณของสาร ตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าซัสเซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						ค่าจริง
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
6.821	5.636	5.636	5.659	5.569	5.704	5.641 ± 0.020	
11.185	5.752	5.629	5.766	5.641	5.629	5.683 ± 0.028	
16.551	5.664	5.654	5.645	5.654	5.645	5.652 ± 0.003	5.699
21.916	5.849	5.801	5.863	5.787	5.808	5.822 ± 0.013	
46.268	5.952	5.920	5.956	5.913	5.946	5.937 ± 0.008	

ผลการทดลองวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของซาเมเรียมออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 6.821 mg จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	5.766
ค่าต่ำสุด	5.629
ค่าเฉลี่ย	5.683 ± 0.028
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.062
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.28%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.5 สารตัวอย่างนิกเกิลออกไซด์ (NiO) มีลักษณะเป็นผงสีเขียวอ่อนบริสุทธิ์ 99.999% ผลิตโดยบริษัท โล่เทคมีคอล จำกัด ประเทศอังกฤษ ผลการทดลองวัดค่าซ์สเซพติบิลิตี เมื่อใช้ ปริมาณสารตัวอย่างต่างๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองวัดค่าซ์สเซพติบิลิตีของนิกเกิลออกไซด์ โดยใช้ปริมาณของสารตัวอย่าง ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าซ์สเซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						ค่าจริง
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
0.864	8.864	8.864	8.510	8.687	8.687	8.722 ± 0.059	8.835
1.129	9.198	8.746	8.819	8.746	8.819	8.866 ± 0.076	
1.955	8.775	8.696	8.775	8.696	8.775	8.743 ± 0.017	
3.250	8.578	8.955	9.096	9.191	9.096	8.983 ± 0.097	
7.899	9.037	8.939	8.901	8.959	8.901	8.947 ± 0.022	

ผลการทดลองวัดค่าซ์สเซพติบิลิตีของนิกเกิลออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 1.955 mg จะให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	9.198
ค่าต่ำสุด	8.746
ค่าเฉลี่ย	8.866 ± 0.076
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.169
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.35%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.6 สารตัวอย่างโคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3) มีลักษณะเป็นผงสีดำบริสุทธิ์ 99.998 % ผลิตโดยบริษัท โค้ทเคมีคอล จำกัดประเทศไทย ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตี เมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่างต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีของโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณของสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าชั้สเซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						ค่าจริง
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
0.304	27.200	27.699	27.200	26.696	26.696	27.098 ± 0.168	27.493
0.710	27.951	27.088	27.735	27.088	27.303	27.433 ± 0.157	
3.685	27.259	27.093	27.009	27.093	27.051	27.101 ± 0.038	
10.374	27.026	27.145	27.115	26.977	27.085	27.070 ± 0.027	
22.533	27.107	27.101	27.142	27.086	27.080	27.103 ± 0.009	
32.307	27.465	27.484	27.508	27.474	27.455	27.104 ± 0.008	

ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีของ โคบอลต์ออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 0.710 mg เป็นปริมาณสารตัวอย่างที่ให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	27.951
ค่าต่ำสุด	27.088
ค่าเฉลี่ย	27.433 ± 0.157
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.351
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.22%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.7 สารตัวอย่าง นีโอติเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3) มีลักษณะเป็นผงสีม่วงอ่อนบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท โค้ทเคมีคอล จำกัดประเทศไทย ผลการทดลองวัดค่าชั้สเขตพิบัติ เมื่อใช้ ปริมาณสารตัวอย่างต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองวัดค่าชั้สเขตพิบัติของนีโอติเมียมออกไซด์ โดยใช้ปริมาณของสาร ตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าชั้สเขตพิบัติ ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						ค่าจริง
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
5.793	28.922	28.976	28.976	28.922	29.003	28.922±0.014	30.321
10.094	29.582	29.428	29.367	29.659	29.489	29.505±0.047	
22.465	29.259	29.259	29.273	29.245	29.266	29.260±0.004	
27.701	29.031	29.059	29.026	29.009	29.042	29.033±0.047	

ผลการทดลองวัดค่าชั้สเขตพิบัติของนีโอติเมียมออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสาร ตัวอย่าง 10.094 mg เป็นปริมาณสารตัวอย่างที่ให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	29.659
ค่าต่ำสุด	29.367
ค่าเฉลี่ย	29.505±0.047
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±0.105
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	2.69%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.8 สารตัวอย่างแมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3) มีลักษณะเป็นผงสีดำบริสุทธิ์ 98 % ผลิตโดยบริษัทโกทเคมีคอล จำกัด ประเทศอังกฤษ ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตี เมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่างต่าง ๆ กัน ได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตีของแมงกานีสออกไซด์โดยใช้ปริมาณของสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าซ์เซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} emu/gOe$)						ค่าจริง
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
0.380	89.462	89.871	89.462	90.279	89.871	89.789 \pm 0.137	89.308
3.870	88.566	88.165	88.406	88.446	88.394	88.395 \pm 0.058	
7.165	89.022	88.979	88.957	89.001	89.066	88.993 \pm 0.010	
12.341	89.269	89.483	89.509	89.370	89.395	89.405 \pm 0.038	
29.845	89.279	89.264	89.295	89.279	89.253	89.274 \pm 0.006	
33.432	89.431	89.242	89.270	89.298	89.256	89.281 \pm 0.016	

ผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตีของผลการทดลองวัดค่าซ์เซพติบิลิตีของโคแมงกานีสไตรออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 29.845 และ 33.432 mg ค่าที่ได้มีค่าเกือบเท่ากัน แต่ปริมาณสารตัวอย่าง 33.432 mg เป็นปริมาณสารตัวอย่างที่ให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} emu/g \cdot Oe$
ค่าสูงสุด	89.431
ค่าต่ำสุด	89.242
ค่าเฉลี่ย	89.299 \pm 0.031
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	\pm 0.068
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	0.01%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.9 สารตัวอย่าง แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) มีลักษณะเป็นผงสีขาวบริสุทธิ์ 99.999 % ผลิตโดยบริษัท โค้ทเคมีคอล จำกัด ประเทศอังกฤษ ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตี เมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่างต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีของ แกโดลิเนียมออกไซด์โดยใช้ปริมาณของสารตัวอย่างต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณสาร ตัวอย่าง (mg)	ค่าชั้สเซพติบิลิตี ($\chi \times 10^{-6} \text{ emu/gOe}$)						
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	ค่าจริง
0.897	136.584	136.757	135.891	137.103	136.411	136.549 ± 0.179	146.759
7.472	143.683	143.849	143.600	143.725	143.683	143.732 ± 0.041	
9.290	144.916	144.899	144.949	144.967	144.949	144.936 ± 0.011	
13.044	143.816	143.744	143.542	143.709	143.851	143.766 ± 0.047	
14.914	144.077	143.909	144.035	143.931	143.952	143.981 ± 0.029	

ผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีของผลการทดลองวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีของแกโดลิเนียมออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 9.290 mg เป็นปริมาณสารตัวอย่างที่ให้ค่าความถูกต้องในการวัดสูงสุดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าที่วัดได้	$\chi \times 10^{-6} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
ค่าสูงสุด	144.949
ค่าต่ำสุด	144.899
ค่าเฉลี่ย	144.936 ± 0.011
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	± 0.025
ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด	1.24%

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างเครื่องมือเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์ของสารตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจากการออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ทำการวัดค่าความเข้มสนามและคำนวณค่าเกรเดียนท์ของ สนาม เพื่อหาบริเวณที่ค่าผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนามกับค่าเกรเดียนท์มีค่าคงที่ เพื่อใช้เป็นค่าคง ที่ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ในการสร้างเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก สามารถสรุปถึงประสิทธิภาพ ของเครื่องได้ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กกำเนิดสนามให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่ระยะห่าง ระหว่างขั้ว 1, 2.54 และ 5.10 cm ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 16.90, 11.55 และ 6.85 kG เมื่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 12 A ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 13.20, 7.63, 3.65 kG ตามลำดับที่กระแส ไฟฟ้า 6 A และจากการตรวจสอบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm โดยใช้ ขั้วแกนแม่เหล็กสำหรับสร้างเกรเดียนท์ กระแส 6 A วัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ 6261, 5004, 4006, 2003 G พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลา

2. ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและเกรเดียนท์ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 5, 6 และ 7 A ที่ ให้ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2.0 cm และ 2.54 cm พบว่าค่าผลคูณระหว่างค่าความเข้มสนาม แม่เหล็กกับเกรเดียนท์ของสนามที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 cm มีค่าสูง แต่ระยะที่ค่าดังกล่าว คงที่มีขนาดความกว้าง 0.6 cm เท่านั้น ส่วนที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm บริเวณที่ค่าผลคูณคงที่ มีความกว้าง 1 cm ซึ่งมีค่าเท่ากับ $6.4 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$ และปริมาตรที่ค่านี้คงที่เท่ากับ 4 cm^3 เมื่อใช้ กระแส 6 A และได้ $8.6 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$ เมื่อใช้กระแส 7 A และที่ระยะระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2.54 cm กระแสไฟฟ้า 6 A ค่าผลคูณระหว่างเกรเดียนท์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ($H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$) มีค่า เพียงพอและเหมาะสมที่จะใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 6.1 ประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดค่าชั้สเซพติบิลิตีที่สร้างขึ้น (ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.54 cm กระแสไฟฟ้า 6 A)

ความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้า 6 A (ขั้วแม่เหล็กปาดเรียบ)	7.6 kG
ผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนท์ ($H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$)	$6.4 \pm 0.1 \text{ kG}^2/\text{cm}$
ปริมาตร (ค่า $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z}$ คงที่)	$1.0 \times 0.8 \times 5.0 \text{ cm}^3$
ความไวในการวัด แรงแม่เหล็ก (ΔF) โมเมนต์แม่เหล็ก (μ) ในเทอม ($w\chi$) ค่าชั้สเซพติบิลิตี (χ) (เมื่อ $H_y \frac{\partial H_y}{\partial z} = 6.4 \text{ kG}^2/\text{cm}$, $w = 10 \text{ mg}$)	$> 2 \times 10^{-6} \text{ g}$ $> 2 \times 10^{-6} \text{ emu}$ $> 3 \times 10^{-10} \text{ emu/Oe}$ $> 3 \times 10^{-8} \text{ emu/g} \cdot \text{Oe}$
สารตัวอย่าง	ไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก
ลักษณะสารตัวอย่าง	ของแข็ง ผึ่งและผง

3. จากการนำสารบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นสารมาตรฐานมาวัดค่าชั้สเซพติบิลิตี โดยใช้กระแสไฟฟ้า 6 A ค่าที่วัดได้ของแต่ละตัวอย่างสรุปได้ดังตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ค่าชัศเชิงพหุขัณขัณที่ วัดได้โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นกับค่ามาตรฐาน และค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด

สารตัวอย่าง	ความบริสุทธิ์	ปริมาณสารตัวอย่าง	ค่าชัศเชิงพหุขัณขัณ		ความคลาดเคลื่อนในการวัด* ³
	(%)		(mg)	ค่าที่วัดได้	
SnO ₂	99.98	16.756 ^{*2}	-0.270±0.003	-0.272	0.74
V ₂ O ₅	99.99	9.121 ^{*2}	0.698±0.011	0.707	1.27
CuO	99.998	0.902 ^{*2}	3.005±0.057	3.004	0.03
Sm ₂ O ₃	99.9	11.185 ^{*1}	5.683±0.028	5.699	0.28
NiO	99.999	1.129 ^{*1}	8.866±0.076	8.835	0.35
Co ₂ O ₃	99.998	0.710 ^{*1}	27.433±0.027	27.493	0.22
Nd ₂ O ₃	99.99	10.094 ^{*1}	29.505±0.047	30.321	2.69
Mn ₂ O ₃	98	33.432 ^{*1}	89.281±0.016	89.308	0.01
Gd ₂ O ₃	99.999	9.290 ^{*1}	144.936±0.011	146.759	1.24

*1 เป็นปริมาณสารตัวอย่างเมื่อภาชนะบรรจุสารหนัก 0.185648 g

*2 เป็นปริมาณสารตัวอย่างเมื่อภาชนะบรรจุสารหนัก 0.116754 g

*3 ความคลาดเคลื่อนในการวัด = {(ค่ามาตรฐาน - ค่าที่วัดได้) / ค่ามาตรฐาน} × 100

สารตัวอย่างดีบุกออกไซด์ (SnO₂ 99.98%) วัดค่าชัศเชิงพหุขัณขัณเฉลี่ยได้

-0.270±0.003×10⁻⁶ ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.74% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้พบว่าใช้สารตัวอย่าง ดีบุกออกไซด์

16.756 mg ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด

วานาเดียมออกไซด์ (V₂O₅ 99.99%) วัดค่าชัศเชิงพหุขัณขัณเฉลี่ยได้ 0.689±0.011×10⁻⁶

emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 1.27% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้พบว่าใช้สารตัวอย่างวานาเดียมออกไซด์ 6.277 mg ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด

สารตัวอย่างคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO 99.998%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $3.005 \pm 0.057 \times 10^{-6}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.03% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าใช้สารตัวอย่างคอปเปอร์ออกไซด์ จำนวน 0.902 mg ให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากที่สุด

ซามเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3 99.9%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $5.683 \pm 0.028 \times 10^{-6}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.28% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าใช้สารตัวอย่างซามเรียมออกไซด์ จำนวน 11.185 mg ให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากที่สุด

นิกเกิลออกไซด์ (NiO 99.999%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $8.866 \pm 0.076 \times 10^{-6}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.35% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าใช้สารตัวอย่างนิกเกิลออกไซด์จำนวน 1.129 mg ให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากที่สุด

สารตัวอย่างโคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3 99.998%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $27.433 \pm 0.008 \times 10^{-6}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.22% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าใช้สารตัวอย่างโคบอลต์ออกไซด์จำนวน 0.710 mg ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด

นีโอดิเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3 99.99%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $29.505 \pm 0.47 \times 10^{-6}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 2.69% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าใช้สารตัวอย่างนีโอดิเมียมออกไซด์จำนวน 10.094 mg ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด

สารตัวอย่างแมงกานีสออกไซด์ (Mn_2O_3 98%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $89.299 \pm 0.003 \times 10^{-10}$ emu/gOe ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 0.01% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช่พบว่าสารตัวอย่างแมงกานีสออกไซด์ 33.432 mg ให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกโดลิเนียมออกไซด์ Gd_2O_3 (99.999%) วัดค่าซัสเซพติบิลิตีเฉลี่ยได้ $144.936 \pm 0.011 \times 10^{-10} \text{ emu/gO}_2$ ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานเป็น 1.24% และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ พบว่าสารตัวอย่างแกโดลิเนียมออกไซด์ 9.290 mg ให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากที่สุด

จากการวัดค่าซัสเซพติบิลิตีสารตัวอย่าง 9 ชนิด ประกอบด้วยดีบุกออกไซด์ซึ่งเป็นสารไดอะแมกเนติกและ วานาเดียมออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ ซาเมเรียมออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ นีโอดีเมียมออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และแกโดลิเนียมออกไซด์เป็นสารพาราแมกเนติก พบว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดได้อย่างถูกต้อง ดังค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ในส่วนของสารเฟอร์โรแมกเนติกนั้น ไม่ได้ทำการวัดทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในการจัดหาสารตัวอย่างที่เป็นสารมาตรฐานผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบสารตัวอย่างจำนวน 9 ชนิด และเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าซัสเซพติบิลิตีของสารดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง

ในอนาคตการพัฒนาเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตี จะต้องพัฒนาทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ทางด้านฮาร์ดแวร์ควรติดตั้งอุปกรณ์ช่วยวัด อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อที่จะใช้กับสารตัวอย่างได้หลากหลายยิ่งขึ้น ในส่วนทางด้านซอฟต์แวร์ สามารถช่วยในการเก็บข้อมูลและประมวลผลซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ได้อย่างมาก และเนื่องจากว่าเครื่องมือนี้ใช้เครื่องซิงค์ที่มีความละเอียดถึง 1 ไมโครกรัม การที่จะอ่านค่าให้ได้ถูกต้องแม่นยำนั้นเครื่องซิงค์ต้องวางอยู่ในตำแหน่งที่สามารถทำให้ลดการสั่นสะเทือนจากสาเหตุต่าง ๆ ได้และสารตัวอย่างจะต้องนิ่งไม่สั่นสะเทือนในขณะที่ทำการวัด ห้องหรือตู้ที่สามารถควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ในการวัดนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาเครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีให้มีประสิทธิภาพสูง

บรรณานุกรม

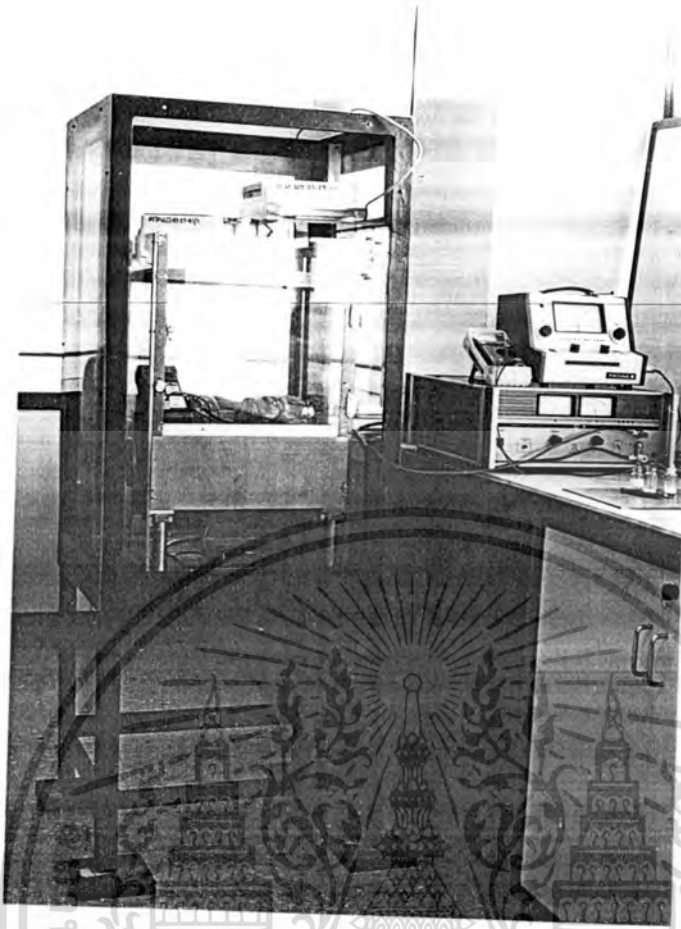
- 1) D.J Kroon, Laboratory Magnets, pp 70-71, Cleaver-Hume Led, Netherland, 1968
- 2) วารสารวิทยาศาสตร์ หน้า 34-41 ปี 2537
- 3) R.D.Heyding, J.B.Taylor, and M.T.Hairt, Rev. Sci. Instrum. 32, 160-162, (1961).
- 4) B.D.Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1972
- 5) CRC Hand book of Chemistry and Physics , 60th ed., 1980, p, E-123-129
- 6) D.J Kroon, Laboratory Magnets, pp 6-9, Cleaver-Hume Led, Netherland, 1968
- 7) R.H. Martin , and G.J.Hill, J.Phys.E: Sci.Instrum 1 , 1257-1259, (1968).
- 8) William, and F.Smith, Principle of Material Science and Engineering, Second Edition McGraw-Hill Publishing Company, Singapore 1990.
- 9) Davit Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall, 1991
- 10) John Crangle, Solid State Magnetism, Hodder and Stoughton, Great Britain, 1991
- 11) W.Bolton, Measurement and Instrumentation System, Hartnolls Limited, Great Britain-1996



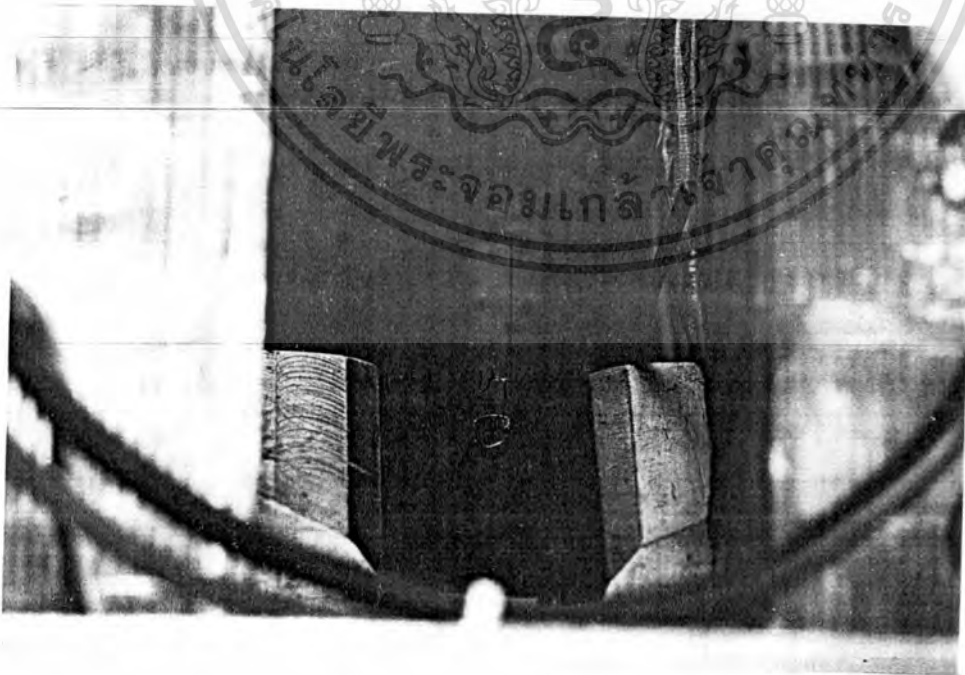
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



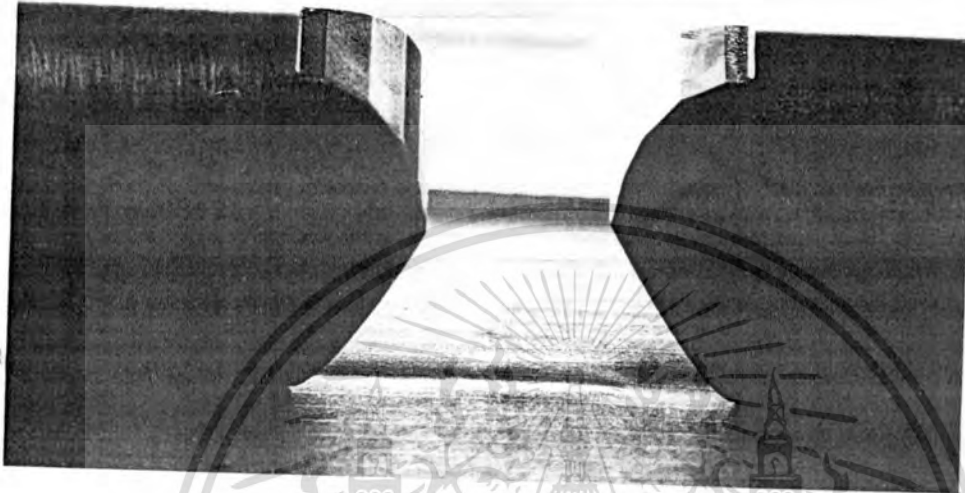


เครื่องมือวัดค่าซัสเซพติบิลิตีที่ไดพัฒนากัน

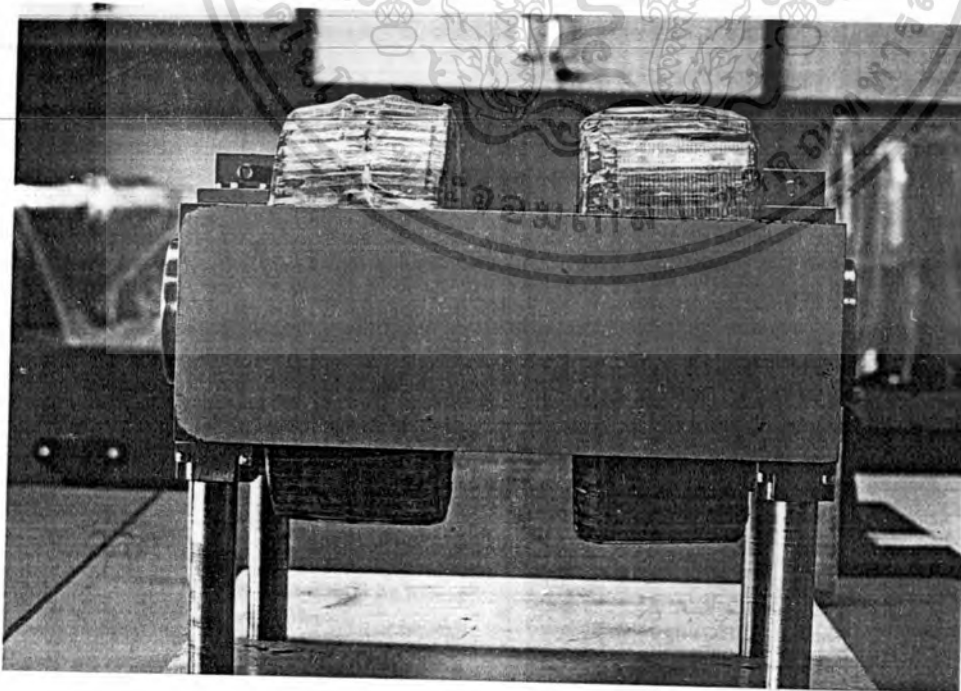


รูปตำแหน่งของสารตัวอย่างที่แขวนอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปลักษณะของขั้วแม่เหล็กสำหรับสร้างเกรเดียนที่สนามแม่เหล็ก
เพื่อให้ค่าผลคูณระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเกรเดียนที่มีค่าคงที่



รูปเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNITS AND CONVERSIONS

Magnetism

cgs units

$$B = H + 4\pi M$$

B in gauss

H in oersteds

M in emu/cm³

$$\mu (\text{vacuum}) = 1$$

mks units

$$B = \mu_0 H + M$$

B in webers/meter² (tesla)

H in amperes/meter

M in webers/meter²

$$\mu_0 (\text{Vacuum}) = 4\pi \times 10^{-7}$$

weber/ampere meter

cgs to mks

$$B: 1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ webers/meter}^2$$

$$H: 1 \text{ oersteds} = 79.6 \text{ amperes/meter}$$

$$M: 1 \text{ emu/cm}^3 = 12.57 \times 10^{-4} \text{ weber/meter}^2$$

$$\Phi: 1 \text{ maxwell} = 10^{-8} \text{ weber}$$

mks to cgs

$$1 \text{ webers/meter}^2 = 10^4 \text{ gauss}$$

$$1 \text{ amperes/meter} = 12.57 \times 10^3 \text{ Oe}$$

$$1 \text{ webers/meter}^2 = 796 \text{ emu/cm}^3$$

$$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ maxwells}$$

Length

$$1 \text{ angstrom} (\text{\AA}) = 10^{-8} \text{ cm}$$

$$1 \text{ micron} (\mu) = 10^{-6} \text{ meter}$$

$$= 10^{-4} \text{ cm}$$

$$= 10^{-4} \text{ \AA}$$

$$1 \text{ cm} = 0.394 \text{ in.}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$10^3 \text{ in} = 1 \text{ mil} = 25.4 \mu$$

$$1 \mu = 39.4 \times 10^{-6} \text{ in}$$

Mass

$$1 \text{ kg} = 2.205 \text{ lb}$$

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$$

Energy

$$1 \text{ cal} = 4.19 \times 10^7 \text{ ergs}$$

$$1 \text{ ergs} = \times 10^7 \text{ joule}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{12} \text{ erg}$$

$$1 \text{ erg} = 2.39 \times 10^{-8} \text{ cal}$$

$$1 \text{ joule} = 10^7 \text{ ergs}$$

$$1 \text{ erg} = 6.25 \times 10^{11} \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stress and energy density

$$1 \text{ dyne/cm}^2 = 1.02 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 1.45 \times 10^5 \text{ lb/in}^2$$

$$1 \text{ lb/in}^2 = 6.90 \times 10^4 \text{ dyne/cm}^2$$

$$= 7.03 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^2$$

$$1 \text{ kg/mm}^2 = 9.80 \times 10^7 \text{ dynes/cm}^2$$

$$= 1420 \text{ lb/in}^2$$

$$1 \text{ erg/cm}^3 = 10^{-1} \text{ joule/meter}^3$$

$$1 \text{ joule/meter}^3 = 10 \text{ ergs/cm}^3$$

Power

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/sec}$$

$$= \times 10^7 \text{ ergs/sec}$$

$$= 0.239 \text{ cal/sec}$$

Core loss per unit weight

$$1 \text{ watt/kg} = 0.454 \text{ watt/lb}$$

$$1 \text{ watt/lb} = 2.05 \text{ watt/kg}$$

Metric prefixes

$$10^{12} \text{ tera } T$$

$$10^{-2} \text{ centi } c$$

$$10^9 \text{ giga } G$$

$$10^{-3} \text{ milli } m$$

$$10^6 \text{ mega } M$$

$$10^{-6} \text{ micro } \mu$$

$$10^3 \text{ kilo } k$$

$$10^{-9} \text{ nano } n$$

$$10^2 \text{ hecto } h$$

$$10^{-12} \text{ pico } p$$

$$10^1 \text{ deka } da$$

$$10^{-15} \text{ femto } f$$

$$10^{-1} \text{ deci } d$$

$$10^{-18} \text{ atto } a$$

ภาคผนวก ก.

ตารางธาตุและตารางค่าซัสเซพติบิลิตี้
ของสารต่างที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบ

Periodic Table of the Elements

Period	Group Ia	Group IIa	Group IIIa	Group IVa	Group Va	Group VIa	Group VIIa	Group VIII	Group I Ib	Group IIb	Group IIIb	Group IVb	Group Vb	Group VIb	Group VIIb	Group O		
1 1s	1 H														1 H	2 He		
2 2s2p	3 Li	4 Be								5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
3 3s3p	11 Na	12 Mg								13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
4 4s3d 4p	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 5s4d 5p	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6 6s (4f) 5d 6p	55 Cs	56 Ba	57* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 7s (5f) 6d	87 Fr	88 Ra	89** Ac															
*Lanthanide series 4f			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
**Actinide series 5f			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Atomic Weights (IUPAC, 1971; based on $^{12}\text{C} = 12.000$)^a

Aluminum	26.98154	Hydrogen	1.0079 ^b	Rhenium	186.2
Antimony	121.7 ₅	Indium	114.82	Rhodium	102.9055
Argon	39.94 ₈ ^b	Iodine	126.9045	Rubidium	85.467 ₈
Arsenic	74.9216	Iridium	192.2 ₂	Ruthenium	101.0 ₇
Barium	137.3 ₄	Iron	55.84 ₇	Samarium	150.4
Beryllium	9.01218	Krypton	83.80	Scandium	44.9559
Bismuth	208.9804	Lanthanum	138.905 ₅	Selenium	78.9 ₆
Boron	10.81 ^b	Lead	207.2 ^b	Silicon	28.08 ₆ ^b
Bromine	79.904	Lithium	6.94 ₁ ^{b,c}	Silver	107.868
Cadmium	112.40	Lutetium	174.97	Sodium	22.98977
Calcium	40.08	Magnesium	24.305	Strontium	87.62
Carbon	12.011 ^b	Manganese	54.9380	Sulfur	32.06 ^b
Cerium	140.12	Mercury	200.5 ₉	Tantalum	180.947 ₉
Cesium	132.9054	Molybdenum	95.9 ₄	Technetium	98.9062 ^d
Chlorine	35.453	Neodymium	144.2 ₄	Tellurium	127.6 ₀
Chromium	51.996	Neon	20.17 ₉	Terbium	158.9254
Cobalt	58.9332	Neptunium	237.0482	Thallium	204.3 ₇
Copper	63.54 ₆ ^b	Nickel	58.7 ₁	Thorium	232.0381
Dysprosium	162.5 ₀	Niobium	92.9064	Thulium	168.9342
Erbium	167.2 ₆	Nitrogen	14.0067	Tin	118.6 ₅
Europium	151.96	Osmium	190.2	Titanium	47.9 ₀
Fluorine	18.9984	Oxygen	15.999 ₄ ^{b,c}	Tungsten	183.8 ₅
Gadolinium	157.2 ₅	Palladium	106.4	Uranium	238.029 ^e
Gallium	69.72	Phosphorus	30.97376	Vanadium	50.941 ₄
Germanium	72.5 ₉	Platinum	195.0 ₉	Xenon	131.30
Gold	196.9665	Potassium	39.09 ₈	Ytterbium	173.0 ₄
Hafnium	178.4 ₉	Praseodymium	140.0977	Yttrium	88.9059
Helium	4.00260	Protactinium	231.0359	Zinc	65.38 ^e
Holmium	164.9304	Radium	226.0254 ^d	Zirconium	91.22

^a Elements in materials of terrestrial origin. Reliable to ± 1 in last digit or ± 3 when subscript.

^b Variation in natural isotopic abundance limits precision.

^c Variations possible owing to artificial isotopic separation.

^d Most commonly available long-lived isotope.

^e A new coulometric determination gives 65.377 ± 0.003 (*Chem. Eng. News*, 1971, Sept. 27, p. 32).

MAGNETIC MATERIALS (Continued)

Permanent Magnet Alloys

Material	Percent composition (remainder Fe)	Heat treatment* (temperature, °C)	Magnetizing force H _{max} , oersteds	Coercive force H _c , oersteds	Residual induction B _r , gauss	Energy product BH _{max} , X 10 ⁻⁴	Method of fabrication†	Mechanical properties‡	Weight lb/in. ³
Carbon steel.....	1 Mn, 0.8 C	Q 800	300	50	10,000	.20	HR, M, P	H, S	.280
Tungsten steel.....	5 W, 0.3 Mn, 0.7 C	Q 850	300	70	10,300	.32	HR, M, P	H, S	.292
Chromium steel.....	3.5 Cr, 0.9 C, 0.3 Mn	Q 830	300	65	9,700	.30	HR, M, P	H, S	.280
17% Cobalt steel.....	17 Co, 0.75 C, 2.5 Cr, 8 W	—	1,000	250	9,500	.65	HR, M, P	H, S	—
36% Cobalt steel.....	36 Co, 0.7 C, 4 Cr, 5 W	Q 950	1,000	250	10,500	.97	HR, M, P	H, S	.296
Remalloy or Comol.....	17 Mn, 12 Co	Q 1200, B 700	2,000	440	7,200	1.4	HR, M, P	H	.295
Alnico I.....	12 Al, 20 Ni, 5 Co	A 1200, B 700	2,000	550	7,200	1.6	C, G	H, B	.249
Alnico II.....	10 Al, 17 Ni, 2.5 Co, 6 Cu	A 1300	2,000	520	6,900	1.4	C, G	H, B	.256
Alnico II (sintered).....	10 Al, 17 Ni, 2.5 Co, 6 Cu	Q 1200, B 650	3,000	700	5,500	1.3	Sp, C, G	H	.249
Alnico IV.....	12 Al, 28 Ni, 5 Co	—	2,000	550	12,500	4.5	C, G	H, B	.253
Alnico V.....	8 Al, 11 Ni, 24 Co, 3 Cu	AF 1300, B 600	3,000	750	10,000	3.5	C, G	H, B	.264
Alnico VI.....	8 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, 1 Ti	—	3,000	750	10,000	3.5	C, G	H, B	.268
Alnico XII.....	6 Al, 18 Ni, 35 Co, 8 Ti	—	3,000	950	5,200	1.5	C, G	H, B	.26
Vicalloy I.....	52 Co, 10 V	B 600	1,600	300	8,800	1.0	C, CR, M, P	D	.295
Vicalloy II (wire).....	52 Co, 14 V	CW + B 600	2,000	510	10,000	3.5	C, CR, M, P	D	.292
Conite (wire).....	60 Co, 20 Ni	CW + B 600	2,400	550	5,400	1.5	C, CR, M, P	D, M	.311
Cunife.....	60 Cu, 21 Ni, 20 Co	—	3,200	660	3,400	.80	C, CR, M, P	D, M	.300
Vectolite.....	30 Fe ₂ O ₃ , 44 Fe ₃ O ₄ , 26 Cr ₂ O ₃	—	3,000	1,000	1,600	.60	Sp, G	W	.113
Silmanal.....	86.8 Ag, 8.8 Mn, 4.4 Al	—	20,000	6,000*	350	.075	C, CR, M, P	D, M	.325
Platinum-cobalt.....	77 Pt, 23 Co	Q 1200, B 650	15,000	3,600	5,900	6.5	C, CR, M	D	—
Hydux.....	Fine powder	—	2,000	390	6,600	.97	—	—	.176

* Value given is intrinsic H_c.
 † Q—Quenched in oil or water. A—Air cooled. B—Baked. F—Cooled in magnetic field. CW—Cold worked.
 ‡ HR—Hot rolled or forged. CR—Cold rolled or drawn. M—Machined. G—Must be ground. P—Punched. C—Cast. S—Sintered.
 † H—Hard. B—Brittle. S—Strong. D—Ductile. M—Malleable. W—Weak.

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS

The following table lists the magnetic susceptibilities of one gram formula weight of a number of paramagnetic and diamagnetic inorganic compounds as well as the magnetic susceptibilities of the elements.

In each instance the magnetic moment is expressed in cgs units. A more extensive listing of the magnetic susceptibilities of inorganic compounds as well as those for organic compounds may be found in *Constantes Selectionnees Diamagnetisme et Paramagnetisme Ravaux de Paramagnetisme, Volume 7*. This table is abridged from the above publication by permission of the publishers.

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁴ cgs	Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁴ cgs
Aluminum (s).....	Al	ord.	+16.6	Barium (continued)	BaBr ₂	ord.	-92.0
Aluminum (l).....	Al	—	+12.0	Bromide.....	BaBr ₂ ·2H ₂ O	ord.	-119.0
Fluoride.....	AlF ₃	302	-13.4	Carbonate.....	Ba(CO ₃)	ord.	-88.9
Oxide.....	Al ₂ O ₃	ord.	-37.0	Chlorate.....	Ba(ClO ₃)	ord.	-87.5
Sulfate.....	Al ₂ (SO ₄) ₃	ord.	-93.0	Chloride.....	BaCl ₂	ord.	-72.6
Ammonia (g).....	NH ₃	ord.	-18.0	Chloride.....	BaCl ₂ ·2H ₂ O	ord.	-100.0
Ammonia (aq).....	NH ₃	ord.	-17.0	Fluoride.....	BaF ₂	ord.	-51.0
Ammonium Acetate.....	NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂	ord.	-41.1	Hydroxide.....	Ba(OH) ₂	ord.	-53.2
Bromide.....	NH ₄ Br	ord.	-47.0	Iodate.....	Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	ord.	-157.0
Carbonate.....	(NH ₄) ₂ CO ₃	ord.	-42.50	Iodide.....	BaI ₂	ord.	-122.5
Chlorate.....	NH ₄ ClO ₃	ord.	-42.1	Iodide.....	BaI ₂ ·2H ₂ O	ord.	-124.0
Chloride.....	NH ₄ Cl	ord.	-36.7	Nitrate.....	Ba(NO ₃) ₂	ord.	-163.0
Fluoride.....	NH ₄ F	ord.	-23.0*	Oxide.....	BaO	ord.	-29.1
Hydroxide (aq).....	NH ₄ OH	ord.	-31.5	Oxide.....	BaO	ord.	-20.6
Iodate.....	NH ₄ IO ₃	ord.	-62.3	Sulfate.....	BaSO ₄	ord.	-71.3
Iodide.....	NH ₄ I	ord.	-66.0	Beryllium (s).....	Be	ord.	-9.0
Nitrate.....	NH ₄ NO ₃	ord.	-33.6	Chloride.....	BeCl ₂	ord.	-26.5
Sulfate.....	(NH ₄) ₂ SO ₄	ord.	-67.0	Hydroxide.....	Be(OH) ₂	ord.	-23.1
Thiocyanate.....	NH ₄ SCN	ord.	-48.1	Nitrate (aq).....	Be(NO ₃) ₂	298	-41.0
Americium (s).....	Am	300	+1000.0	Oxide.....	BeO	ord.	-11.9
Antimony (s).....	Sb	293	-99.0	Sulfate.....	BeSO ₄	ord.	-37.0
Antimony (l).....	Sb	—	-2.5	Bismuth (s).....	Bi	ord.	-280.1
Bromide.....	SbBr ₃	ord.	-115.0	Bismuth (l).....	Bi	—	-10.5
Chloride, tri.....	SbCl ₃	ord.	-86.7	Bromide.....	BiBr ₃	ord.	-147.0
Chloride, penta.....	SbCl ₅	ord.	-120.0	Chloride.....	BiCl ₃	ord.	-26.6
Fluoride.....	SbF ₃	ord.	-46.0	Chromate.....	Bi(CrO ₄) ₃	ord.	+154.0
Iodide.....	SbI ₃	ord.	-147.0	Fluoride.....	BiF ₃	303	-61.0
Oxide.....	Sb ₂ O ₃	ord.	-69.4	Hydroxide.....	Bi(OH) ₃	ord.	-65.8
Sulfide.....	Sb ₂ S ₃	ord.	-86.0	Iodide.....	BiI ₃	ord.	-200.6
Argon (s).....	A	ord.	-19.6	Nitrate.....	Bi(NO ₃) ₃	ord.	-91.0
Arsenic (s).....	As	293	-5.5	Oxide.....	Bi(NO ₃) ₃ ·5H ₂ O	ord.	-159.0
Arsenic (l).....	As	293	-23.7	Oxide.....	BiO	ord.	-110.0
Arsenic (g).....	As	293	-23.0	Oxide.....	Bi ₂ O ₃	ord.	-83.0
Bromide.....	AsBr ₃	ord.	-106.0	Phosphate.....	BiPO ₄	ord.	-77.0
Chloride.....	AsCl ₃	ord.	-79.9	Sulfate.....	Bi ₂ (SO ₄) ₃	ord.	-123.0
Iodide.....	AsI ₃	ord.	-142.0	Sulfide.....	Bi ₂ S ₃	ord.	-34.1
Sulfide.....	As ₂ S ₃	ord.	-70.0	Boric Acid.....	H ₃ BO ₃	ord.	-6.7
Arsenious Acid.....	H ₃ AsO ₃	ord.	-51.2	Boron (s).....	B	ord.	-59.9
Barium.....	Ba	ord.	+20.6	Chloride.....	BCl ₃	ord.	-39.0
Acetate.....	Ba(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ ·H ₂ O	ord.	-109.1	Oxide.....	B ₂ O ₃	ord.	-56.4
Bromate.....	Ba(BrO ₃) ₂	ord.	-105.8	Bromide (l).....	Br ₂	—	-73.5

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS (Continued)

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs	Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs
Bromine (l) (continued)				Cobalt (continued)			
Fluoride.....	BrF ₂	ord.	-33.9	Fluoride.....	CoF ₂	293	+9490.0
	BrF ₃	ord.	-45.1		CoF ₃	293	+1900.0
Cadmium (s).....	Cd	ord.	-19.8	Iodide.....	CoI ₂	293	+10,760.0
(l).....	Cd	ord.	-18.0	Oxide.....	CoO	290	+4900.0
Acetate.....	Cd(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	ord.	-83.7		Co ₂ O ₃	ord.	+4560.0
Bromide.....	CdBr ₂	ord.	-87.3		Co ₃ O ₄	ord.	+7380.0
	CdBr ₂ ·4H ₂ O	ord.	-140.0	Phosphate.....	Co ₃ (PO ₄) ₂	291	+28,110.0
Carbonate.....	CdCO ₃	ord.	-46.7	Sulfate.....	CoSO ₄	293	+10,000.0
Chloride.....	CdCl ₂	ord.	-68.7	(CoSO ₄) ₂	CoS	688	+1,000.0
	CdCl ₂ ·2H ₂ O	ord.	-99.0		CoS	293	+225.0
Chromate.....	CdCrO ₄	ord.	-16.8	Thiocyanate.....	Co(SCN) ₂	303	+11,090.0
Cyanide.....	Cd(CN) ₂	ord.	-54.0	Copper (s).....	Cu	296	-5.46
Fluoride.....	CdF ₂	ord.	-40.6	(l).....	Cu	ord.	-6.16
Hydroxide.....	Cd(OH) ₂	ord.	-41.0	Bromide.....	CuBr	ord.	-49.0
Iodate.....	Cd(IO ₃) ₂	ord.	-108.4		CuBr ₂	341.6	+653.3
Iodide.....	CdI ₂	ord.	-117.2		CuBr ₂	292.7	+685.5
Nitrate.....	Cd(NO ₃) ₂	ord.	-55.1		CuBr ₂	189	+736.4
	Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	ord.	-140.0		CuBr ₂	90	+658.7
Oxide.....	CdO	ord.	-30.0	Chloride.....	CuCl	ord.	-40.0
Phosphate.....	Cd ₃ (PO ₄) ₂	ord.	-159.0		CuCl ₂	373.3	+1030.0
Sulfate.....	CdSO ₄	ord.	-59.2		CuCl ₂	289	+1080.0
Sulfide.....	CdS	ord.	-50.0		CuCl ₂	170	+1815.0
Calcium (s).....	Ca	ord.	+40.0		CuCl ₂ ·2H ₂ O	99.25	+2370.0
Acetate.....	Ca(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	ord.	-70.5		CuCN	293	+1420.0
Bromate.....	Ca(BrO ₃) ₂	ord.	-84.9	Cyanide.....	CuF ₂	293	+1050.0
Bromide.....	CaBr ₂	ord.	-73.8	Fluoride.....	CuF ₃	90	+1420.0
	CaBr ₂ ·3H ₂ O	ord.	-115.0		Cu ₂ F ₂ ·2H ₂ O	293	+1600.0
Carbonate.....	CaCO ₃	ord.	-36.2	Hydroxide.....	Cu(OH) ₂	292	+1170.0
Chloride.....	CaCl ₂	ord.	-54.7	Iodide.....	CuI	ord.	-63.0
Fluoride.....	CaF ₂	ord.	-28.0	Nitrate.....	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	293	+1570.0
Hydroxide.....	Ca(OH) ₂	ord.	-22.0		Cu(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	293	+1025.0
Iodate.....	Ca(IO ₃) ₂	ord.	-101.4	Oxide.....	Cu ₂ O	293	-20.0
Iodide.....	CaI ₂	ord.	-109.0		CuO	780	+259.6
Nitrate (aq).....	Ca(NO ₃) ₂	ord.	-45.9		CuO	561	+267.3
Oxide.....	CaO	ord.	-15.0		CuO	397	+256.9
	CaO	ord.	-23.8		CuO	289.6	+238.9
Sulfate.....	CaSO ₄	ord.	-49.7		CuO	120	+156.2
	CaSO ₄ ·2H ₂ O	ord.	-74.0	Phosphide.....	Cu ₃ P	ord.	-33.0
Carbon (dia).....	C	ord.	-6.0	Sulfate.....	Cu ₂ P	ord.	-35.0
(graph).....	C	ord.	-6.0		CuSO ₄	293	+1330.0
Dioxide.....	CO ₂	ord.	-21.0		CuSO ₄ ·H ₂ O	293	+1520.0
Monoxide.....	CO	ord.	-9.8		CuSO ₄ ·3H ₂ O	ord.	+1480.0
Cerium (s).....	Ce	80.5	+5160.0		CuSO ₄ ·5H ₂ O	293	+1460.0
(β).....	Ce	293	+2450.0	Sulfide.....	CuS	293	-2.0
(δ).....	Ce	80.5	+6230.0	Thiocyanate.....	CuSCN	ord.	-48.0
(γ).....	Ce	287.9	+2420.0	Dysprosium.....	Dy	293.2	103,500.0
(η).....	Ce	125.6	+4640.0	Oxide.....	Dy ₂ O ₃	287.2	+69,600.0
(ζ).....	Ce	80.5	+5200.0	Sulfate.....	Dy ₂ (SO ₄) ₃	293	+91,400.0
Chloride.....	CeCl ₃	287	+2490.0		Dy ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	291.2	+92,760.0
Fluoride.....	CeF ₃	293	+2190.0	Sulfide.....	Dy ₂ S ₃	292	+95,200.0
Nitrate.....	Ce(NO ₃) ₃ ·5H ₂ O	292	+2310.0	Erbium.....	Er	291	+44,300.0
Oxide.....	Ce ₂ O ₃	293	+26.0	Oxide.....	Er ₂ O ₃	286	+73,920.0
Sulfate.....	Ce ₂ (SO ₄) ₃	ord.	+37.0	Sulfate.....	Er ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	293	+74,600.0
	Ce ₂ (SO ₄) ₃ ·5H ₂ O	293	+4540.0	Sulfide.....	Er ₂ S ₃	292	+77,200.0
	Ce ₂ (SO ₄) ₃ ·4H ₂ O	293	-97.0	Europium.....	Eu	293	+34,600.0
Sulfide.....	CeS	292	+2110.0	Bromide.....	EuBr ₂	292	+26,800.0
	Ce ₂ S ₃	292	+5380.0	Chloride.....	EuCl ₂	292	+26,500.0
Cesium (s).....	Ce	ord.	+29.0	Fluoride.....	EuF ₂	292	+23,750.0
(l).....	Ce	ord.	+26.5	Iodide.....	EuI ₂	292	+26,000.0
Bromate.....	CeBrO ₃	ord.	-75.1	Oxide.....	Eu ₂ O ₃	298	+10,100.0
Bromide.....	CeBr ₂	ord.	-67.2	Sulfate.....	EuSO ₄	293	+25,730.0
Carbonate.....	Ce ₂ CO ₃	ord.	-103.6		Eu ₂ (SO ₄) ₃	293	+19,400.0
Chlorate.....	CeClO ₄	ord.	-65.0		Eu ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	293	+9,540.0
Chloride.....	CeCl ₃	ord.	-86.7	Sulfide.....	EuS	293	+23,800.0
Fluoride.....	CeF ₃	ord.	-44.5	Europium.....	EuS	195	+35,400.0
Iodate.....	Ce ₂ O ₇	ord.	-63.1	Gadolinium.....	Gd	300.6	+755,000.0
Iodide.....	CeI ₃	ord.	-82.6	Chloride.....	GdCl ₃	293	+27,930.0
Oxide.....	CaO	293	+1534.0	Oxide.....	Gd ₂ O ₃	293	+53,200.0
	CaO	90	+4504.0	Sulfate.....	Gd ₂ (SO ₄) ₃	285.5	+54,200.0
Sulfate.....	CaSO ₄	ord.	-116.0	Sulfide.....	Gd ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	293	+53,280.0
	CaSO ₄	ord.	-104.0	Germanium.....	Gd ₂ S ₃	292	+55,500.0
Sulfide.....	CaS	ord.	-40.5	Chloride.....	Ga	80	-24.4
Chlorine (l).....	Cl ₂	ord.	-40.5	Chloride.....	Ga	290	-21.6
Fluoride, tri.....	ClF ₃	ord.	-26.5	Oxide.....	Ga	313	+2.5
Chromium.....	Cr	273	+180.0	Sulfide.....	GaCl ₂	ord.	-63.0
	Cr	1713	+224.0		GaCl ₃	ord.	-149.0
Acetate.....	Cr(C ₂ H ₃ O ₂) ₃	293	+5104.0	Chloride.....	GaCl ₃	ord.	-34.0
Chloride.....	CrCl ₂	293	+7230.0	Oxide.....	Ga ₂ O ₃	ord.	-36.0
	CrCl ₃	293	+6890.0	Sulfide.....	Ga ₂ S ₃	ord.	-23.0
Fluoride.....	CrF ₃	293	+4370.0		Ga ₂ S ₅	ord.	-80.0
Oxide.....	Cr ₂ O ₃	300	+1960.0	Germanium.....	Ce	293	-76.84
	Cr ₂ O ₃	ord.	+40.0	Chloride.....	CeCl ₃	ord.	-72.0
Sulfate.....	Cr ₂ (SO ₄) ₃	293	+11,800.0	Fluoride.....	CeF ₃	ord.	-50.0
	Cr ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	290	+12,700.0	Iodide.....	CeI ₃	ord.	-174.0
	Cr ₂ (SO ₄) ₃ ·10H ₂ O	290	+12,600.0	Oxide.....	Ce ₂ O ₃	ord.	-28.8
	Cr ₂ (SO ₄) ₃ ·14H ₂ O	290	+12,160.0	Sulfide.....	Ce ₂ S ₃	ord.	-34.3
	Cr ₂ O ₃ ·6H ₂ O	293	+9690.0		Ce ₂ S ₅	ord.	-40.9
Sulfide.....	CrS	ord.	+2390.0	Gold (s).....	Au	296	-28.0
Cobalt.....	Co	ord.	+11,000.0	(l).....	Au	ord.	-34.0
Acetate.....	Co(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	293	+13,000.0				
Bromide.....	CoBr ₂	293	+12,660.0				
Chloride.....	CoCl ₂	293	+9710.0				
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	293	+3825.0				
Cyanide.....	Co(CN) ₂	303					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS (Continued)

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs	Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs
Gold (continued)				Lead (s) (continued)			
Bromide	AuBr	ord.	-61.0	Thiocyanate	Pb(CNS) ₂	ord.	-82.0
Chloride	AuCl	ord.	-37.0	Lithium	Li	ord.	+14.2
Fluoride	AuF ₃	ord.	-112.0	Acetate	LiC ₂ H ₃ O ₂	ord.	-34.0
Iodide	AuI	ord.	-74.0	Bromate	LiBrO ₃	ord.	-39.0
Phosphide	Au ₃ P ₂	ord.	-91.0	Bromide	LiBr	ord.	-34.7
Zincium (s)	Zn	298	+75.0	Carbonate	Li ₂ CO ₃	ord.	-27.0
Oxide (s)	ZnO	1673	+104.0	Chlorate (aq)	LiClO ₃	ord.	-28.8
Helium (g)	He	ord.	-23.0	Chloride	LiCl	ord.	-24.3
Heliumium	He	ord.	-1.88	Fluoride	LiF	ord.	-10.1
Oxide	HeO ₂	293	+68,100.0	Hydride	LiH	ord.	-4.6
Sulfate	He(SO ₄) ₂	293	+21,700.0	Hydroxide	LiOH	ord.	-12.3
Hydrogen (s)	H ₂	293	+81,600.0	Iodate	LiIO ₃	ord.	-47.0
Bromide (l)	HBr	273	-3.98	Iodide	LiI	ord.	-50.0
Chloride (l)	HCl	273	-22.6	Nitrate	LiNO ₃ ·3H ₂ O	ord.	-62.0
Fluoride (l)	HF	267	-8.6	Sulfate	Li ₂ SO ₄	ord.	-40.0
Iodide (l)	HI	261	-47.7	Lutetium	Lu	ord.	+13.1
Oxide (s)	HI	233	-48.3	Magnesium	Mg	ord.	-116.0
Oxide (aq)	HI	195	-47.3	Bromide	MgBr ₂	ord.	-72.0
Oxide—See Water	HI	ord.	-50.2	Carbonate	MgCO ₃	ord.	-32.4
Peroxide	H ₂ O ₂	ord.	-17.7	Chloride	MgCl ₂	ord.	-47.4
Sulfide	H ₂ S	ord.	-25.5	Fluoride	MgF ₂	ord.	-22.7
Indium	In	ord.	-64.0	Hydroxide	Mg(OH) ₂	268	-111.0
Bromide	InBr ₃	ord.	-107.0	Iodide	MgI ₂	ord.	-10.2
Chloride	InCl ₃	ord.	-30.0	Oxide	MgO	ord.	-167.0
Fluoride	InCl ₃	ord.	-86.0	Phenphate	Mg ₃ (PO ₄) ₂ ·4H ₂ O	ord.	-30.0
Oxide	In ₂ O ₃	ord.	-61.0	Sulfate	MgSO ₄	294	-61.0
Sulfide	In ₂ S ₃	ord.	-56.0	Acetate	MgSO ₄ ·H ₂ O	ord.	-109.0
Iodic Acid	HIO ₃	ord.	-45.0	Bromide	MgSO ₄ ·5H ₂ O	ord.	-135.7
metaper	HIO ₄	ord.	-56.5	Carbonate	Mn	293	+523.0
orthoparaper	HIO ₄	ord.	-71.4	Chloride	Mn	293	+432.0
Iodine (s)	I ₂	ord.	-85.7	Fluoride	Mn	253	+13,650.0
Oxide (atomic)	I ₂	1332	+869.0	Hydroxide	Mn(OH) ₂	294	+13,900.0
Oxide (molecular)	I ₂	1400	+1,120.0	Iodide	MnI ₂	253	+11,400.0
Chloride	ICl	ord.	-54.6	Oxide	Mn ₂ O ₃	293	+14,350.0
Fluoride	ICl ₃	ord.	-90.2	Sulfate	MnSO ₄	293	+14,600.0
Oxide	I ₂ O ₅	ord.	-53.1	Acetate	MnSO ₄ ·H ₂ O	293	+14,200.0
Iridium	Ir	298	+25.6	Bromide	MnSO ₄ ·4H ₂ O	293	+13,500.0
Chloride	IrCl ₃	603	+32.1	Carbonate	MnSO ₄ ·5H ₂ O	253	+14,700.0
Oxide	Ir ₂ O ₃	298	+224.0	Chloride	MnS	293	+5630.0
Iron	Fe	ord.	+13,600.0	Fluoride	MnS	293	+3850.0
Bromide	FeBr ₃	293	+11,300.0	Mercury (s)	Hg	ord.	-24.1
Carbonate	FeCO ₃	293	+14,750.0	ferro	Hg	293	-73.44
Chloride	FeCl ₃	293	+12,600.0	acetate	Hg	ord.	-75.3
Fluoride	FeF ₃	293	+13,450.0	Bromate	Hg(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	ord.	-109.0
Iodide	FeI ₃	398	+9,980.0	Bromide	HgBr ₂	ord.	-57.7
Nitrate	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	293	+15,250.0	Chloride	HgCl ₂	ord.	-94.2
Oxide	Fe ₂ O ₃	293	+9,500.0	Chromate	HgCrO ₄	ord.	-82.6
Phosphate	Fe ₃ (PO ₄) ₂	305	+13,760.0	Cyanide	Hg(CN) ₂	ord.	-63.0
Sulfate	FeSO ₄	293	+7870.0	Fluoride	HgF ₂	ord.	-12.5
Sulfide	FeS	293	+13,600.0	Hydroxide	Hg(OH) ₂	ord.	-67.0
Krypton	Kr	ord.	-118.0	Iodate	HgIO ₃	ord.	-83.0
Lanthanum	La	ord.	+118.0	Iodide	HgI ₂	ord.	-128.6
Oxide	La ₂ O ₃	293	+10,200.0	Nitrate	Hg(NO ₃) ₂	ord.	-35.8
Sulfate	La ₂ (SO ₄) ₃ ·9H ₂ O	293	+19,500.0	Oxide	Hg ₂ O	ord.	-74.0
Sulfide	La ₂ S ₃	293	+11,200.0	Sulfate	Hg ₂ SO ₄	ord.	-76.3
Lead (s)	Pb	289	-23.0	Sulfide	HgS	ord.	-55.4
Acetate	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	330	-15.5	Thiocyanate	Hg(SCN) ₂	ord.	-78.1
Bromide	PbBr ₂	ord.	-89.1	Molybdenum	Mo	298	+69.0
Carbonate	PbCO ₃	ord.	-90.2	Mo	65.8	+108.0	
Chloride	PbCl ₂	ord.	-61.2	Mo	20.4	+149.2	
Chromate	PbCrO ₄	ord.	-15.0	MoBr ₃	293	+523.0	
Fluoride	PbF ₂	ord.	-58.1	MoBr ₅	292	+570.0	
Iodate	Pb(IO ₃) ₂	ord.	-131.0	MoCl ₃	290.5	+46.0	
Iodide	PbI ₂	ord.	-126.5	MoCl ₄	293	+43.0	
Nitrate	Pb(NO ₃) ₂	ord.	-74.0	MoCl ₅	291	+1750.0	
Oxide	PbO	ord.	-42.0	MoCl ₆	289	+990.0	
Phosphate	Pb ₃ (PO ₄) ₂	ord.	-182.8	MoF ₆	ord.	-26.0	
Sulfate	PbSO ₄	ord.	-69.7	Mo ₂ O ₃	ord.	-42.0	
Sulfide	PbS	ord.	-84.0	Mo ₂ O ₅	292.5	+3.0	
				Mo ₃ O ₄	ord.	+42.0	
				MoS ₂	285	-63.0	

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS (Continued)

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs	Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁶ cgs
Neodymium	Nd	287.7	5628.0	Potassium (continued)			
Fluoride	NdF ₃	293	+4980.0	Thiocyanate	KSCN	ord.	-48.0
Nitrate	Nd(NO ₃) ₃	293	+5020.0	Praseodymium	Pr	293	+5010.0
Oxide	Nd ₂ O ₃	292.0	+10,200.0	Chloride	PrCl ₃	307.1	+44.5
Sulfate	Nd ₂ (SO ₄) ₃	293	+4990.0	Oxide	PrO ₂	293	+1930.0
Sulfide	Nd ₂ S ₃	292	+5550.0	Oxide	Pr ₂ O ₃	827	+4000.0
Neon	Ne	ord.	-6.74	Sulfate	Pr ₂ (SO ₄) ₃	294.5	+8994.0
Nickel	Ni	ord.	ferro	"	Pr ₂ (SO ₄) ₃ ·6H ₂ O	299	+9660.0
Acetate	Ni(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	293	+4690.0	Sulfide	Pr ₂ S ₃	292	+10,770.0
Bromide	NiBr ₂	293	+5600.0	Rhenium	Re	293	+67.6
Chloride	NiCl ₂	293	+6145.0	Chloride	ReCl ₅	293	+1225.0
Fluoride	NiCl ₂ ·6H ₂ O	293	+2410.0	Oxide	ReO ₂	ord.	+44.0
Hydroxide	Ni(OH) ₂	ord.	+4500.0	"	ReO ₃ ·2H ₂ O	295	+74.0
Iodide	NiI ₂	293	+3875.0	"	ReO ₄	ord.	+16.0
Nitrate	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	293.5	+4300.0	"	Re ₂ O ₇	ord.	-16.0
Oxide	NiO	293	+660.0	Euthra	ReS ₂	ord.	+38.0
Sulfate	NiSO ₄	293	+4095.0	Rhodium	Rh	298	+111.0
Sulfide	NiS	293	+190.0	"	Rh	723	+123.0
Niobium	Nb	ord.	+1030.0	Chloride	RhCl ₃	298	-7.5
Oxide	Nb ₂ O ₅	298	+195.0	Fluoride	RhF ₃	293	+500.0
Nitric Acid	HNO ₃	ord.	-10.0	Oxide	Rh ₂ O ₃	298	+104.0
Nitrogen	N ₂	ord.	-19.9	Sulfate	Rh ₂ (SO ₄) ₃ ·6H ₂ O	298	+104.0
Oxide	N ₂ O	ord.	-12.0	"	Rh ₂ (SO ₄) ₃ ·14H ₂ O	298	+149.0
" (α)	NO	293	-18.9	Rubidium	Rb	303	ord.
" (β)	NO	293.8	+1895.0	Bromide	RbBr	ord.	-56.4
" (γ)	NO	146.9	+2324.0	Carbonate	Rb ₂ CO ₃	ord.	-75.4
" (δ)	NO	117.64	+114.2	Chloride	RbCl	ord.	-46.0
" (ε)	NO	90	+19.8	Fluoride	RbF	ord.	-31.9
"	N ₂ O ₂	291	-16.0	Iodide	RbI	ord.	-72.2
"	N ₂ O ₃	408	+22.1	Nitrate	RbNO ₃	ord.	+137.0
"	N ₂ O ₄	303.6	-22.0	Oxide	Rb ₂ O ₃	293	+1527.0
"	N ₂ O ₅	295.1	-25.4	Sulfate	Rb ₂ SO ₄	ord.	-88.4
" (α)	N ₂ O ₄	257	-25.4	Sulfide	Rb ₂ S ₃	ord.	-80.0
Cesium	Cs	289	-35.6	Ruthenium	Ru	ord.	-90.0
Chloride	CsCl	298	+9.9	"	Ru	728	+43.2
Oxygen (α)	O ₂	ord.	+41.3	Chloride	RuCl ₂	290.9	+50.2
" (β)	O ₂	293	+3449.0	Oxide	RuO ₂	298	+1998.0
" (γ)	O ₂	90.1	+7099.0	Samarium	Sm	291	+1860.0
" (δ)	O ₂	70.8	+565.0	Bromide	SmBr ₂	195	+2230.0
" (ε, γ)	O ₂	54.3	+10,200.0	"	SmBr ₃	293	+5337.0
" (ε, α)	O ₂	23.7	+1760.0	Oxide	SmBr ₂	293	+972.0
Ozone (O)	O ₃	ord.	+6.7	"	Sm ₂ O ₃	292	+1988.0
Palladium	Pd	288	+567.4	"	Sm ₂ O ₃	170	+1960.0
Chloride	PdCl ₂	291.3	-38.0	Sulfate	Sm ₂ (SO ₄) ₃ ·6H ₂ O	293	+2262.0
Fluoride	PdF ₂	293	+1760.0	Sulfide	Sm ₂ S ₃	292	+3300.0
Hydride	PdH	ord.	+1077.0	Scandium	Sc	292	+315.0
"	Pd ₂ H	ord.	+2353.0	Selenic Acid	H ₂ SeO ₄	ord.	-51.2
Phosphoric Acid (aq)	H ₃ PO ₄	ord.	-43.8	Selenous Acid	H ₂ SeO ₃	ord.	-45.4
Phosphoric Acid (sat)	H ₃ PO ₄	ord.	-42.5	Selenium (α)	Se	ord.	-25.0
Phosphorous (red)	P	ord.	-20.8	" (β)	Se	900	-13.0
Phosphorous (black)	P	ord.	-26.6	Bromide	Se ₂ Br ₂	ord.	-113.0
Chloride	PCl ₃	ord.	-63.4	Chloride	Se ₂ Cl ₂	ord.	-84.8
Platinum	Pt	293.8	+201.9	Fluoride	SeF ₂	ord.	-51.0
Chloride	PtCl ₂	298	-54.0	Oxide	SeO ₂	ord.	-27.2
"	PtCl ₄	ord.	-66.7	Silicon	Si	ord.	-3.9
Fluoride	PtF ₆	293	+455.0	Bromide	SiBr ₄	ord.	-128.6
Plutonium	Pt ₂ O ₇	ord.	-37.70	Carbide	SiC	ord.	-88.3
Fluoride	PuF ₃	293	+610.0	Chloride	SiCl ₄	ord.	-42.6
"	PuF ₄	295	+1700.0	Hydroxide	Si(OH) ₄	ord.	-29.6
Oxide	PuO ₂	300	+730.0	Oxide	SiO ₂	ord.	-29.6
Point sat.	"	ord.	+30.8	Silver (α)	Ag	296	-19.5
Acetate (aq)	K ₂ C ₂ H ₃ O ₄	28	-45.0	" (β)	Ag	ord.	-24.0
Bromate	KBrO ₃	ord.	-52.6	Acetate	AgC ₂ H ₃ O ₂	ord.	-69.4
Bromide	KBr	ord.	-49.1	Bromide	AgBr	282	-53.7
Carbonate	K ₂ CO ₃	ord.	-59.0	Carbonate	Ag ₂ CO ₃	ord.	-80.90
Chlorate	KClO ₃	ord.	-42.8	Chloride	AgCl	ord.	-49.0
Chloride	KCl	ord.	-39.0	Chromate	Ag ₂ CrO ₄	ord.	-40.0
Chromate	K ₂ CrO ₄	ord.	-3.9	Cyanide	AgCN	ord.	-43.2
"	K ₂ Cr ₂ O ₇	293	+20.4	Fluoride	AgF	ord.	-36.5
Cyanide	KCN	ord.	-37.0	Iodide	AgI	ord.	-80.0
Ferricyanide	K ₃ Fe(CN) ₆	297	+2290.0	Nitrite	AgNO ₂	ord.	-45.7
Ferrocyanide	K ₄ Fe(CN) ₆ ·3H ₂ O	ord.	-130.0	Nitrate	AgNO ₃	ord.	-42.0
Fluoride	KF	ord.	-172.2	Oxide	Ag ₂ O	ord.	-134.0
Hydroxide (aq)	KOH	ord.	-23.6	Permanganate	AgMnO ₄	ord.	-19.6
Iodate	KIO ₃	ord.	-29.0	Phosphate	Ag ₃ PO ₄	300	-120.0
Iodide	KI	ord.	-63.1	Sulfate	Ag ₂ SO ₄	ord.	-92.90
Nitrate	KNO ₃	ord.	-63.8	Thiocyanate	AgSCN	ord.	-61.8
Nitrite	KNO ₂	ord.	-33.7	Sodium	Na	ord.	+16.0
Oxide	K ₂ O	293	+3230.0	Acetate	NaC ₂ H ₃ O ₂	ord.	-37.6
"	K ₂ O	ord.	+1185.0	Borate, tetra	Na ₂ B ₄ O ₇	ord.	-85.0
Permanganate	KMnO ₄	ord.	+20.0	Bromate	NaBrO ₃	ord.	-4.2
Sulfate	K ₂ SO ₄	ord.	-67.0	Bromide	NaBr	ord.	-41.0
"	KHSO ₄	ord.	-49.8	Carbonate	Na ₂ CO ₃	ord.	-41.0
Sulfide	K ₂ S	ord.	-60.0	Chlorate	NaClO ₃	ord.	-34.7
"	K ₂ S ₂	ord.	-71.0	Chloride	NaCl	ord.	-30.3
"	K ₂ S ₂ O ₃	ord.	-80.0	Chromate, di	Na ₂ Cr ₂ O ₇	ord.	+55.0
"	K ₂ S ₂ O ₄	ord.	-89.0	Fluoride	NaF	ord.	-16.4
Sulfite	K ₂ SO ₃	ord.	-98.0	Hydroxide (aq)	NaOH	300	-16.0
"	K ₂ SO ₄	ord.	-64.0	Iodate	NaIO ₃	ord.	-53.0
"	K ₂ SO ₄	ord.	-64.0	Iodide	NaI	ord.	-57.0
"	K ₂ SO ₄	ord.	-64.0	Nitrate	NaNO ₃	ord.	-25.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS (Continued)

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁴ cgs	Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁴ cgs
Sodium (continued)				Tin (continued)			
Nitrite	NaNO ₂	ord.	-14.5	(l)	Sn	ord.	-4.5
Oxide	Na ₂ O	ord.	-19.8	Bromide	SnBr ₂	ord.	-146.0
Phosphate, meta	Na ₂ PO ₃	ord.	-28.10	Chloride	SnCl ₂	ord.	-69.0
	Na ₂ HPO ₄	ord.	-42.5	"	SnCl ₂ ·2H ₂ O	ord.	-91.4
Sulfate	Na ₂ SO ₄	ord.	-56.6	" (l)	SnCl ₄	ord.	-115.0
	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	ord.	-52.0	Hydrosulfide	Sn(OH) ₂	ord.	-60.0
Sulfide	Na ₂ S	ord.	-184.0	Oxide	SnO	ord.	-19.0
"	Na ₂ Se	ord.	-39.0	"	SnO ₂	ord.	-41.0
"	Na ₂ Si	ord.	-53.0	Titanium	Ti	293	+153.0
"	Na ₂ Te	ord.	-68.0	"	Ti	90	+150.0
"	Na ₂ U	ord.	-84.0	Bromide	TiBr ₃	288	+640.0
"	Na ₂ V	ord.	-99.0	"	TiBr ₄	441	+520.0
Strontium	Sr	ord.	+92.0	"	TiBr ₄	291	+660.0
Acetate	Sr(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	ord.	-79.0	"	TiBr ₄	195	+680.0
Bromate	Sr(BrO ₃) ₂	ord.	-93.5	Carbide	TiC	90	+220.0
Bromide	SrBr ₂	ord.	-86.6	Chloride	TiCl ₂	ord.	+8.0
"	SrBr ₂ ·6H ₂ O	ord.	-160.0	"	TiCl ₃	288	+570.0
Carbonate	SrCO ₃	ord.	-47.0	"	TiCl ₄	685	+705.0
Chlorate	Sr(ClO ₃) ₂	ord.	-73.0	"	TiCl ₄	373	+1030.0
Chloride	SrCl ₂	ord.	-63.0	"	TiCl ₄	292	+1110.0
Chromate	SrCrO ₄	ord.	-145.0	"	TiCl ₄	212	+690.0
Fluoride	SrCrF ₆	ord.	-5.1	"	TiCl ₄	90	+220.0
Hydroxide	Sr(OH) ₂	ord.	-37.2	Fluoride	TiF ₄	ord.	-54.0
"	Sr(OH) ₂ ·8H ₂ O	ord.	-40.0	Iodide	TiI ₄	293	+1300.0
Iodate	Sr(IO ₃) ₂	ord.	-136.0	"	TiI ₄	288	+1790.0
Iodide	SrI ₂	ord.	-108.0	"	TiI ₄	434	+221.0
Nitrate	Sr(NO ₃) ₂	ord.	-112.0	"	TiI ₄	292	+160.0
"	Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	ord.	-57.2	"	TiI ₄	195	+139.0
Oxide	SrO	ord.	-106.0	"	TiI ₄	90	+167.0
"	Sr ₂ O	ord.	-35.0	Oxide	Ti ₂ O ₃	382	+152.0
Sulfate	SrSO ₄	ord.	-32.3	"	Ti ₂ O ₃	298	+125.6
Sulfur (a)	S	ord.	-67.9	"	Ti ₂ O ₃	248	+132.4
" (b)	S	ord.	-15.5	"	Ti ₂ O ₃	ord.	+5.9
" (c)	S	828	+700.0	Sulfide	TiS	ord.	+432.0
" (d)	S	1023	+464.0	Tungsten	W	298	+59.0
Chloride	SrCl ₂	ord.	-62.2	Bromide	WBr ₅	293	+290.0
"	SrCl ₂	ord.	-49.4	Carbide	WC	ord.	+10.0
"	SrCl ₂	ord.	-49.4	Chloride	WCl ₂	293	-25.0
Fluoride	SrF ₂	ord.	-44.0	"	WCl ₃	291	+387.0
Iodide	SrI ₂	ord.	-52.7	"	WCl ₄	ord.	-71.0
Oxide (l)	SO ₂	ord.	-18.2	Fluoride	WF ₆	ord.	-40.0
Sulfuric Acid	H ₂ SO ₄	ord.	-39.8	Oxide	WO ₂	ord.	+57.0
Tantalum	Ta	293	+154.0	Sulfide	WS ₂	ord.	+5850.0
Chloride	TaCl ₅	2143	+124.0	Tungstic Acid, ortho	H ₂ WO ₄	ord.	+25.0
Fluoride	TaF ₅	304	+140.0	Uranium (a)	U	78	+395.0
Oxide	Ta ₂ O ₅	293	+795.0	" (a)	U	298	+409.0
"	Ta ₂ O ₅	ord.	-32.0	" (a)	U	623	+440.0
Technetium	Tc	402	250.0	" (b)	U	ord.	+514.0
"	Tc	298	270.0	" (c)	U	1393	+514.0
"	Tc	78	290.0	Bromide	UBr ₃	291	+4740.0
Oxide	TcO ₂ ·2H ₂ O	300	+244.0	"	UBr ₃	293	+3530.0
Tellurium (a)	Te	298	-40.0	Chloride	UCl ₄	300	+3460.0
" (l)	Te	ord.	-39.5	"	UCl ₄	294	+3680.0
Bromide	TeBr ₄	ord.	-6.4	Fluoride	UF ₆	300	+3530.0
Chloride	TeCl ₄	ord.	-106.0	"	UF ₆	ord.	+43.0
Fluoride	TeF ₆	ord.	-94.0	Hydrides	UH ₄	462	+2821.0
"	TeF ₆	ord.	-66.0	"	UH ₃	391	+3568.0
Terbium	Tb	273	+146,000.0	"	UH ₂	295	+6244.0
Oxide	Tb ₂ O ₃	288.1	+78,240.0	"	UH ₂	255	+9306.0
Sulfate	Tb ₂ (SO ₄) ₃	293	+78,200.0	"	UH ₂	293	+4460.0
"	Tb ₂ (SO ₄) ₃ ·8H ₂ O	293	+70,500.0	Iodide	UI ₃	293	+1600.0
"	Tb ₂ O ₃	ord.	-80.9	"	UI ₃	ord.	+2360.0
" (a)	Tb	>508	-32.3	"	UI ₃	ord.	+128.0
" (l)	Tb	175	-26.3	Sulfate	U(SO ₄) ₃	ord.	+31.0
Acetate	Tb(CH ₃ CO ₂) ₃	ord.	-65.1	Sulfide (a)	US ₂	292.5	+315.6
Bromate	Tb(BrO ₃) ₃	ord.	-75.9	" (b)	US ₂	290.5	+3470.0
Bromide	TbBr ₃	ord.	-63.9	"	US ₂	ord.	+5206.0
Carbonate	Tb ₂ CO ₃	ord.	-101.6	Vanadium	V	298	+11,220.0
Chlorate	Tb(ClO ₃) ₃	ord.	-65.5	Bromide	VBr ₃	293	+4,255.0
Chloride	TbCl ₃	ord.	-39.3	"	VBr ₃	195	+3,320.0
Chromate	TbCrO ₄	ord.	-57.8	"	VBr ₃	90	+3,760.0
Cyanide	TbCN	ord.	-49.0	"	VBr ₃	293	+4,470.0
Fluoride	TbF ₃	ord.	-44.4	"	VBr ₃	195	+2,890.0
Iodate	Tb(IO ₃) ₃	ord.	-86.8	"	VBr ₃	90	+4,110.0
Iodide	TbI ₃	ord.	-82.2	Chloride	VCl ₃	293	+8,540.0
Nitrate	Tb(NO ₃) ₃	ord.	-66.8	"	VCl ₃	293	+2,410.0
"	Tb(NO ₃) ₃	ord.	-60.8	"	VCl ₃	293	+3,030.0
Oxide	Tb ₂ O ₃	ord.	-145.2	"	VCl ₃	293	+1,130.0
Phosphate	Tb ₂ PO ₄	ord.	-112.5	"	VCl ₄	195	+1,700.0
Sulfate	Tb ₂ SO ₄	ord.	-112.5	"	VCl ₄	90	+4,360.0
Sulfide	Tb ₂ S ₃	ord.	-88.8	Fluoride	VF ₃	293	+2,730.0
Thiocyanate	TbCNS	ord.	-66.7	Oxide	VO ₂	290	+270.0
Thorium	Th	293	+132.0	"	VO ₂	293	+1,976.0
"	Th	90	+153.0	"	VO ₂	ord.	+128.0
Chloride	ThCl ₄ ·8H ₂ O	305.2	-180.0	Sulfide	VS ₂	ord.	+680.0
Nitrate	Th(NO ₃) ₄	ord.	-108.0	"	VS ₂	293	+1,560.0
Oxide	ThO ₂	ord.	-16.0	Water (g)	H ₂ O	>373	-13.1
Thulium	Tm	291	+25,500.0	" (l)	H ₂ O	373	-13.09
Oxide	Tm ₂ O ₃	296.5	+61,444.0	" (l)	H ₂ O	293	-12.97
Tin (white)	Sn	ord.	+3.1	" (l)	H ₂ O	273	-12.93
" (gray)	Sn	280	-37.0	" (s)	H ₂ O	273	-12.65
" (gray)	Sn	100	-31.7	" (s)	H ₂ O	223	-12.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถคืนใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF THE ELEMENTS AND INORGANIC COMPOUNDS (Continued)

DIAMAGNETIC SUSCEPTIBILITIES OF ORGANIC COMPOUNDS

Substance	Formula	Temp. °K.	Susceptibility 10 ⁻⁴ cgs	Compound	-χ _m × 10 ⁴	-χ × 10 ⁴	-K × 10 ⁴
Water (continued)				Acetone-O-benzyl ether	104.8	.642	
" (l)	D ₂ O	302	-12.97	Acetone-O-methyl ether	84.88	.629	
" (l)	D ₂ O	293	-12.76	Acetylacetone	38.9	.546	(.535) (20°)
" (g)	D ₂ O	276.8	-12.66	Acetyl chloride	12.5	.496	(.548) (20°)
" (s)	D ₂ O	276.8	-12.54	Acetylene	86.9	.508	
" (s)	D ₂ O	213	-12.41	Acetylphenylacetylene	71.7	.568	
Xenon	Xe	ord.	-43.9	Acetone	(123.3)	.688	(.757) (20°)
Ytterbium	Yb	292	+249.0	Acridone	61.20	.600	
Ytterbium	Yb	90	+639.0	Adonitol	80.5	.567	
Sulfide	Yb ₂ S ₃	292	+18,300.0	Alkanol	(56.7)	.566	(.525) (20°)
Yttrium	Y	292	+2.15	Allyl acetate	36.70	.632	.540 (20°)
Yttrium	Y	90	+2.43	Allyl alcohol	73.80	.685 (20°)	
Oxide	Y ₂ O ₃	293	+44.4	1-Allylpyrrole	(118.3)	.600	
Sulfide	Y ₂ S ₃	ord.	+100.0	Aminobenzenes	(142.2)	.631	
Zinc (s)	Zn	ord.	-11.4	Aminotoluene	(138)	.61 ± .02	
Zinc	Zn	ord.	-7.8	o-Aminotoluene	62.1	(.602)	
Acetate	Zn(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ ·2H ₂ O	ord.	-101.0	o-Aminobutyric acid	144.8	(.596)	
Carbonate	ZnCO ₃	ord.	-34.9	Aminomethyl ethyl diamine	122.5	(.528)	
Chloride	ZnCl ₂	296	-65.0	o-Aminophenol	56.0	.564	
Cyanide	Zn(CN) ₂	ord.	-46.0	2-Aminophenol	89.06	.684	.5979 (20.7°)
Fluoride	ZnF ₂	290.6	-38.2	n-Amyl acetate	89.40	.687	.596 (20°)
Hydroxide	Zn(OH) ₂	ord.	-67.0	n-Amyl alcohol	(67.5)	.766	(.624) (20°)
Iodide	ZnI ₂	ord.	-98.0	γ-Amyl alcohol	(71.0)	.8060	(.655) (25°)
Nitrate (aq)	Zn(NO ₃) ₂	ord.	-63.0	Inactive Amyl alcohol	69.06	.783 (25°)	
Oxide	ZnO	ord.	-16.0	n-Amyl alcohol	68.96	.782 (25°)	(.64) (15°)
Phosphate	Zn ₃ (PO ₄) ₂	ord.	-141.0	sec-Amyl alcohol	69.1	.785	(.635) (20°)
Sulfate	ZnSO ₄	ord.	-45.0	tert-Amyl alcohol	(70.9)	.804	(.654) (15°)
"	ZnSO ₄ ·H ₂ O	ord.	-63.0	n-Amylamine	69.4	(.796)	(.696) (20°)
"	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	ord.	-143.0	sec-Amylamine	71.6	(.821)	(.616) (20°)
Sulfide	ZnS	ord.	-25.0	n-Amylbenzene	112.55	(.759)	(.652) (20°)
Zirconium	Zr	293	+122.0	sec-Amyl bromide	(88.7)	.587	(.705) (20°)
"	Zr	90	+119.0	n-Amyl chloride	113.52	.717 (25°)	(.616) (25°)
Carbide	ZrC	ord.	-26.0	n-Amyl cyanide	(79.0)	.741	(.662) (20°)
Nitrate	Zr(NO ₃) ₂ ·5H ₂ O	ord.	-77.0	n-Amylene	73.4	(.755)	(.600) (20°)
Oxide	ZrO ₂	ord.	-13.8	Amylene bromide	83.7	.766	
				Amylene chloride	(114.5)	.498	
				sec-Amyl ether	(95.2)	.675	(.635) (15°)
				sec-Amyl formate	(120)	.813	(.501) (25°)
				Amylidene chloride	78.38	.674	
				Amyl iodide	(93.4)	.662	
				n-Amyl ketone	(118.7)	.5996 (18°)	(.910) (20°)
				Amyl nitrate	80.50	.705	(.580) (15°)
				n-Amyl propionate	(76.4)	.574	
				n-Amyl valerate	101.73	.765 (25°)	(.609) (25°)
				Acetol	124.55	.723	(.638) (0°)
				Anethole	(96.0)	.648	(.644) (15°)
				Aniline	62.95	(.676)	(.691) (20°)
				Anisidine	(80.5)	.654	(.72) (20°)
				Anisole	72.79	(.673)	(.672) (15°)
				Anthranthrene	204.2	.739	
				Anthracene	178.1	.581	
				Anthracene	(130)	.731	(.914) (27°)
				Anthracene dinitrile	154.6	(.678)	
				Anthracene nitrile	142.1	(.700)	
				Anthraquinone	(119.6)	.575	(.825) (20°)
				Anthracene	245.7	.646	
				Arabinose	85.70	.571	(.905) (20°)
				Arbutin	158.0	(.589)	
				Asparagine	131.4	(.631)	(.735) (18°)
				Aspartic acid	69.5	(.526)	(.812) (15°)
				Aurin	64.2 ± .4	(.482)	(.800) (12°)
				p-Azobenzene	(161.4)	.556	
				p-Asobenzene	(147.7)	.610	
				p-Asobenzene	(106.6)	.586	.611 (70.5°)
				m-Asobenzene	(171.7)	.635	
				Acrolein	(127.8)	.608	.643 (58°)
				Barbituric acid (calc.)	95.5	.768	
				Barbituric acid (2H ₂ O)	63.8	(.420)	
				Benzalazine	78.6	(.479)	
				Benzaldehyde	(123.7)	.594	
				Benzaldoxime	60.78	(.472)	(.602) (15°)
				Benzamide	(69.8)	.577	(.639) (23°)
				Benzanthrone	(72.3)	.597	(.801) (4°)
				Benzene	142.9	.620	
				Benzene	54.84	.702 (12°)	.611
				Benzil	110.9	.603	(.754) (20°)
				Benzoin acid	(118.6)	.564	(.657) (15°)
				Benzoin anhydride	70.28	(.575)	(.725) (15°)
				Benzonitrile	(124.9)	.552	(.662) (15°)
				Benzophenone	65.19	(.632)	(.638) (15°)
				Benzopyrene	109.60	.601	(.66) (50°)
				3,4-Benzopyrene	125.7	.538	
				Benzopyrene	194.0		
				Benzoyl acetone	(95.0)	.586	(.639) (60°)
				Benzoyl chloride	(75.8)	.539 (20°)	(.657) (15°)
				Benzyl acetate	93.16	(.630)	(.653) (18°)
				Benzyl alcohol	71.83	(.664)	(.697) (15°)
				Benzylamine	75.26	(.702)	(.690) (18°)
				Benzyl chloride	81.98	(.647)	(.713) (18°)
				Benzyl formate	81.43	(.598)	(.646) (20°)
				Benzylideneaniline	(100.4)	.554	
				Benzylidene chloride	(67.6)	.608	(.763) (14°)
				Benzylidene methylamine	(73.1)	.613	
				Benzyl methyl ketone	83.44	.621	(.624) (20°)
				Bibenzyl	(126.8)	.696	.671 (64.5°)

DIAMAGNETIC SUSCEPTIBILITIES OF ORGANIC COMPOUNDS

Compiled by George W. Smith

This table and its supplement contain values for the molar susceptibility of χ_m, specific susceptibility χ, and volumetric susceptibility K. The cgs Gaussian system of units is employed. In the Gaussian units the relation between magnetic induction B and magnetic field strength H is

$$B = H + 4\pi I \quad (1)$$

where I is the magnetization or magnetic moment per unit volume. Actually, the quantities involved in equation (1) are all vectors, but one may assume that all three are collinear, a reasonable assumption for organic diamagnetic substances in the liquid state. For crystals I may vary with crystal orientation. Equation (1) may be written

$$B = H + 4\pi KH = (1 + 4\pi K)H \quad (2)$$

Here, K is the magnetic susceptibility, often called the volumetric susceptibility and is a unitless quantity.

Other susceptibilities of use to chemists and physicists are the specific or mass susceptibility which is defined

$$\chi = K/\rho \quad (3)$$

where ρ is the density of the sample in grams per cc., and the molar susceptibility which is defined as

$$\chi_M = M\chi = MK/\rho \quad (4)$$

where M is the molecular weight of the substance in grams.

Temperatures, when listed, are enclosed in parentheses and are listed in degrees C. Literature references for values contained in this table may be found in General Motors Research Laboratories Bulletin GMR-317 and GMR-396.

Compound	-χ _m × 10 ⁴	-χ × 10 ⁴	-K × 10 ⁴
Acenaphthanthracene	184	.73	
Acenaphthene	109.3	(.709)	
Acetal	81.39	.688 (22°)	(.726) (99°)
Acetaldehyde	22.70	.515	(.403) (18°)
Acetamide	34.1	.577	(.618) (20°)
Acetic acid	31.54	.525 (32°)	(.651) (32°)
Acetic anhydride	(52.8)	.517	(.562) (15°)
Acetaminofluorene	(141)	.63	
Acetone	33.7	.581	(.460) (20°)
Acetonitrile	28.0	(.682)	(.634) (20°)
Acetoxyacetone	62.51	.547	(.531) (20°)
Acetophenone	72.05	.599	(.615) (20°)
Acetophenone oxime	79.9	.592	
Acetophenone oxime-O-methyl ether	92.3	.618	
Acetazine	44.4	.607	(.480) (20°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAMAGNETIC SUSCEPTIBILITIES OF ORGANIC COMPOUNDS (Continued)

Compound	$-2\chi \times 10^6$	$-\chi \times 10^6$	$-K \times 10^6$	Compound	$-2\chi \times 10^6$	$-\chi \times 10^6$	$-K \times 10^6$
3,4-Bis-(p-hydroxyphenyl)-2,4-benzidine	(157)	.59		Chlorofumaric acid	67.02	(.445)	
m,m'-Bitolyl	(127.4)	.6093 (27.4*)	(.699) (16*)	p-Chloroquinone benzene	99.43	(.417)	
m,m'-Bitolyl sulfide	(140.0)	.6530 (27.4*)		Chloromalic acid	67.36	(.448)	(.766) (57*)
Bornol	176.0	.817	(.826) (20*)	Chloromethylstibene	144.8	(.633)	
Bromobenzene	78.92	.5020 (20*)	(.753) (20*)	o-Chloronaphthalene	107.60	.661	.789 (20*)
Bromobenzene diisocyanide	86.88	(.414)		m-Chloronitrobenzene	(74.8)	.475	.638 (48*)
Bromochloromethane	55.0 ± 6	(.425)	(.846) (19*)	p-Chlorophenol	77.4	(.602)	(.747) (18*)
Bromochloroethane	66.3 ± 3	(.405)	(.812) (15*)	1-(o-Chlorophenylazo)-2-naphthol	77.6	(.604)	(.789) (20*)
Bromoforn	82.60	.327	.948 (20*)	1-(p-Chlorophenylazo)-2-naphthol	161.4	(.571)	
Bromonaphthalene	(123.8)	.598		Chlorotrifluoroethylene	49.1	.422	
o-Bromonaphthalene	115.90	.560	.840 (20*)	Chlorotrifluoromethane	45.3 ± 1.5	(.434)	
m-Bromonaphthalene	(93.4)	.546	(.770) (20*)	Cholesterol	(284.2)	.735	(.784) (20*)
Bromotrifluoromethane	73.1 ± 7	(.369)	(.758) (0*)	Chrysenes	166.67	.731	
Butane	57.4	(.888)		Chrysenic acid	(126.3)	.595	
iso-Butane	61.7	(.890)		Cinnamic acid	78.36	.529	(.660) (4*)
1,4-Butanediol	61.5	(.682)	(.696) (20*)	Cinnamic acid (o-trans)	78.2	(.528)	
2-Butene (cis)	42.6	(.759)		Cinnamic acid (p-trans)	79.0	(.533)	
2-Butene (trans)	43.3	(.772)		Cinnamic acid (ca-M P 68*)	77.6	(.524)	
1-Butene-3,4-diacetate	95.5	(.555)		Cinnamic acid (ca-M P 50*)	77.9	(.526)	
2-Butene-1,4-diacetate (cis)	95.2	(.553)		Cinnamic acid (ca-M P 42*)	83.2	(.562)	
2-Butene-1,4-diacetate (trans)	95.1	(.552)		Cinnamic aldehyde	(74.8)	.566	(.625) (15*)
2-Butene-1,4-diol (cis)	54.3	(.616)		Cinnamyl alcohol	(87.2)	.650	(.619) (20*)
2-Butene-1,4-diol (trans)	53.5	(.607)		Cinnamylideneaniline	123.2	(.595)	
n-Butyl acetate	77.47	.666 (25*)	(.583) (25*)	Citral	(98.9)	.650	(.577) (20*)
n-Butyl acrylate	78.52	.676	(.584) (25*)	Coronene	(243.3)	.810	
n-Butyl alcohol	56.536 (20*)	(.7627)	(.6176) (20*)	Coumarin	82.5	(.565)	(.528) (20*)
iso-Butyl alcohol	57.704 (20*)	(.7785)	(.624) (20*)	n-Cresol	72.90	.675	(.706) (20*)
tert-Butyl alcohol	57.653 (20*)	(.7782)	(.629) (20*)	m-Cresol	72.02	.667 (26*)	(.690) (20*)
n-Butylamine	58.9	(.805)	(.611) (20*)	p-Cresol	72.1	.667 (26*)	(.661) (15*)
iso-Butylamine	59.8	(.818)	(.596) (20*)	m-Cresylmethyl ether	81.94	.671 (40*)	(.623) (15*)
n-Butylaziridine	176.0	(.751)	(.599) (20*)	p-Cresylmethyl ether	72.91	.638 (40*)	(.629) (19*)
n-Butylbenzene	100.79	(.751)	(.646) (20*)	Cumene	79.13	.648 (40*)	.744
iso-Butylbenzene	101.81	(.759)	(.648) (20*)	Cyanamide	89.63	.744	(.642)
tert-Butylbenzene	102.5	(.764)	(.662) (20*)	Cyanamide acid	(56.1)	.435	(.690) (15*)
n-Butyl bromide	116.89	.664	(.656) (25*)	Cyanamide acid	101.1 (10*)	(.457)	
Butyl bromide	72.14	.563 (20*)	(.730) (20*)	9-Cyanoanthracene	142.1	(.699)	
iso-Butyl bromide	70.88	.583 (20*)	(.737) (20*)	Cyanogen	(21.6)	.415	(.250) (10, 17*)
1-n-Butyl chloride	67.10	.725	(.642) (20*)	Cyanuric acid	61.5	.476	(.842) (0*)
2-n-Butyl chloride	67.40	.728	(.635) (20*)	Cyclobutanecarboxylic acid	58.16	.5816 (30*)	(.613) (30*)
n-Butyl cyanide	(62.8)	.7558 (27.4*)	(.606) (20*)	1,3-Cyclobutanediol	48.8	(.607)	(.810) (20*)
tert-Butyl cyanide	115.09	.8205	6670 (20*)	1,4-Cyclobutanediol	48.7	(.608)	(.815) (20*)
1,4-Butyl diacetate	103.4	(.594)		Cyclobutane	68.13	.8100 (27.5*)	(.627) (20*)
n-Butyl ethyl ketone	80.73	.707	(.579) (20*)	Cyclobutanecarboxylic acid	83.24	.6499 (30*)	(.668) (30*)
iso-Butyl ethyl ketone	81.704 (20*)	.7174 (27.4*)	(.571) (25*)	Cyclobutanol	73.40	.732	.694 (20*)
n-Butyl formate	65.83	.644	(.574) (25*)	Cyclobutanone	62.04	.632	(.599) (20*)
iso-Butyl formate	66.79	.654		Cyclobutanone oxime	71.5	.671	
iso-Butylideneamine	(95.8)	.683		Cyclobutanone oxime-O-methyl ether	82.9	.652	
Butyl iodide	(93.6)	.6086 (18*)	(.822) (20*)	Cyclohexane	57.5	(.709)	(.567) (20*)
iso-Butyl methyl ketone	70.05	.699	(.581) (20*)	Cyclohexene	64.1	(.653)	
tert-Butyl methyl ketone	69.86	.697	(.588) (16*)	Cyclohexane	91.4	(.815)	(.684) (20*)
p-tert-Butylphenol	126.7	(.469)		Cyclohexene	84.6	(.769)	(.654) (20*)
Butyl sulfide	(113.7)	.719	(.653) (114*)	Cyclohexatriene	(53.9)	.518	
Butyl thiocyanate	(79.38)	.774 (27.4*)	(.652) (16*)	Cyclopentane	59.18	.8439	.6290 (20*)
2-Butyne-1,4-diacetate	95.9	(.564)	(.650) (25*)	Cyclopentane-1-carboxylic acid	73.48	.6446 (30*)	(.677) (30*)
2-Butyne-1,4-dibenzate	109.0	(.561)		Cyclopentane-2-carboxylic acid	51.83	.6111 (30*)	(.682) (30*)
2-Butyne-1,4-diol	50.3	(.584)		Cyclopentadiene	36.9	(.946)	(.685) (-70*)
n-Butyraldehyde	46.08	.639	(.522) (20*)	Cyclopropane	45.33	.5271 (30*)	(.599) (30*)
iso-Butyraldehyde	46.35	.643	(.511) (20*)	Cyclopropanecarboxylic acid	102.8	.764 (20*)	(.656) (20*)
iso-Butyraldehyde	46.10	.644	(.576) (20*)	p-Cymene	106.70	.7718	.6814 (20*)
iso-Butyraldime	45.10	.644	(.598) (20*)	Decalin	(107.0)	.774	(.686) (35*)
n-Butyric acid	85.10	.625	(.601) (25*)	trans-Decalin	(107.7)	.779	(.670) (35*)
iso-Butyric acid	86.06	.636 (25*)	(.569) (15*)	n-Decone	119.74	(.816)	(.6143) (20*)
Butyrolidone	49.4	(.715)		Dextrorotone	48.75	.716 (20*)	
Butyrylphenylacetylene	(100.4)	.618		Diacetal	80.88	.690	(.692) (13*)
Caodyl	(99.9)	.476	(.682) (15*)	Di-iso-amyamine	(153.8)	.668	
Caodylic acid	(79.9)	.579		Diacetic ester	(133.1)	.846	(.649) (21*)
Camphor	(103)	.66	(.67) (25*)	Dibenzocyclohexene	67	(.50)	(.54) (24*)
Camphoric acid	129.0	(.644)	(.791) (20*)	Dibenzofluorene	289.4	.778	
Camphoric anhydride	(113)	.620	(.740) (20*)	1,2,3,6-Dibenzofluorene	162	.69 ± 03	
o-Camphoric acid	78.55	.676	(.624) (25*)	2,4,5,8-Dibenzofluorene	(203)	.72 ± 03	
Caprylic acid	(139.4)	.551		Dibenzpentalene	200.5	.716	
n-Caprylic acid	101.80	.7053	(.647) (20*)	Dibenzpyrene	213.6	.706	
Carbazole	134.05	(.6316)	(.783) (20*)	Dibenzpyrenequinone	183.1	.551	
Carbazole	117.4	(.702)		iso-Dibenzpyrenequinone	194.6	.586	
Carbon disulfide	42.2	.454	(.609) (22*)	Dibenzyl ketone	131.20	.626	
Carbon tetrabromide	81.72	.3286 (20*)	(.966)	p-Dibromobenzene	(101.4)	.430	.785 (100*)
Carbon tetrachloride	66.80	.433	(.691) (20*)	2,3-Dibromo-3-butene-1,4-diol	94.2	(.383)	
Carbon tetradsulfide	(136)	.261	(.113) (20*)	Dibromodichloromethane	81.9 ± 4	(.334)	(.808) (25*)
Carvacrol	(109.1)	.728	(.709) (20*)	1,3-Dibromo-diiodoethylene	(140.1)	.320	
Carvone	(92.3)	.614	(.590) (20*)	1,3-Dibromo-2-thioacrythene	(71.7)	.386	(.877) (17.5*)
Cetyl alcohol	(183.5)	.757 (17.5*)	(.619) (50*)	1,2-Dibromo-3-thioacrythene	(78.0)	.379	(.855) (17*)
Cetyl mercaptan	390.4	(.1510)		Dibromo-4-nitrophenol	(167.5)	.564	
Chloral	(67.7)	.459	(.894) (20*)	1,3-Dibromotetrachloroethane	(126.0)	.387	(1.049)
Chloroacetic acid	(112.6)	.458		Di-n-butylamine	103.7	(.802)	(.767) (20*)
Chloroacetyl chloride	(50.9)	(.509)	(.804) (20*)	Di-iso-butylamine	105.7	(.817)	(.609) (20*)
Chloroacetylchloride	53.7	(.475)	(.710) (0*)	Di-m-butylamine	105.9	(.819)	(.641) (0*)
p-Chloroaniline	89.1	(.625)		Di-tert-butyl ketone	104.30	.734	
Chlorobenzene	69.97	(.6216)	(.688) (20*)	2,6-Di-tert-butyl-4-methyl phenol	104.06	.722	(.591) (20*)
Chlorobenzene diisocyanide	65.02	(.393)		2,4-Di-tert-butyl phenol	155.6	(.754)	
Chlorodibromomethane	75.1 ± 4	(.361)	(.883) (15*)	Dibutyl phthalate	175.1	(.829)	(.857) (21*)
Chlorodifluoromethane	38.6	.446		Di-iso-butylacetylene	(125.0)	.738	
1-Chloro-2,3-dihydroxypropane	(77.9)	.604		Diethyl sulfide	401.7	(.832)	
Chlorodiphenylmethane	(131.9)	(.651)		Dichloroacetic acid	88.2	(.451)	(.705) (20*)
Chloroethylene	35.9	.574	(.325) (10, 15*)	Dichloroacetyl chloride	69.0	(.468)	
Chloroform	59.30	.497	(.740) (20*)				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้