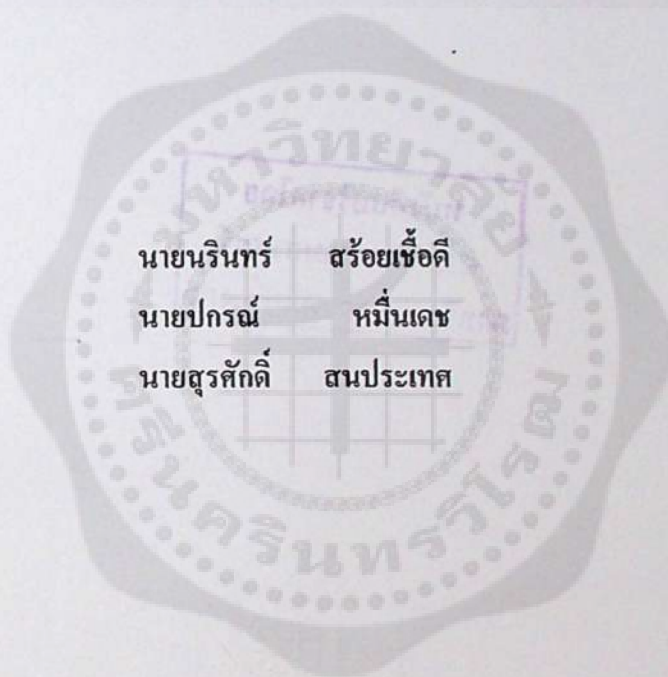


258
2543
ร.2

เครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
MAGNETIC PARTICLE TESTING DEVICE



โครงงานวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2543

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์
โดย

ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

เครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
นายณรินทร์ สร้อยเชื้อดี
นายปรกรณ์ หมั่นเดช
นายสุรศักดิ์ สนประเทศ
วิศวกรรมเครื่องกล
ผศ. กัณท์วิชญ์ พลูปราชญ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒอนุมัติให้นับโครงการวิศวกรรม
ศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

_____ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

_____ ประธานกรรมการ
(ผศ.กัณท์วิชญ์ พลูปราชญ์)

_____ กรรมการ
(อ.ประชา บุญขวานิชกุล)

_____ กรรมการ
(อาจารย์สมชาย เข้มใส)

เครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
ปีการศึกษา 2543

โดย

นายณรินทร์ สร้อยเชื้อดี
นายปรกรณ์ หมั่นเดช
นายสุรศักดิ์ สมนประเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. กัณฑ์วิรัชญ์ พลุประาษฎ์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต กล่าวถึงการทำงานของเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กที่สร้างขึ้นนี้ สามารถทดสอบหารอยร้าวบนผิววัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ในงานเชื่อมโลหะ และวัสดุที่มีรอยร้าวมีความลึกไม่เกิน 5 มิลลิเมตร การสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องทดสอบนี้ทำได้โดยใช้หลักการของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะสร้างสนามแม่เหล็กในแนวขวางของชิ้นงาน เครื่องทดสอบนี้สามารถใช้งานได้กับการทดสอบรอยร้าว ทั้งวิธีแบบเปียก และแห้ง ซึ่งแบบเปียกจะเป็นการทำงานของชุดฉีดสารอนุภาคแม่เหล็กที่ติดตั้งไว้กับตัวเครื่องทดสอบ

MAGNETIC PARTICLE TESTING DEVICE

Academic Year 2000

By

Mr.Narin Shaichadee

Mr.Parkon Muendach

Mr.Surasak Sompatad

Project Report Advisor.

Asst Prof MEngGunwarich Pluphrach

ABSTRACT

This project is about the method to operate machine with Magnetic partical testing method is used to defect surfact in Ferromagnetic material of welding and maximum defect is 5 milliliter of materials. Creating a magnetic field as of this device is applied by a electric coils Electric coil will create magnetic field in magnetizing horizontal work piece. This magnetic particle testing device is able to inspect both wet and dry.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทางคณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ ผศ. กัมพัชร์วิชัย พลูปราชนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิศวกรรมศาสตรที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกๆท่านที่อำนวยความสะดวกต่างๆ ในระหว่างทำโครงการวิศวกรรมศาสตรเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ปราโมทย์ วีรานุกุล หัวหน้าคณะเทคนิคการผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรีที่ให้คำปรึกษาและอุปกรณ์การทดลองมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ของคณะผู้จัดทำ พี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการทำโครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

9 กันยายน 2543

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของโครงการ	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
2. ทฤษฎี	
แม่เหล็ก	3
ขั้วแม่เหล็ก	5
การดึงดูดของแม่เหล็ก	5
สนามแม่เหล็ก	6
เส้นแรงแม่เหล็ก	7
การทำให้เป็นแม่เหล็ก	9
การลบอำนาจแม่เหล็ก	9
แม่เหล็กไฟฟ้า	10
คุณสมบัติของกระแสไฟฟ้า	10
สมการแม่เหล็กไฟฟ้า	10
สนามแม่เหล็กจากเส้นลวดตัวนำ	16

สารบัญ (ต่อ)

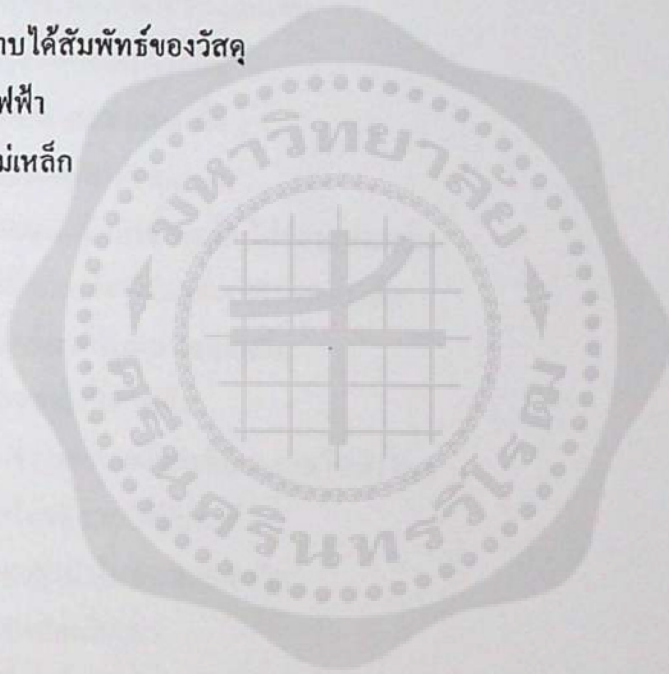
บทที่	หน้า
2. ทฤษฎี (ต่อ)	
สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำ	17
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเอกรูป	18
ความเป็นแม่เหล็ก	21
ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร	22
อำนาจแม่เหล็กไออา	24
เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็กและความล้า	35
ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	36
สนามแม่เหล็กตามแนวยาว	36
สนามแม่เหล็กวงกลม	38
การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	40
ขดลวดตัวนำ	41
อนุภาคแม่เหล็ก	44
คุณสมบัติ	44
อนุภาคแม่เหล็กชนิดแห้ง	46
อนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียก	47
3. การออกแบบและการคำนวณ	
ขดลวดเหนี่ยวนำ	48
ส่วนที่เป็นโข้คแม่เหล็ก	49
ชุดนิคสารอนุภาคแม่เหล็ก	49
โครงเครื่องทดสอบ	50
4. การทดลอง	
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	51
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ	51
เตรียมเครื่องทดสอบ	51

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. การทดลอง (ต่อ)	
วิธีการทดสอบรอยร้าวด้วยอนุภาคแม่เหล็ก	52
ผลการทดลอง	52
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
ปัญหาที่เกิดขึ้นและวิธีแก้ไข	53
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวกที่ 1 ตารางที่ใช้ในการคำนวณ	56
ภาคผนวกที่ 2 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และชิ้นงาน	60
ภาคผนวกที่ 3 แบบแสดงโครงสร้างของเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์	28
2.2 ตารางความไหวตัวได้ของสารต่าง ๆ	31
2.3 ตารางค่าความซึมซาบได้ของสารต่าง ๆ	32
2.4 ตารางการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	40
ตารางภาคผนวกที่	
1.1 ตารางค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของวัสดุ	58
1.2 ตารางปริมาณทางไฟฟ้า	59
1.3 ตารางปริมาณทางแม่เหล็ก	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ก) แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ข) แสดงอิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กได้อีกทางหนึ่ง	5
2.2 แสดงลักษณะอิเล็กตรอนสปินหลายตัว	5
2.3 แสดงการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กขั้วต่างกัน	7
2.4 แสดงการผลักกันของขั้วแม่เหล็กขั้วเหมือนกัน	7
2.5 แสดงเส้นแรงที่เกิดแรงดูดและแรงผลัก	7
2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก	8
2.7 แสดงผดตะไบเหล็กเรียงตัวตามแม่เหล็ก	9
2.8 แสดงการใช้เข็มทิศขนาดเล็กหาขั้วเหนือ-ใต้ของแท่งเหล็ก	9
2.9 แสดงเส้นโค้งความล้าระหว่างที่ทำการลบอำนาจแม่เหล็ก	10
2.10 แสดงประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก	12
2.11 แสดงสนามแม่เหล็กจากตัวที่มีไฟฟ้า	12
2.12 แสดงสนามแม่เหล็กจากขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล	13
2.13 แสดงสนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์	14
2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก	15
2.15 แสดงทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำ	16
2.16 แสดงลักษณะตัวนำที่ดูดกันและผลักกันของตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	18
2.17 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน	19
2.18 แสดงรูปแท่งสารรูปทรงกระบอกที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก	22
2.19 แสดงด้านหน้าของทรงกระบอกเพื่อให้เป็นลักษณะกระแสมูลฐานภายใน	23
2.20 แสดงกราฟอัตราส่วน $M/M_{\max}$	24
2.21 แสดงอำนาจแม่เหล็กพารา	25
2.22 (ก) และ (ข) แสดงอิเล็กตรอนเป็นวงกลมในทิศตรงกันข้าม (ค) แสดงเมื่อมีสนามแม่เหล็ก $V_1 < V_2$ (ง) แสดงเมื่อมีสนามแม่เหล็ก $V_2 > V_0$	26
2.23 (ก) และ (ข) แสดงแวกเตอร์ของโมเมนต์ของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับรูป 2.22	26
2.24 แสดงลักษณะโคเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อดูโดเมนแม่เหล็ก	29
2.26 แสดงการจัดการเครื่องมือเพื่อศึกษาผลของบาร์คสเลน	30
2.27 (ก) แสดงการเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร (ข) แสดงการเรียงตัวของสารเฟอร์รี	31
2.28 แสดงลักษณะของทอรรอยด์	33
2.29 แสดงกราฟความเป็นแม่เหล็กของวัสดุต่างๆ	34
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H กับค่าความซึมซาบได้ในวัสดุ	35
2.31 แสดงเส้นโค้งความล้า	36
2.32 (ก) แสดงสารที่นำแม่เหล็กถาวรดี (ข) แสดงสารที่ทำแกนหม้อแปลงไฟฟ้า	37
2.33 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กตามแนวยาว	38
2.34 แสดงแท่งแม่เหล็กที่เกิดการแตกหัก	38
2.35 แสดงตำแหน่งที่อนุภาคแม่เหล็กรวมตัวกันบนจุดบกพร่อง	38
2.36 แสดงลักษณะรอยแตกร้าวที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสนามแม่เหล็กตามแนวยาว	39
2.37 แสดงสนามแม่เหล็กวงกลม a โดยรอบตัวนำ b โดยรอบชิ้นงาน	39
2.38 (a) แสดงแท่งแม่เหล็กที่นำมาโค้งเป็นวงกลม (b) แสดงแม่เหล็กวงแหวน (c) แสดงแม่เหล็กวงกลมที่เกิดการแตกร้าว	40
2.39 แสดงลักษณะรอยร้าวที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสนามแม่เหล็กวงกลม	41
2.40 แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กที่ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำ	42
2.41 แสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กโดยขดลวดตัวนำ	43
2.42 แสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กโดยใช้เคเบิล	43
2.43 แสดงโข้แม่เหล็กไฟฟ้าแบบตั้งโต๊ะ	44
2.44 แสดงโข้แม่เหล็กไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่ได้	44
2.45 แสดงผลของอนุภาคแม่เหล็กกับรอยร้าวบนชิ้นงาน	46
2.46 แสดงผลของแรงยึดเหนี่ยวอนุภาคแม่เหล็ก	46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	แรงรวมที่กระทำบนประจุไฟฟ้า	N
q	ประจุไฟฟ้า	คูลอมป์
E	สนามไฟฟ้า	V/m
V	ความเร็วที่ประจุเคลื่อนที่	m/s
B	สนามแม่เหล็ก	T, Wb/m ²
I	กระแสไฟฟ้า	A
r	ระยะจากลวดตัวนำถึงสนามแม่เหล็ก	m
a	รัศมีของวงกลมสนามแม่เหล็ก	m
n	จำนวนรอบขดลวด	รอบ
E	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	V
A	พื้นที่หน้าตัดของขดลวด	m ²
ds	พื้นที่ผิวปิด	m ²
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	A/m
L	ความยาวของขดลวด	m
Bo	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่แกนขดลวดเป็นอากาศ	T, Wb/m ²
A	พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน	m ²
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	Vs/m ²
W	ความเร็วเชิงมุมของขดลวด	-
l	ระยะห่างระหว่างตัวนำ ac กับ bc	m
V	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ a'c'	m
MMF	Magnetomotive Force	แอมแปร์-รอบ

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันนี้ ระบบการผลิตสมัยใหม่ในงานอุตสาหกรรมมีการผลิตผลิตภัณฑ์ออกมาได้อย่างรวดเร็วและจำนวนมากขึ้น เพื่อแข่งขันกันในการอุตสาหกรรมและต้องการที่จะลดต้นทุนการผลิต ด้วยเหตุนี้เราจึงจำเป็นต้องนำการทดสอบแบบไม่ทำลายมาใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตให้มากขึ้น เพราะผู้ผลิตต้องคำนึงถึงเรื่องความประหยัดที่จะลดต้นทุนในการผลิต

การทดสอบแบบไม่ทำลาย คือ การทดสอบที่หลังจากการทดสอบแล้วชิ้นทดสอบไม่มีการเสียหายใด ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตรวจสอบกับชิ้นงานจริง เพื่อตรวจสอบดูถึงคุณภาพของชิ้นงานและชิ้นงานที่ถูกตรวจสอบก็สามารถนำกลับมาใช้ได้

การทดสอบแบบไม่ทำลายมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีลักษณะการใช้ที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่

1. การตรวจสอบด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing : UT)
2. การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual inspection)
3. การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (Liquid Penetrate Testing : PT)
4. การตรวจสอบด้วยอนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing : MT)
5. การตรวจสอบด้วยการถ่ายภาพรังสี (Radiographic Testing : RT)

แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก การทดสอบวิธีนี้เป็นการตรวจสอบที่ไม่สิ้นเปลืองมากนัก แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ใช้เฉพาะกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ สิ่งบกพร่องที่สามารถตรวจสอบได้ ได้แก่ สิ่งบกพร่องบนผิวและใต้ผิวเล็กน้อย ทำได้โดยการสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดบนชิ้นทดสอบ จากนั้นจึงใช้ผงเหล็กโรยหรือฉีด (ในกรณีที่เป็นชนิดเปียก) ลงบนชิ้นงานเพื่อให้สิ่งบกพร่องหรือรอยร้าวปรากฏให้เห็นออกมาอย่างชัดเจน

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องสำหรับใช้ทดสอบหาสิ่งบกพร่องบริเวณผิวหรือใต้ผิวเล็กน้อย ลึกไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ของวัสดุที่เป็นวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferro-magnetic) ด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
2. เพื่อคำนวณหาขนาดของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า ให้แก่เครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
3. เพื่อให้เครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้
4. เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการทดสอบวัสดุด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก

ขอบเขตของการศึกษา

1. ออกแบบ และสร้างเครื่องทดสอบรอยร้าว ด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก โดยสามารถใช้ทดสอบหารอยร้าวของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก
2. ศึกษาระบบการทำงานของชุดหัวฉีด และติดตั้งลงบนเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก
3. คำนวณหาขนาดของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบนชิ้นทดสอบ ในแนวยาวได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้สามารถทดสอบหาจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. เป็นเครื่องที่สามารถทดสอบหาจุดบกพร่องที่อยู่บริเวณผิวและอยู่ใต้ผิวลึกไม่เกิน 5 มิลลิเมตร
2. สะดวกต่อการฉีดพ่นสารอนุภาคแม่เหล็กเนื่องจากใช้ระบบการฉีดเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ
3. สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายภายในโรงงาน โดยที่เครื่องมือขนาดเล็กไม่ใหญ่มากนัก และสามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยการเข็น
4. เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยอนุภาคแม่เหล็ก ให้สามารถทดสอบวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

แม่เหล็ก (The Magnet)

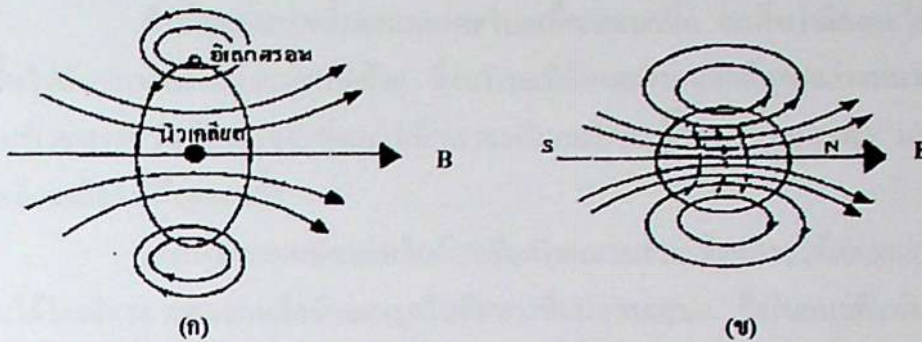
แม่เหล็ก คือ โลหะที่มีคุณสมบัติที่สามารถดึงดูดและดูดติดกับเหล็กได้ ลักษณะรูปร่างทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

- แม่เหล็กแบบแท่ง (Bar magnet)
- แม่เหล็กเกือกม้า (Horseshoe magnet)

ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้ มีอำนาจแม่เหล็กอยู่ในตัวของมันเอง และเป็นแม่เหล็กถาวร สมบัติความเป็นแม่เหล็กของโลหะนั้นเกิดจากอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็กไปได้สองทางก็คือ

- อิเล็กตรอนหมุนวนรอบนิวเคลียสในอะตอม การหมุนวนนั้นก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำที่เป็นขดลวดวงกลมทิศทางของกระแสไฟฟ้านั้นตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบวงโคจร (orbital motion)

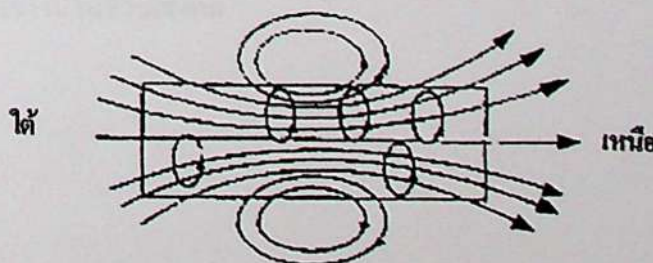
- เกิดจากคุณสมบัติประจำตัวของอิเล็กตรอน กล่าวคือ อิเล็กตรอนประพฤติตัวคล้ายกับว่าเป็นแท่งแม่เหล็กแท่งเล็ก ๆ ส่งสนามแม่เหล็กออกโดยรอบหรืออาจเสมือนหนึ่งว่าอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุไฟฟ้าลบที่หมุนรอบตัวเองการหมุนของอิเล็กตรอนเรียกว่า อิเล็กตรอนสปิน (electron spin) หรือ การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดังกล่าว



รูปที่ 2.1 ก) แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอม ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก
ข) แสดงอิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กได้อีกทางหนึ่ง

การเกิดสนามแม่เหล็กจากสองทางดังกล่าวแล้วนั้นถ้าเป็นแท่งแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะเกิดจากอิเล็กตรอนสปินมากกว่าที่จะเกิดจากการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียส แต่ถ้าไม่ใช่วัสดุที่จะนำมาทำแท่งแม่เหล็กได้แล้วการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลมจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากกว่า

การแสดงความเป็นแม่เหล็กออกมานั้นก็คือ โลหะชนิดนั้นมีอิเล็กตรอนสปินหรือหมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียสในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าในอีกทิศทางหนึ่ง โดยทั่วไปนั้นโลหะที่ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กออกมาก็เพราะเมื่อมีการหมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนตัวหนึ่งก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวหมุนวนในทิศทางตรงกันข้ามสนามแม่เหล็กก็จะหักล้างกันหมดในทำนองเดียวกันเมื่อมีอิเล็กตรอนสปินไปในทิศทางหนึ่ง ก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวสปินไปในทิศทางตรงข้ามสนามแม่เหล็กก็จะหักล้างกันอีกสำหรับแม่เหล็กแท่งใดที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงก็แสดงว่ามีจำนวนอิเล็กตรอนที่หมุนหรือสปินไปในทิศทางเดียวกันมาก



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะอิเล็กตรอนสปินหลายตัว

1. ขั้วแม่เหล็ก (Magnet poles)

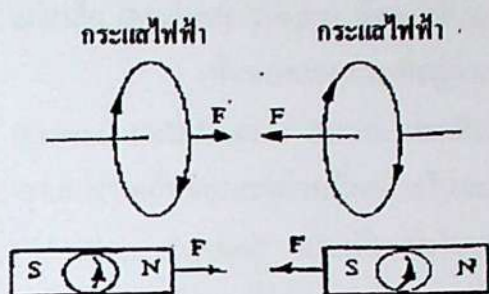
ถ้าวางแท่งแม่เหล็กลงบนผงตะไบเหล็กและยกขึ้น จะเห็นว่ามีผงตะไบเหล็กถูกดูดติดขึ้นไปกับปลายของแท่งแม่เหล็กด้วย ซึ่งบริเวณที่มีผงตะไบเหล็กติดอยู่อย่างหนาแน่นที่สุดจะเป็นบริเวณตรงส่วนปลายของแท่งแม่เหล็กเราจะเรียกบริเวณนั้นว่า ขั้วแม่เหล็ก และโดยทั่วไปแม่เหล็กจะมีอย่างน้อยสองขั้ว

และถ้าแขวนแท่งแม่เหล็กด้วยเชือกในแนวนอนแล้วปล่อยให้แท่งแม่เหล็กสามารถหมุนได้โดยอิสระ แท่งแม่เหล็กมักจะหยุดในทิศทางที่แน่นอนเสมอ ซึ่งในแนวที่แท่งแม่เหล็กหยุดนั้นก็คือ ทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก โดยจุดปลายที่ชี้ไปทางด้านเหนือคือ ขั้วเหนือ (North pole) และปลายที่ชี้ไปทางด้านใต้คือ ขั้วใต้ (South pole) ของแท่งแม่เหล็กนั่นเอง

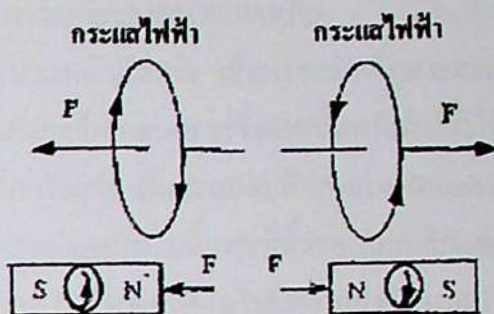
2. การดึงดูดของแม่เหล็ก (Attraction)

เมื่อแม่เหล็กดูดเหล็ก แรงดูดนี้ไม่ใช่เกิดจากแม่เหล็กดูดแต่ทางเดียวเป็นแรงต่างร่วมกันระหว่างแม่เหล็กกับเหล็ก ถ้าเรานำเข็มทิศมาอันหนึ่งและแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ซึ่งเราแน่ใจว่าไม่ใช่แม่เหล็กเข้ามาใกล้ขั้วใดขั้วหนึ่งของเข็มทิศ เราจะเห็นว่าปลายของเข็มทิศจะบิดเข้ามาหาแท่งเหล็กนั้น ครั้นพอเราเปลี่ยนโดยนำแท่งเหล็กแท่งนั้น ไปแขวนแล้วเอาเข็มทิศเข้าไปใกล้แท่งเหล็กที่แขวนไว้ แท่งเหล็กจะบิดปลายเข้ามาหาเข็มทิศทันที นี่เป็นการแสดงให้เห็นว่า แรงที่เกิดขึ้นไม่ใช่แรงที่เกิดขึ้นจากทางใดทางหนึ่ง แต่เป็นแรงต่างร่วมกันระหว่างเหล็กกับแม่เหล็กโดยที่อันใดสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่ากัน ก็จะเคลื่อนที่เข้าหาอีกอัน คือ ถ้ามีแรงที่แม่เหล็กดูดเหล็กเป็นจำนวนเท่าไร ก็จะมีแรงที่เหล็กดูดแม่เหล็กเป็นค่าเท่า ๆ กัน ในขณะเดียวกันนั้น

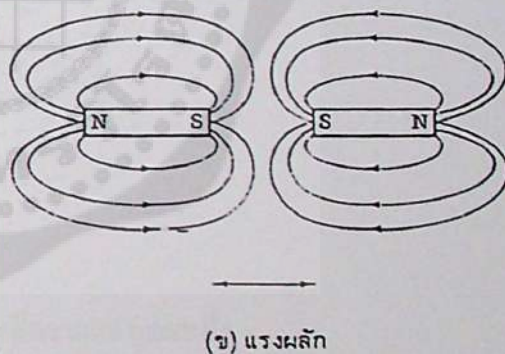
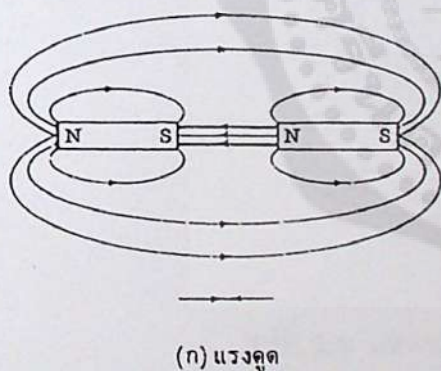
นอกจากนั้น ถ้าเรานำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าไปใกล้ขั้วเหนือของเข็มทิศ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ การผลักกันแต่ถ้าเรานำขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าไปใกล้ขั้วใต้ของเข็มทิศสิ่งที่เกิดขึ้นคือ การดูดกัน เราจึงสรุปได้ว่า ขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันจะผลักกัน และขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันจะดูดกัน การดูดกันหรือการผลักกันของขั้วแม่เหล็กเป็นแรงกระทำที่สามารถวัดค่าได้ เช่น แม่เหล็กที่นำไปใช้งานในด้านเชิงกล



รูปที่ 2.3 แสดงการดึงดูดกันของขั้วแม่เหล็กขั้ว
ต่างกันอธิบายด้วยกระแสไฟฟ้าไหลเป็นวงกลม
ทางเป็นวงกลมทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.4 แสดงการผลักกันของขั้วแม่เหล็กขั้ว
เหมือนกันอธิบายด้วยกระแสไฟฟ้าไหลในทิศ
ตรงกันข้าม



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นแรงที่เกิดแรงดูดและแรงผลัก

3. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

สนามแม่เหล็ก คือ บริเวณที่แม่เหล็กแท่งหนึ่งสามารถแสดงอำนาจแม่เหล็กออกไป
ถึงได้และสามารถนำแรงที่เกิดขึ้นจากอำนาจแม่เหล็กมาใช้ประโยชน์ได้เรียกว่า สนามแม่เหล็ก
(Magnetic Field) ของแม่เหล็กแท่งนั้น

บริเวณที่อำนาจแม่เหล็กแสดงได้ออกไปนอกแท่งแม่เหล็กได้ เรียกว่า สนามแม่
เหล็กภายนอก (External Magnetic Field) หรือ อำนาจแม่เหล็กที่อยู่ภายในแท่งแม่เหล็ก เรียกว่า
สนามแม่เหล็กภายใน (Internal Magnetic Field)

4. เส้นแรงแม่เหล็ก (Field Lines)

เส้นแรงแม่เหล็ก คือ เส้นที่สมมุติขึ้นมาโดยหาได้จากทอร์กที่เกิดขึ้นจากอำนาจแม่เหล็ก (Magnetic Torque) ซึ่งจะใช้บอกทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็ก

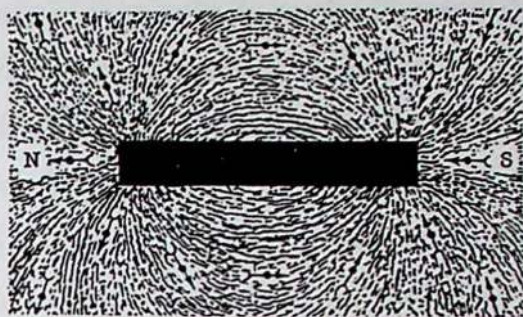
เส้นของแรงส่วนที่อยู่ภายนอกของแท่งแม่เหล็กเรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กภายนอก (External Field Lines of Force) และเป็นเส้นในสนามแม่เหล็กภายนอกจะวิ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้เสมอ ส่วนเส้นของแรงส่วนที่อยู่ในของแท่งแม่เหล็ก เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กภายใน (Internal Field lines of Force) และเป็นเส้นในสนามแม่เหล็กภายในจะไม่ไปสิ้นสุดที่ขั้วของแม่เหล็กแต่ดูเหมือนกับว่าเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านตัวแท่งแม่เหล็กออกไป เส้นแรงแม่เหล็กภายในไม่มีความสำคัญมากนัก เมื่อพูดถึงเส้นแรงแม่เหล็กจะหมายถึง เส้นแรงแม่เหล็กภายนอกเสมอ ณ จุดใดจุดหนึ่ง เส้นแรงแม่เหล็กจะตัดกันไม่ได้ และเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งในลักษณะรูปแบบวงจรปิด (Closed circuit)



รูปที่ 2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็ก

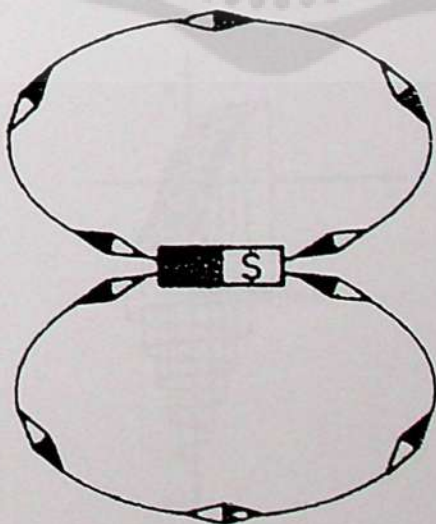
วิธีเขียนเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้กันอยู่มี 2 วิธี คือ

4.1 ใช้ผงตะไบเหล็ก (iron filing) ทำได้โดยนำแม่เหล็กที่ต้องการหาเส้นแรงแม่เหล็กวางไว้บนโต๊ะและนำกระดาษวางลงบนแม่เหล็กแล้วนำผงตะไบเหล็กมาโรยลงบนกระดาษและเคาะกระดาษเบา ๆ ผงตะไบเหล็กจะเรียงตัวตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็กลักษณะเป็นเส้นโค้งจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของขั้วแม่เหล็กนั้นการที่ผงตะไบเหล็กเรียงตัวเช่นนั้นก็เพราะว่าผงตะไบเหล็กเป็นเหล็กอ่อน และถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กชั่วคราวขึ้น ทำให้เกิดการเรียงตัวขึ้นดังกล่าว



รูปที่ 2.7 แสดงผงตะไบเหล็กเรียงตัวตามแม่เหล็ก

4.2 ใช้เข็มทิศขนาดเล็ก (Magnetic needle) ทำได้โดยนำกระดาษขนาดใหญ่มานั่งแผ่นวางไว้บนโต๊ะแล้วนำแท่งแม่เหล็กที่เราต้องการทราบแนวเส้นแรงแม่เหล็กวางทับลงบนกระดาษขีดเส้นรอบแท่งแม่เหล็ก จากนั้นนำเข็มทิศขนาดเล็กมาวางไว้ที่ทางด้านข้างเหนือของแท่งแม่เหล็กนำดินสอมาจุดไว้บนหน้ากระดาษสองจุด a,b เพื่อแสดงว่าหัวเหนือและหัวใต้ของเข็มทิศว่าอยู่ที่ไหน เสร็จแล้วเลื่อนเข็มทิศต่อไปเรื่อย ๆ ที่จุด c,d,e,f จนถึงปลายอีกด้านหนึ่งของหัวแม่เหล็ก ก็จะได้เส้นโค้งซึ่งเป็นแนวของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.8 แสดงการใช้เข็มทิศขนาดเล็กหาหัวเหนือ-ใต้ของแท่งแม่เหล็ก

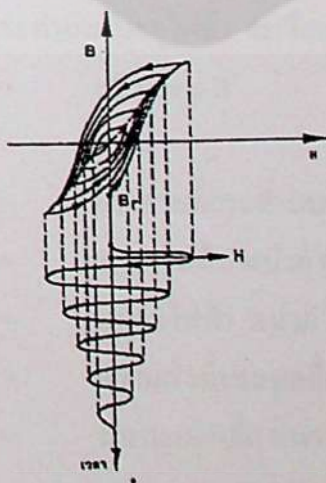
5. การทำเหล็กให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization)

การทำเหล็กให้เป็นแม่เหล็ก คือ การทำให้อิเลคตรอนในเหล็กเกิดการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรหรืออิเลคตรอนสปิน จากการใช้แรงของแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetic Force) หรือจากการใช้กระแสไฟฟ้าไปเหนี่ยวนำบังคับให้อิเลคตรอนเกิดภาวะเช่นนั้น ถ้าแรงที่ใช้บังคับมีน้อย อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเหล็กก็จะมีน้อย แต่ถ้าแรงที่ใช้บังคับมีมาก อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเหล็กก็จะมีมาก แต่ไม่ได้หมายความว่าเหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็กมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่จะมีอยู่จุด ๆ หนึ่ง ที่อิเลคตรอนที่เคลื่อนที่เป็นวงโคจร หรืออิเลคตรอนสปินจนหมด ทัวทั้งแท่งเหล็กแล้ว ในขณะนั้นอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเหล็กจะมีค่าสูงสุด และไม่สามารถเพิ่มอำนาจแม่เหล็กขึ้นได้อีก เรียกว่า เกิดอำนาจแม่เหล็กอิ่มตัว (Magnetic Saturation)

การทำให้เหล็กเป็นแม่เหล็กนั้นเป็นการทำให้เป็นแม่เหล็กชั่วคราว (Temporary Magnet) เท่านั้น และวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป เช่น การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า เป็นต้น

6. การลบอำนาจแม่เหล็ก (demagnetization)

การลบอำนาจแม่เหล็ก คือ การทำให้เหล็กที่มีอำนาจแม่เหล็กกลับคืนเป็นเหล็กธรรมดาเหมือนเดิม โดยมีวิธีการต่าง ๆ เช่น การให้ความร้อนแล้วทุบหรือเคาะ การลดกระแสไฟฟ้าลงอย่างช้า ๆ สำหรับอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า หรือการให้กระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเหนี่ยวนำในครั้งแรก เป็นต้น แต่โดยปกติแล้วถ้าแม่เหล็กถูกปล่อยทิ้งไว้เฉย ๆ เป็นเวลานาน ๆ ก็จะทำให้อำนาจแม่เหล็กลดลงจนหมดไปได้เอง



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ที่ทำการลบอำนาจแม่เหล็ก โดยการค่อยๆ ลดไฟฟ้ากระแสสลับ

แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)

คือ การทำชิ้นงานหรือวัสดุที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกให้เป็นแม่เหล็กชั่วคราว โดยการใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหรือเหนี่ยวนำ

1. คุณสมบัติของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1.1 กำเนิดความร้อน เช่น เครื่องทำความร้อน, เตารีด, หลอดไฟฟ้า, อุปกรณ์ขดลวดความร้อน เป็นต้น

1.2 ปฏิกริยาไฟฟ้า-เคมี เช่น การวิเคราะห์สารประกอบเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า (electrolysis), การกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีด้วยไฟฟ้า (galvanization), การกัดกร่อน (Corrosion) เป็นต้น

1.3 เกิดอำนาจแม่เหล็ก เช่น ลำโพง, โทรศัพท์, มอเตอร์ไฟฟ้า, อุปกรณ์รีเลย์ เป็นต้น

ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวมาต่าง ๆ เหล่านี้จะอธิบายเพียงผลที่เกิดขึ้นจากอำนาจแม่เหล็กเท่านั้น

2. สมการทางแม่เหล็ก-ไฟฟ้า

สมการลอเรนซ์ (Lorentz Equation)

ในกรณีที่ประจุไฟฟ้า กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเข้าไปในบริเวณที่มีทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า แรงรวมที่กระทำบนประจุไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = qE + qv \times B \quad (2.1)$$

เมื่อ

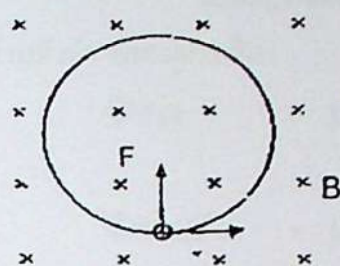
F = แรงรวมที่กระทำบนประจุไฟฟ้า หน่วย นิวตัน (N)

q = ประจุไฟฟ้า หน่วย คูลอมป์

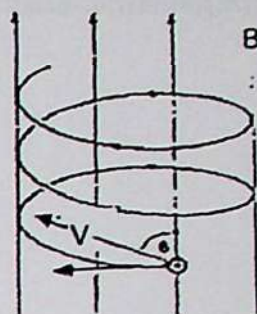
E = สนามไฟฟ้า หน่วย โวลต์ต่อเมตร (V/m)

v = ความเร็วที่ประจุเคลื่อนที่ หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

B = สนามแม่เหล็ก หน่วย เทสลา (T) หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m²)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 แสดงประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ก) ความเร็วตั้งฉากกับ B

ข) ความเร็วทำมุม θ กับ B

2.1 กฎของบิโอต์ และซาวาร์ต (Biot and Savart's Law)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำ หรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ จะเกิดสนามแม่เหล็ก ในบริเวณนั้น และสามารถคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

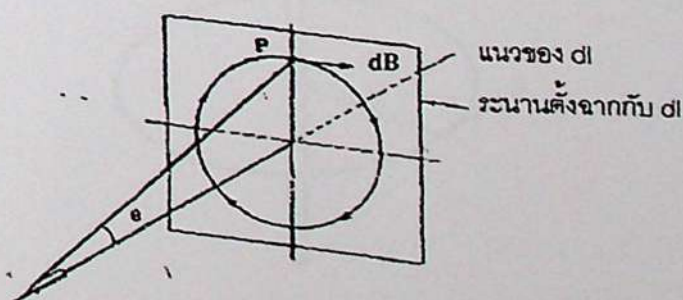
$$|dB| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \times \frac{Idl \sin\theta}{r^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$\frac{\mu_0 I}{4\pi}$ = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 10^{-7} เวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร (Wb/Am)

I = กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A)

r = ระยะจากลวดตัวนำถึงสนามแม่เหล็ก หน่วย เมตร (m)



รูปที่ 2.11 แสดงสนามแม่เหล็กจากตัวนำที่มีไฟฟ้า

2.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

เป็นกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดกับกระแสไฟฟ้า

ที่ไหลผ่านตัวนำ ดังสมการ คือ

$$\Phi_{B \cdot dl} = \mu_0 I \quad (2.3)$$

หรือ

$$\Phi_{B \cos \theta \cdot dl} = \mu_0 I \quad (2.4)$$

เมื่อ

θ = มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะทางสั้น ๆ dl

μ_0 = ค่าความซึมซาบได้ของสุญญากาศ (Permeability of Air) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร (Wb/Am)

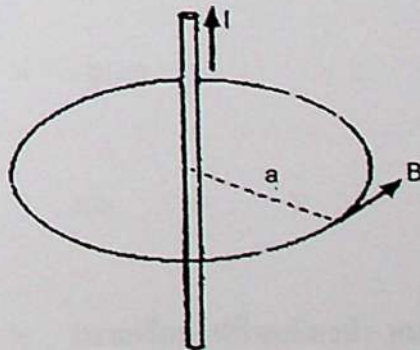
I = กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A)

- ในกรณีที่ตัวนำมีลักษณะเป็นเส้นลวดตัวนำ ที่มีกระแสไฟฟ้า และมี การหมุนเวียนของสนามแม่เหล็กเป็นวงกลม ซึ่งมีลวดตัวนำเป็นจุดศูนย์กลาง จะได้สมการ คือ

$$\begin{aligned} \Phi_{B \cdot dl} &= 2(2\pi a) = \mu_0 I \\ B &= \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ

a = รัศมีของวงกลมสนามแม่เหล็ก หน่วย เมตร (m)



รูปที่ 2.12 แสดงสนามแม่เหล็กเนื่องจากลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหล

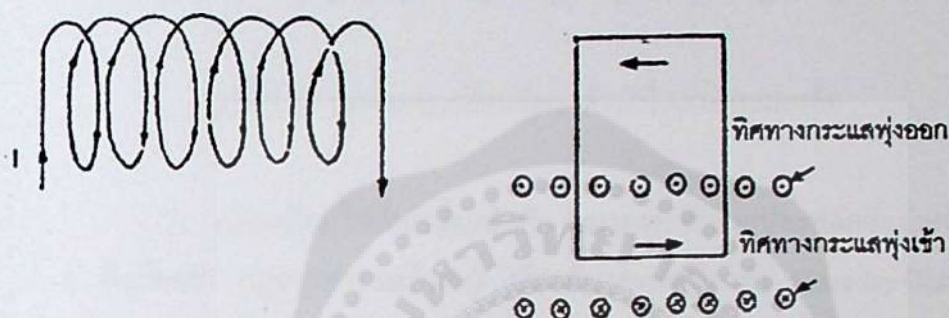
- ในกรณีที่มิตัวนำมีลักษณะเป็นขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลดังสมการ

คือ

$$B = \mu_0 \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$n = \text{จำนวนขดลวด หน่วย รอบ}$$



รูปที่ 2.13 แสดงสนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์

2.3 กฎของฟาราเดย์และ เฮนรี เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ

ขณะที่ตัวนำ ab เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว มาถึงตำแหน่ง a,b , ได้ระยะทาง ds ดังรูป วงจร $abcd$ จะลดลงเหลือ a,b, cd พื้นที่ของวงจรจะลดลงไปเท่ากับ $l ds$ ดังนั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่ลอดผ่านวงจรจาก $B (abcd)$ ลดลงเหลือ $B (a,b, cd)$ หรือลดลงไปเท่ากับ $b l ds$ การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นไปดังสมการ คือ

$$d\Phi = - B l ds$$

หรือ

$$d\Phi = - B l v dt$$

ดังนั้น

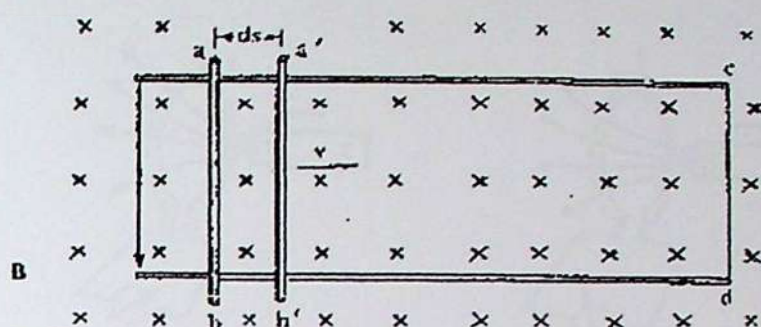
$$-\frac{d\Phi}{dt} = B l b = E \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$E = \text{แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หน่วย โวลต์ (V)}$$

$$l = \text{ระยะห่างระหว่างตัวนำ } ac \text{ กับ } bd \text{ หน่วย เมตร (m)}$$

$$v = \text{ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ } a,c, \text{ หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)}$$



รูปที่ 2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก

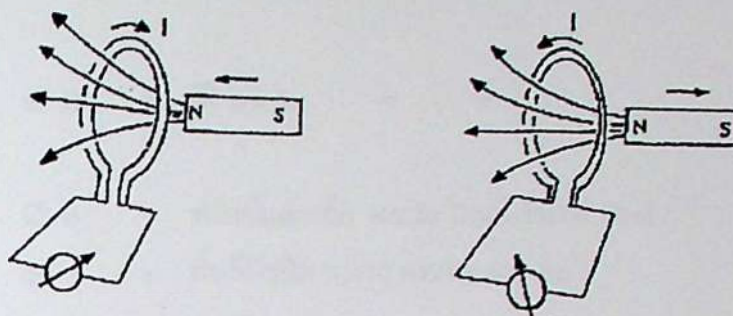
∴ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ในวงจร ปิดใด ๆ ซึ่งเรียกว่า กฎของฟาราเดย์-เฮนรี เกี่ยวกับวงจรเหนี่ยวนำ (Faraday-Henry law of Electromagnetic induction) เครื่องหมายลบจะแสดงถึงทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.4 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

จะใช้สำหรับใช้ในการหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะปรากฏในทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็กต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเดิม

2.5 กฎของเลนซ์อาจพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

- 1) ถ้าตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กดังรูป 2.14 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำนั้นจะเสริมกับสนามแม่เหล็กเดิมที่ถูกตัดแล้ว
- 2) ถ้าสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ใกล้ขดลวดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่นั้นทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กใกล้ขดลวดแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.15 แสดงทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำ

สมการที่ได้คือ

ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวด $\Phi = BA \cos \alpha$

เมื่อ

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด หน่วย ตารางเมตร (m^2)

ดังนั้น

$$\frac{d\Phi}{dt} = -BA \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt}$$

ถ้าขดลวดมีจำนวน n รอบ

และ

$$\frac{d\alpha}{dt} = w = \text{ความเร็วเชิงมุมของขดลวด}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = n BA w \sin \alpha$$

โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด ($\sin 90^\circ = 1$)

$$E_{\max} = n BA w$$

ดังนั้น

$$E = E_{\max} \sin \alpha \quad (2.8)$$

2.6 กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก (Gaussian Surface's Law)

ใช้ในการหาฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวปิดรอบประจุต้องมีค่าเป็นศูนย์

ได้สมการคือ

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \sum I_{\text{enclosed}} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \text{ฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วย โวลต์-วินาที (Vs)}$$

$$d\mathbf{s} = \text{พื้นที่ผิวปิด หน่วย ตารางเมตร (m}^2\text{)}$$

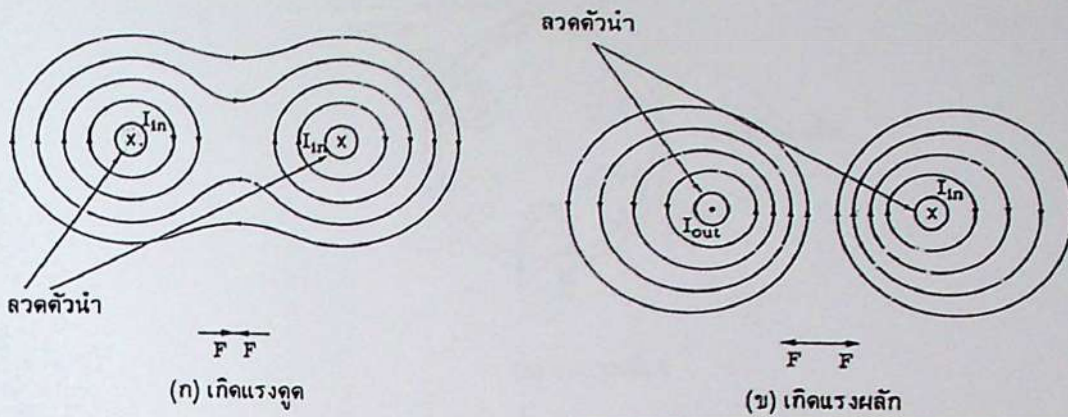
3. สนามแม่เหล็กจากเส้นลวดตัวนำ

ถ้าเรานำลวดตัวนำมาวางไว้ที่ด้านข้างขนานกับเข็มทิศที่วางตัวในแนวขั้วเหนือขั้วใต้ และจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้าไปในขดลวดตัวนำเข็มของเข็มทิศจะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งเดิมที่วางตัวอยู่ในแนวขั้วเหนือ-ขั้วใต้ เบนเข้าหาลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้า แต่ถ้าทดลองกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามจากเดิม เข็มของเข็มทิศก็จะเบนเข้าหาลวดตัวนำเหมือนเดิมแต่จะเบนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไว้ในครั้งแรก เมื่อเราหยุดให้กระแสไฟฟ้ากับลวดตัวนำเข็มของเข็มทิศก็จะเคลื่อนตัวกลับสู่ตำแหน่งเดิมคือแนวขั้วเหนือ-ขั้วใต้

จากการทดลองข้างต้น กล่าวคือ ในระหว่างที่ให้กระแสไฟฟ้ากับลวดตัวนำ ทำให้ลวดตัวนำเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบตัวของมันเอง ซึ่งเห็นได้จากการเบี่ยงเบนของเข็มทิศ และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะหดรัดอำนาจลงเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้า

และเมื่อนำลวดตัวนำสองเส้นมาวางขนานกันแล้วให้กระแสไฟฟ้ากับลวดตัวนำทั้งสอง ผลที่เกิดขึ้นจะเป็นไปคือ

- ถ้าให้กระแสไฟฟ้ากับลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางเดียวกันสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะ “ดูดกัน”
- ถ้าให้กระแสไฟฟ้า กับลวดตัวนำทั้งสองในทิศทางที่สวนทางกันสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะ “ผลักกัน”



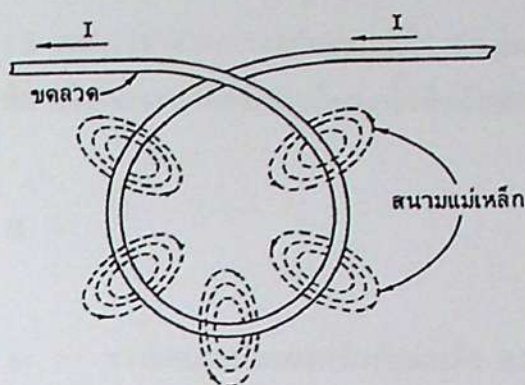
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของตัวนำที่คู่กันและผลักกันของตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลวดตัวนำมีลักษณะเป็นวงกลมปิดโดยจุดศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กก็คือ จุดศูนย์กลางของขดลวดตัวนำ และทิศทางในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (กระแสไฟฟ้า) จะเคลื่อนที่ต่างจากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก

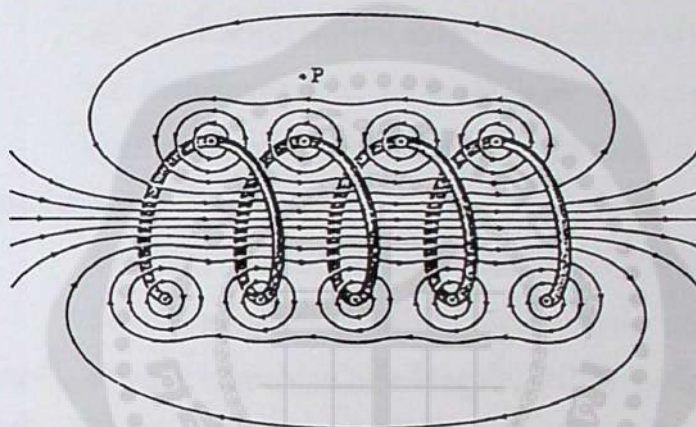
ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะแสดงให้เห็นถึงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำ และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลง เมื่อลวดตัวนำมีความยาวเพิ่มขึ้น

4. สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำ

เมื่อเรานำเส้นลวดตัวนำมาดัดให้เป็นวงแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านขดลวดที่เป็นวงรูปแบบของสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 2.16 แต่ถ้านำลวดตัวนำมาดัดให้เป็นวงหลาย ๆ วงต่อกัน ลักษณะที่ได้ก็คือขดลวด และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบเป็นวงแหวนวิ่งผ่านขดลวดทุกขดทั้งอันจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ขดลวดเดียว ๆ แต่ละอันรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะดังรูป



(ก) ขดลวดเดี่ยว



(ข) ขดลวดหลายขด

รูปที่ 2.17 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน

ซึ่งลักษณะการวิ่งบนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดมีลักษณะเดียวกันกับการวิ่งของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กเราจึงเรียกว่า “สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเอกรูป (The Uniform Electromagnetic Field)”

5. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเอกรูป (The Uniform Electromagnetic Field)

5.1 ฟลักซ์แม่เหล็ก (The magnetic flux)

ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด สามารถใช้ในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กก็คือ “ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux)” ซึ่งใช้สัญลักษณ์ “ Φ ” (phi) มีหน่วยวัดเป็นโวลท์วินาที (Vs)

5.2 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

คือ ปริมาณของฟลักซ์แม่เหล็กต่อพื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน เขียนได้

ดัง สมการ

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.10)$$

เมื่อ

B = ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)

หน่วย โวลท์วินาทีต่อตารางเมตร (Vs/m^2)

Φ = ฟลักซ์แม่เหล็ก (The magnetic flux) หน่วย โวลท์วินาที (Vs)

A = พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน หน่วยตารางเมตร (m^2)

5.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strengths)

การที่ขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมาก ๆ ได้นั้น ขดลวดจะต้องมีจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากวิ่งผ่านแต่ละพื้นที่ของขดลวด

ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก คือ

- ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด กล่าวคือ ถ้าให้กระแสไฟฟ้ากับขดลวดมากขึ้น แรงกระทำบนสนามแม่เหล็กก็จะสูงขึ้น ทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

- จำนวนรอบขดลวด คือ ถ้าเราควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดให้คงที่แล้วแรงกระทำบนสนามแม่เหล็กจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนรอบขดลวดมีมากขึ้น โดยเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แต่ความยาวของขดลวดจะต้องยาวเท่าเดิม

- ความยาวของขดลวด คือ ถ้าให้จำนวนรอบขดลวดเท่าเดิม และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดคงที่เท่าเดิมความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงก็ต่อเมื่อความยาวของขดลวดเพิ่มขึ้น

- ขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกัน แต่จำนวนรอบขดลวดเท่าเดิม ความยาวของขดลวดเท่าเดิมและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดคงที่เท่าเดิมแล้วความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมกล่าวคือ ขดลวดที่มีพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

สรุปได้ คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้า และเป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดต่อความยาวของขดลวด จากความสัมพันธ์นี้ สามารถเขียนในรูปของสมการได้คือ

$$H = \frac{I \times n}{l} \quad (2.11)$$

เมื่อ

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field Strength)
หน่วย แอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

I = กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A)

n = จำนวนรอบขดลวด หน่วย รอบ

l = ความยาวของขดลวด หน่วย เมตร (m)

5.4 ปริมาณกระแสไหลวน (Ampere turns number)

เนื่องจากเราต้องการความเข้มของสนามแม่เหล็ก ที่มีค่าสูง ๆ เพื่อนำไปใช้งาน ทำให้เราต้องใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูงมากจ่ายให้แก่ขดลวด การใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวด และกระแสไหลวนนี้จะทำให้การสูญเสียทางไฟฟ้าในรูปของความร้อน

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Relationship between magnetic flux density and field strength)

จากกฎพื้นฐานของสนามแม่เหล็กของขดลวดที่มีแกนกลางเป็นอากาศ

$$B_0 = \mu_0 \times H \quad (2.12)$$

เมื่อ

B_0 = ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่แกนขดลวดเป็นอากาศ หน่วย เทสลา หรือเวเบอร์ต่อตารางเมตร (T, Wb/m²)

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หน่วยแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

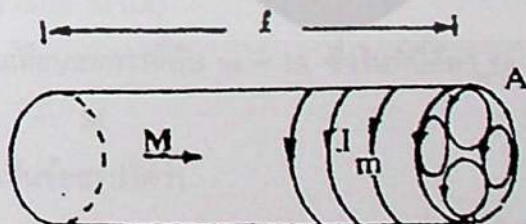
μ_0 = ค่าความซึมซาบได้ของสูญญากาศ (absolute permeability) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ โวลต์วินาทีต่อแอมแปร์เมตร (Vs / Am)

สำหรับขดลวดที่มีแกนกลางเป็นเหล็กค่าความซึมซาบได้ก็จะแตกต่างออกไปจากเดิมสาเหตุเพราะว่า แกนเหล็กสามารถทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการกระจุกตัวได้ดีขึ้นทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นซึ่งค่าความซึมซาบได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด

6. ความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization)

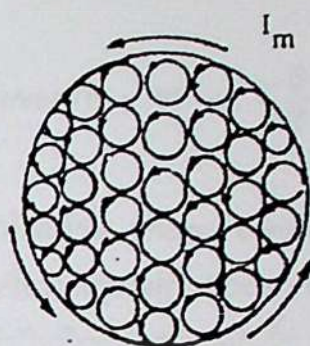
อะตอมจะแสดงสมบัติว่ามีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดอิเล็กตรอนในวงโคจรต่าง ๆ ของอะตอมนั้น ๆ โมเลกุลนั้นส่วนมากมักไม่อยู่ในลักษณะก่อนกลวมจึงมักจะมีโมเมนต์ขั้วคู่แสดงออก ตัวอย่างเช่น โมเลกุลประเภทที่สองอะตอมเกาะกัน เช่น พวกแก๊สต่าง ๆ จะมีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กตามแนวแกนของโมเลกุลนั้น สารที่อยู่ในลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ยกเว้นสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์จะไม่แสดงโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กเนื่องจากโมเลกุลของมันเรียงตัวมีทิศทางอย่างสุ่ม แต่ถ้าหากว่ามีสนามแม่เหล็กภายนอกมาอยู่ในบริเวณสารนั้นทำให้การโคจรของอิเล็กตรอนมีทิศทางเปลี่ยนไป อำนาจแม่เหล็กจะเกิดขึ้นมาในสารก้อนนั้นได้ ดังเช่นที่ได้กล่าวแล้ว ในเรื่องการนำแท่งแม่เหล็กมาใกล้แท่งตะปู การที่ทำให้สารหนึ่งสารใดแสดงความเป็นแม่เหล็กออกมาโดยใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกนี้ เรียกว่า การทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และการที่อะตอมหรือโมเลกุลมีทิศโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กในทิศหนึ่งทิศใดมากกว่าทิศอื่นนั้น เรียกว่า โพลาไรเซชันทางแม่เหล็ก (magnetic polarization)

ในขั้นนี้ เราจะได้พิจารณาสารรูปทรงกระบอกที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอในแนวนานกับแกนของทรงกระบอก ซึ่งหมายความว่า โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กมีทิศทางตามแนวแกนของทรงกระบอกนั้น เราอาจถือได้ว่ามีกระแสอิเล็กตรอนไหลวนภายในรูปทรงกระบอกนี้ และกระแสอิเล็กตรอนของแต่ละโมเลกุลจึงมีทิศทางตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอก ดังรูป



รูปที่ 2.18 แสดงแท่งสารรูปทรงกระบอกที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก

กระแสนูลฐานในเนื้อสารจะหักล้างกันไปหมด เนื่องจากกระแสที่อยู่ใกล้เคียงกันมีทิศตรงกันข้าม ด้วยเหตุนี้ในเนื้อสารจึงไม่มีกระแสแต่ที่ผิวของสารจะเสมือนมีกระแสเกิดขึ้นทำให้มีลักษณะคล้ายโซลีนอยด์ กระแสนี้เรียกว่า กระแสผิว (surface current) และกระแสผิวดังกล่าวจะแทนด้วย I_m



รูปที่ 2.19 แสดงด้านหน้าของทรงกระบอกเพื่อให้เห็นลักษณะกระแสมูลฐานภายใน

เวกเตอร์แสดงความเป็นแม่เหล็กของสาร (magnetization, M) หมายถึง โมเมนต์แม่เหล็กของตัวกลางต่อหน่วยปริมาตร ถ้ากำหนด m เป็นโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กของแต่ละอะตอมหรือแต่ละโมเลกุล n เป็นจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตร

$$M = n \times m \quad (2.13)$$

หน่วยของ M มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร

ถ้าทรงกระบอกนี้มีพื้นที่หน้าตัด A และมีความยาว l ปริมาตรทรงกระบอกคือ lA ตัวทรงกระบอกเองทำหน้าที่เป็นขั้วแม่เหล็กขนาดใหญ่ ที่เป็นผลรวมของขั้วคู่ในแต่ละหน่วยปริมาตร ขั้วคู่แม่เหล็กรวมคือ $M(lA)$

เปรียบเทียบกับสมการนี้กับ $m = lA$ ซึ่งในที่นี้คือ $I_m lA$ จะได้ว่า

$$I_m = M \quad (2.14)$$

จึงตั้งเป็นข้อสรุปได้ว่า

กระแสต่อหน่วยความยาวบนผิวของสารที่ก่อให้เกิดอำนาจแม่เหล็กมีค่าเท่ากับส่วนประกอบของเวกเตอร์แสดงความเป็นแม่เหล็ก M โดยที่กระแสนี้จะมีทิศทางกับผิววัตถุและมีทิศตั้งฉากกับ M

7. ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร

อำนาจแม่เหล็กพารา

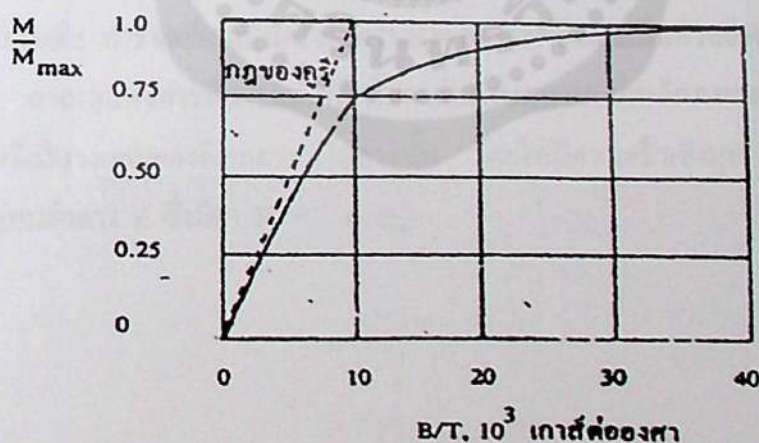
การแสดงอำนาจแม่เหล็กพารา (paramagnetism) หมายถึง การที่สนามแม่เหล็ก

จากภายนอกทำให้อะตอมเกิดแรงคู่ควมจัดเรียงตัวให้หันไปในทิศทางที่แยงตัวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น สมบัติที่สำคัญของความเป็นแม่เหล็กแบบนี้ ก็คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก B ซึ่งสารนั้นวางอยู่ และเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ

$$\text{ความเป็นแม่เหล็กของสาร ; } M = C \frac{B}{T} \quad (2.15)$$

สมการดังกล่าวปีแอร์คูรี (Pierre Curie) เป็นผู้ค้นพบในปี พ.ศ. 2438 เมื่อ C เป็นค่าคงที่ สมการนี้รู้จักกันในชื่อว่า กฎของคูรี (Curie's law) สมการนี้มีความหมายว่า ยิ่งเพิ่มค่า B จำนวนตัวแม่เหล็กก็ยิ่งหันไปในทิศของ B มากยิ่งขึ้น นั่นก็คือ การเพิ่มค่า M นั้นเอง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเรียงตัวของตัวแม่เหล็กจะถูกรบกวนจนจำนวนตัวแม่เหล็กที่เรียงตัวตาม B ลดจำนวนลง นั่นคือ ลดค่า M

กฎของคูรีนี้จำกัดขอบเขตว่า M จะต้องไม่เพิ่มอย่างไร้ขอบเขต จำกัดว่า M จะไปได้ถึงค่า $M_{\max} = n \frac{N}{V}$ เมื่อ N เป็นจำนวนตัวแม่เหล็กที่มีอยู่ในปริมาตร V ดังรูป เป็นกราฟแสดงอัตราส่วน

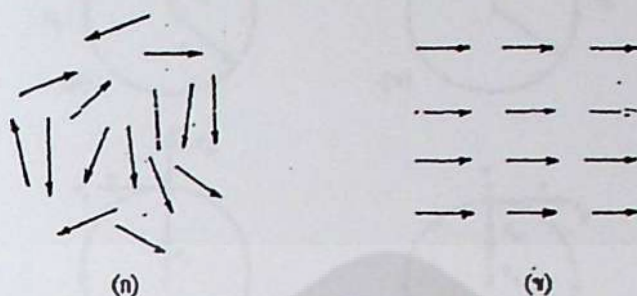


รูปที่ 2.20 แสดงกราฟอัตราส่วน $M/M_{\max}$

$M/M_{\max}$ ของเกลือแม่เหล็กพาราที่ใช้คือ โครเมียมโปตัสเซียมอลัม (chromium potassium alum) มีสูตรเคมีว่า $\text{Cr K}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ อะตอมของโครเมียมในลักษณะเป็นไอออนในสารนี้ ส่วนอะตอมอื่น ๆ เป็นกลางในการเกิดอำนาจแม่เหล็กพารา อุณหภูมิที่ใช้

ระหว่าง 1.30 ถึง 4.12 เคลวิน ในตอนที่ค่า B/T ต่ำ ๆ กฎของคูรีใช้ได้ดี แต่ถ้าหากค่า B/T สูงขึ้น จะต้องใช้ทฤษฎีฟิสิกส์ควอนตัม จึงจะได้ผลว่า การทดลองสอดคล้องกับทฤษฎี

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กพาราการเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ จะมีลักษณะดังรูป

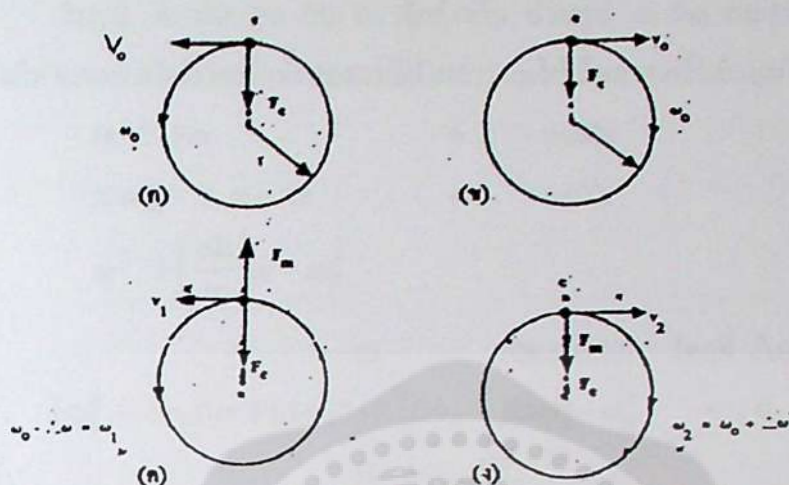


รูปที่ 2.21 แสดงอำนาจแม่เหล็กพารา (ก) โมเมนต์ขั้วคู่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และ (ข) สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้โดเมนขั้วคู่มาเรียงตัวกัน

8. อำนาจแม่เหล็กไดอา

การแสดงอำนาจแม่เหล็กไดอา (diamagnetism) หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก สารแม่เหล็กแบบนี้ เรียกว่า สารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic substances) ซึ่งไมเคิล ฟาราเดย์พบเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2389 บิสมัทเป็นตัวอย่างของสารแบบนี้

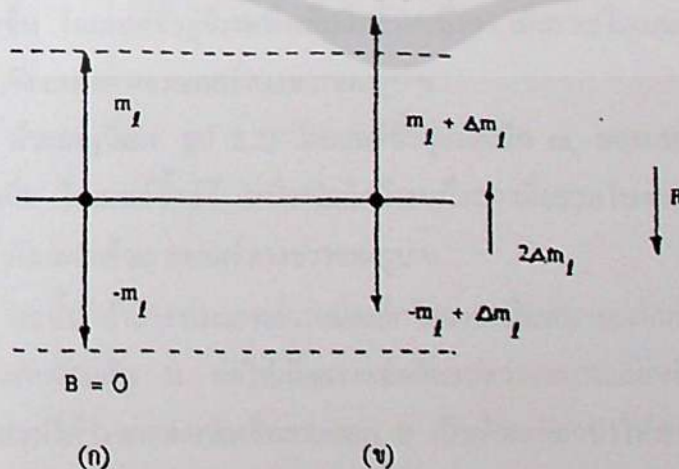
สาเหตุแห่งการที่สารแม่เหล็กไดอาต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นอธิบายได้ด้วยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนในสารนั้น โดยให้มีความเร็วเชิงมุม ω_0 ในรัศมี r ก่อให้เกิดแรงสู่ศูนย์กลาง F ซึ่งมีค่า $F_c = m \omega_0^2 r$



รูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) แสดงอิเล็กตรอนเป็นวงกลมในทิศตรงกันข้าม

(ค) แสดงเมื่อมีสนามแม่เหล็ก $V_1 < V_0$ และ (ง) เมื่อมีสนามแม่เหล็ก $V_2 > V_0$

ตามรูปที่ 2.22 สารแม่เหล็กโคอปรประกอบด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอน วนในทิศตรงกันข้าม เช่น รูป ก. กับ ข. ทำให้สนามแม่เหล็กหักล้างกันไป รูป ก. มีทิศของโมเมนต์ ขั้วคู่แม่เหล็ก m , มีทิศพุ่งออกมา เมื่อรวมเวกเตอร์ของโมเมนต์ขั้วคู่เข้าด้วยกันก็จะได้เป็นรูปดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.23 (ก) และ (ข) แสดงเวกเตอร์ของโมเมนต์ของโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก
ซึ่งสอดคล้องกับ รูป 2.22

เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B มาอยู่ในบริเวณสาร จะเกิดแรง $-e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ กระทำต่ออิเล็กตรอนขนานของแรงนี้คือ F_m โดยที่ $F_m = evB = e(\omega r)B$

ในรูป ค. นั้น F_m กับ F_e หักล้างกัน ส่วนรูป ง. F_m กับ F_e เสริมกัน แรงศูนย์กลางจึงมีค่าแตกต่างไปจากเดิมทั้งสองกรณีดังกล่าว ก่อให้เกิดความเร็วเชิงมุมใหม่คือ ω

$$F_e \pm F_m = m\omega^2 r$$

$$m\omega_0^2 r \pm e\omega r B = m\omega^2 r$$

$$\omega^2 \pm \left(\frac{eB}{m}\right)\omega - \omega_0^2 = 0$$

ให้ $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ โดยที่ $\Delta\omega \ll \omega_0$

$$[\omega_0^2 + 2\omega_0\Delta\omega + (\Delta\omega)^2] \pm [\beta\omega_0 + \beta\Delta\omega] - \omega_0^2 = 0$$

ในสมการค่า $\beta = \frac{eB}{m}$

และพิจารณาว่า $(\Delta\omega)^2$ มีค่าน้อยจะได้

$$\Delta\omega = \frac{\pm\omega_0\beta}{2\omega_0 \pm \beta}$$

เนื่องจากโดยทั่วไป $\beta \ll 2\omega_0$ จะได้

$$\Delta\omega \cong \pm \frac{1}{2}\beta = \pm \frac{eB}{2m}$$

โดยที่รูปที่ ค. เป็น $\omega_0 - \Delta\omega$ และรูปที่ ง. เป็น $\omega_0 + \Delta\omega$ มีค่า $\Delta\omega = \frac{eB}{2m}$

ด้วยเหตุนี้เอง รูป 2.23 โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก m_l ของกรณีหนึ่งจะลดลง และอีกกรณีหนึ่งจะเพิ่มขึ้น โมเมนต์ขั้วคู่ข้างหนึ่งเพิ่มอีกข้างหนึ่งลด เมื่อรวมโมเมนต์ขั้วคู่ทั้งสองจึงไม่อาจหักล้างกันหมด ดังแสดงด้วยเวกเตอร์ทางขวาของรูป ข.

ด้วยเหตุนี้เอง รูป 2.23 โมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็ก m_l ของกรณีหนึ่งจะลดลง และอีกกรณีหนึ่งจะเพิ่มขึ้น โมเมนต์ขั้วคู่ข้างหนึ่งเพิ่มอีกข้างหนึ่งลด เมื่อรวมโมเมนต์ขั้วคู่ทั้งสองจึงไม่อาจหักล้างกันหมด ดังแสดงด้วยเวกเตอร์ทางขวาของรูป ข.

ฉะนั้น ถ้าสารประเภทสารแม่เหล็กใดวางในสนามแม่เหล็ก B จะเกิดค่า $2\Delta m_l$ ขึ้น มีทิศทางตรงกันข้ามกับ B ก่อให้เกิดแรงผลักดันระหว่างสนามแม่เหล็กของสารกับสนามแม่เหล็กภายนอก สรุปได้ว่า สนามแม่เหล็กภายนอก B เป็นตัวเหนี่ยวนำให้สารแม่เหล็กใดามีขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน ซึ่งจะผลักดัน

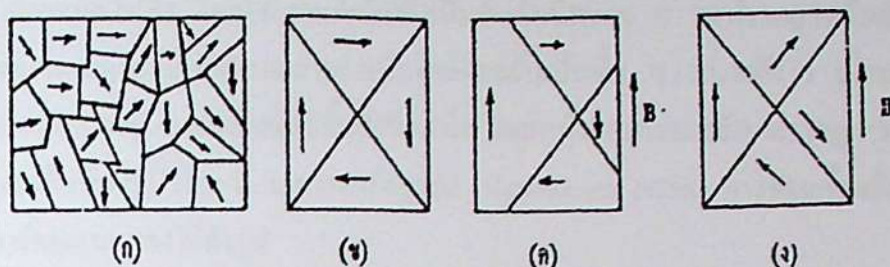
9. อำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร

การแสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีการจัดโมเมนต์ขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน ให้มีทิศทางไปทางเดียวกัน ภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน สมบัติที่เด่นชัดของสารแม่เหล็กเฟอร์โรก็คือความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และสารอาจแสดงสมบัติทางแม่เหล็กได้ ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดิสโพรเซียม สารทั้ง 5 นี้ จะคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรตราบที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเปลี่ยนไปเป็นสารแม่เหล็กพาราตันที่เหล็กมีอุณหภูมิคูรี 1,043 K สมบัตินี้จะเกิดได้ แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้ จะอยู่ในโครงสร้างของผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแต่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

ตาราง 2.1 สารแม่เหล็กเฟอร์โร

ธาตุ	เลขอะตอม Z	น้ำหนักอะตอม
Fe	26	55.85
Co	27	58.94
Ni	28	58.71
Gd	64	157.26
Dy	66	162.51

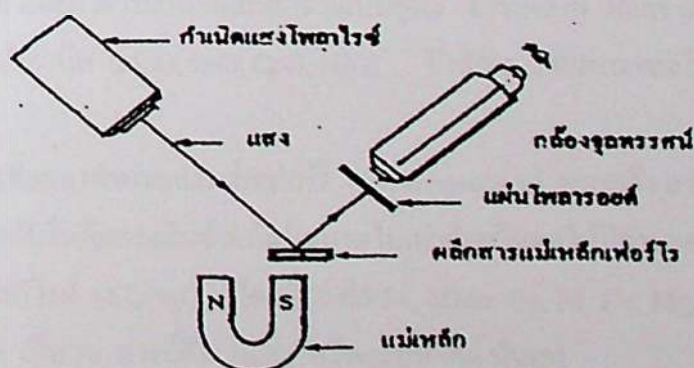
ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรนั้น อิเล็กตรอน 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน จะมีสปินชี้ไปในทิศทางขนานกันก่อให้เกิดปริมาตรเล็ก ๆ ขนาด 10-8 ถึง 10-12 ตารางเมตร ซึ่งมีการเรียงของแนวการหมุนของอิเล็กตรอนไปในทิศทางขนานกันเรียกว่า โดเมน (Domains) โดเมนหนึ่ง ๆ มีอะตอมประมาณ 10^{17} ถึง 10^{21} อะตอม ทิศทางความเป็นแม่เหล็กของโดเมนขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกของสาร ตัวอย่างเช่น เหล็กมีผลึกเป็นลูกบาศก์ก็มีทิศทางความเป็นแม่เหล็กตามแนวแกนผลึกทั้งสามแกน แต่เนื่องจากโดเมนมีทิศต่าง ๆ กัน สนามแม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ถ้านำผลึกดังกล่าวไปอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กภายนอก B จะมีการจัดเรียงตัวของทิศทางโดเมนใหม่ 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 โดเมนส่วนหนึ่งเพิ่มพื้นที่ขึ้น ขณะอีกส่วนลดพื้นที่ลง และวิธีที่ 2 โดยจัดแนวทิศทางโดเมนให้เรียงตัวตามสนาม B นั้นลักษณะโดเมนของสารแม่เหล็กเฟอร์โรอาจแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะโดเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร

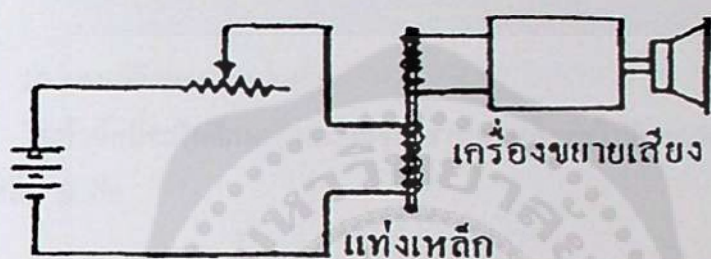
- (ก) ขณะไม่เป็นแม่เหล็กโดเมนจะเรียงสับสน โมเมนต์ขั้วคู่จะมีทิศทางต่าง ๆ ไป
 - (ข) ส่วนหนึ่งของโดเมนขณะไม่เป็นแม่เหล็ก
 - (ค) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก โดเมนจะเพิ่มส่วนหนึ่ง ลดส่วนหนึ่ง
 - (ง) ขณะมีสนามแม่เหล็ก โดเมนจะเรียงทิศใหม่
- ทั้ง (ค) และ (ง) สารจะมีความเป็นแม่เหล็กขึ้น

โดเมนแม่เหล็กนี้จะมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้แสงโพลาไรซ์ส่องดู
 ดังรูป ทิศทางของโดเมนทางหนึ่งจะทำให้แสงโพลาไรซ์บิดระนาบไป ถ้าเราใช้แว่นโพลาไรซ์ส่อง
 ดูดังรูป จะเห็นการเรียงตัวของโดเมนได้



รูปที่ 2.25 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อดูโดเมนแม่เหล็กภาพที่จะคล้ายในรูป (ก)
 ถ้าขั้วแท่งแม่เหล็กโดเมนจะขยับด้วย

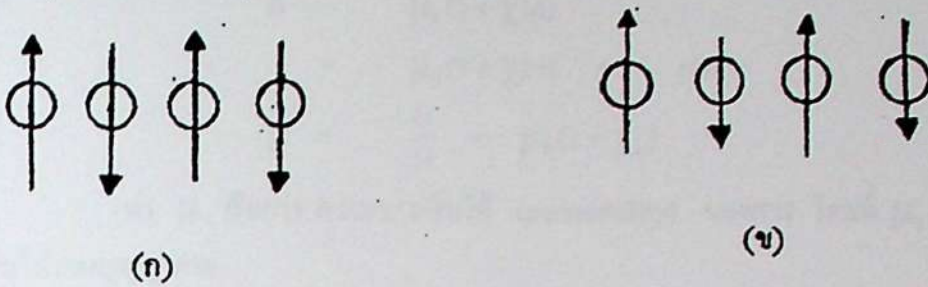
การขั้วของโดเมนหรือการเพิ่มพื้นที่ขึ้นนั้นในกรณีสนามแม่เหล็กภายนอก B เกิดจากกระแสไฟฟ้า โดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดของ B จะปรากฏว่าเมื่อเพิ่มกระแสการขั้วของโดเมนจะไม่เพิ่มตามอย่างต่อเนื่องแต่จะขั้วเป็นขั้น ๆ หมายถึงว่า เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น โดเมนจะยังเฉยอยู่ จนกระแสเพิ่มขึ้นถึงขีดหนึ่ง โดเมนทั้งกลุ่มจึงจะขั้ว ปรากฏการณ์ ที่โดเมนมีการขั้วเป็นขั้น ๆ นี้ เรียกว่า ผลการบาร์คฮูเซน (Barkhausen effect) การจัดเครื่องมือเพื่อศึกษาผลของบาร์คฮูเซนแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.26 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อศึกษาผลของบาร์คฮูเซน ขดลวดขดหนึ่งพันรอบแกนเหล็กต่อไปยังเครื่องขยายเสียง อีกขดต่อกับแบตเตอรี่ขณะแม่เหล็กเพิ่มค่า B จะเกิดเสียงดังกริกจากลำโพงเสียงเป็นขั้น ๆ เนื่องจากโดเมนในแท่งแม่เหล็กขั้วตัว

อำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและอำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร หมายถึง สารที่มีการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหลาย ๆ ตัวขนานกัน แต่มีทิศทางกลับทิศกัน ค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของสารรวมเป็นศูนย์ และค่าความเป็นแม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ สารเหล่านี้ ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และ망กานีส (MnO , FeO , CoO , NiO) ซึ่งลักษณะทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่แสดงดังรูป 2.27 ก.

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี (ferrimagnetism) หมายถึง สารที่มีเวกเตอร์ของโมเมนต์ขั้วคู่ที่ขนานกันในทิศตรงกันข้ามกันมีขนาดไม่เท่ากันเป็นผลให้มีอำนาจแม่เหล็กเหลืออยู่ สารเหล่านี้ ได้แก่ เฟอร์ไรต์ ($XOFe_2O_3$) โดยที่ X คือ Fe, Mn , Co, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd ตัวหนึ่งตัวใดก็ได้ และถ้า X เป็น Fe สารนี้คือ Fe_2O_3 หรือแมกนีไทต์ นั่นเอง



รูปที่ 2.27 (ก) แสดงการเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร

(ข) แสดงการเรียงตัวของสารเฟอร์รี

10. สมบัติของสารแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาถึงสมบัติของสารแม่เหล็กต่อไปอีกจากหัวข้อ 5 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก H คือ

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (2.16)$$

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

M คือ เวกเตอร์แสดงความเป็นแม่เหล็กของสารขึ้นอยู่กับค่า B และแปรตาม H อาจเขียนได้ใหม่ว่า

$$M = \chi H \quad (2.17)$$

ปริมาณ χ_m เรียกว่า ความไวตัวได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ของสารเป็นตัวเลขไม่มีหน่วยมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าความไวตัวได้ของสารต่าง ๆ

สารแม่เหล็กไดอะ	χ_m	สารแม่เหล็กพารา	χ_m
ไฮโดรเจน	-2.1×10^{-9}	ออกซิเจน	2.1×10^{-6}
ไนโตรเจน	-5.0×10^{-9}	มักเนเซียม	1.2×10^{-5}
โซเดียม	-2.4×10^{-6}	อลูมิเนียม	2.3×10^{-5}
ทองแดง	-1.0×10^{-5}	สังกะสี	6.8×10^{-5}
บิสมัท	-1.7×10^{-5}	ไททาเนียม	7.1×10^{-5}
เพชร	-2.2×10^{-5}	พลาสติก	3.0×10^{-4}
ปรอท	-3.2×10^{-5}	กาลโคเนียมคลอไรด์	2.8×10^{-3}

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad B &= \mu_0 (1 + \chi M) \\ &= \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H \end{aligned} \quad (2.18a)$$

$$\text{โดยที่} \quad \mu = \frac{B}{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (2.18b)$$

ค่า μ เรียกว่า ความซาบซึมได้ (permeability) ของสาร โดยที่ μ_0 คือ ความซาบซึมได้ของสูญญากาศ

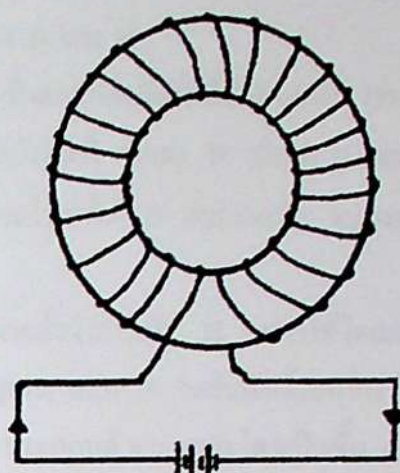
สารต่างชนิดกันมีค่าความซาบซึมได้ต่าง ๆ กัน อัตราส่วนระหว่าง μ หรือ μ_0 เรียกค่า ความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability) ใช้ตัวย่อ μ_r

ตาราง 2.3 ค่าความซาบซึมได้ของสารต่าง ๆ

สาร	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	สาร	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$
บิสมัท	0.99983	โคบอลต์	250
เงิน	0.99998	นิกเกิล	600
ทองแดง	0.99999	เหล็กหล่อ	2,000
น้ำ	0.99999	เหล็กเส้น	5,000
อากาศ	1.0000004	เหล็กแกนหม้อแปลง	7,000
อลูมิเนียม	1.00002	ซูเปอร์อัลลอย (supermalloy)	1,000,000

ความซาบซึมได้ของตัวกลาง

เพื่อที่จะให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับค่าความซาบซึมได้ดียิ่งขึ้นจึงขอยกตัวอย่างของสนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดแบบโซลินอยด์ที่ขดกลับเป็นวงกลมที่เรียกว่า ทอรอยด์ (toroid) ดังรูป



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของทอรรอยด์

การที่เราขดโซลีนอยด์ให้เป็นวงกลมสนามแม่เหล็กภายในไม่เปลี่ยน มีค่าสนามแม่เหล็ก $B = 4 \pi n I / 10^7$ แต่ถ้าหากว่าเราเอาแกนเหล็กมาใส่ภายในขดโซลีนอยด์ จะทำให้ค่า B เปลี่ยนไป B ตอนนี้จะมียุทธศาสตร์เพิ่มเป็นหลายร้อยเท่าของ B เดิม จะมีค่า $B = \frac{\mu}{\mu_0} \times 4 \pi n I / 10^7$ ซึ่งนั่นหมายความว่า สนามแม่เหล็กจะแรงมากขึ้นกับค่า $\frac{\mu}{\mu_0}$ ของสารนั่นเอง

ถ้า $\frac{\mu}{\mu_0} < 1$ ก็เป็นสารแม่เหล็กไดอะ ถ้า $\frac{\mu}{\mu_0} > 1$ ก็เป็นสารแม่เหล็กพารา และถ้า $\frac{\mu}{\mu_0} \gg 1$ ก็สารแม่เหล็กเฟอร์โร

สารบางอย่าง เช่น พวกโลหะเปอร์มัลลอย (permalloy) มีค่า $\frac{\mu}{\mu_0}$ มากถึง 10^5 ซึ่งแสดงว่าค่า M ภายในเนื้อสารมีค่าเป็น 99,999 เท่าของภายนอก

11. เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็กและความถ่วง (Magnetization curve and Hysteresis loop)

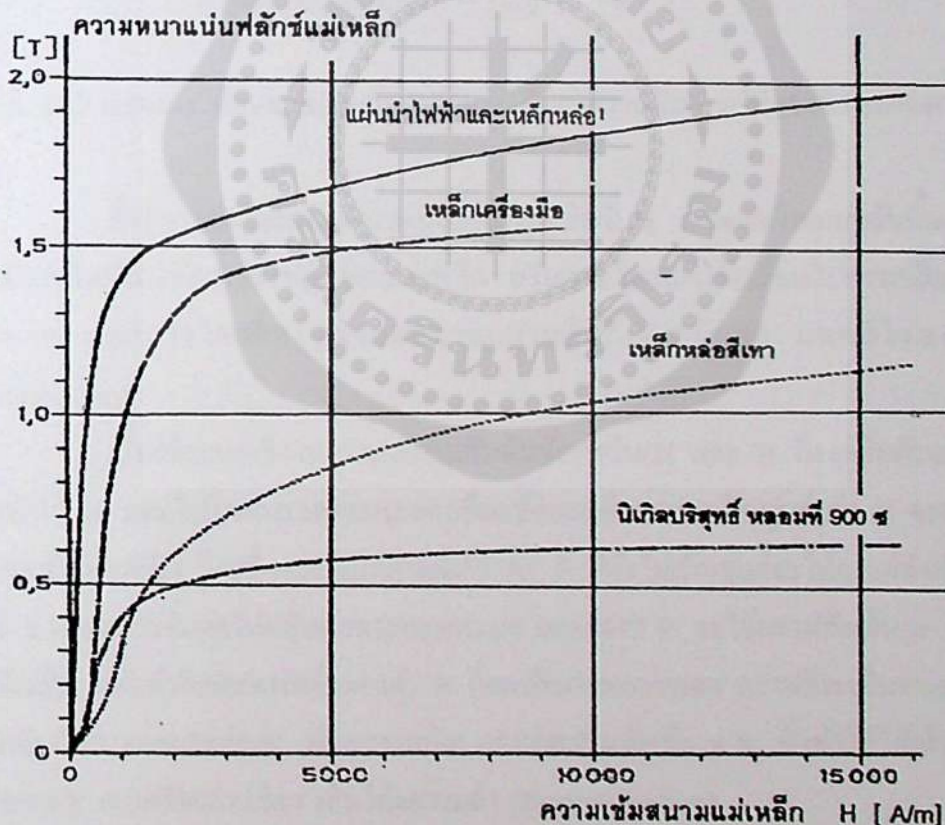
เส้นโค้งแสดงความเป็นแม่เหล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามทำแม่เหล็ก (H) และสนามแม่เหล็ก (B)

จากขดลวดทอรรอยด์นั้น ถ้าเราเพิ่มกระแสค่า H ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยตามสมการกฎของแอมแปร์ที่ว่า $\oint H \cdot dl = I$ เมื่อทางขวาของสมการเพิ่ม H ต้องเพิ่ม เมื่อ H เพิ่ม B ก็จะต้องเพิ่มตาม ถ้าหากเราเริ่มต้นจากกระแสเป็นศูนย์และมีเครื่องวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็กในแกนทอรรอยด์

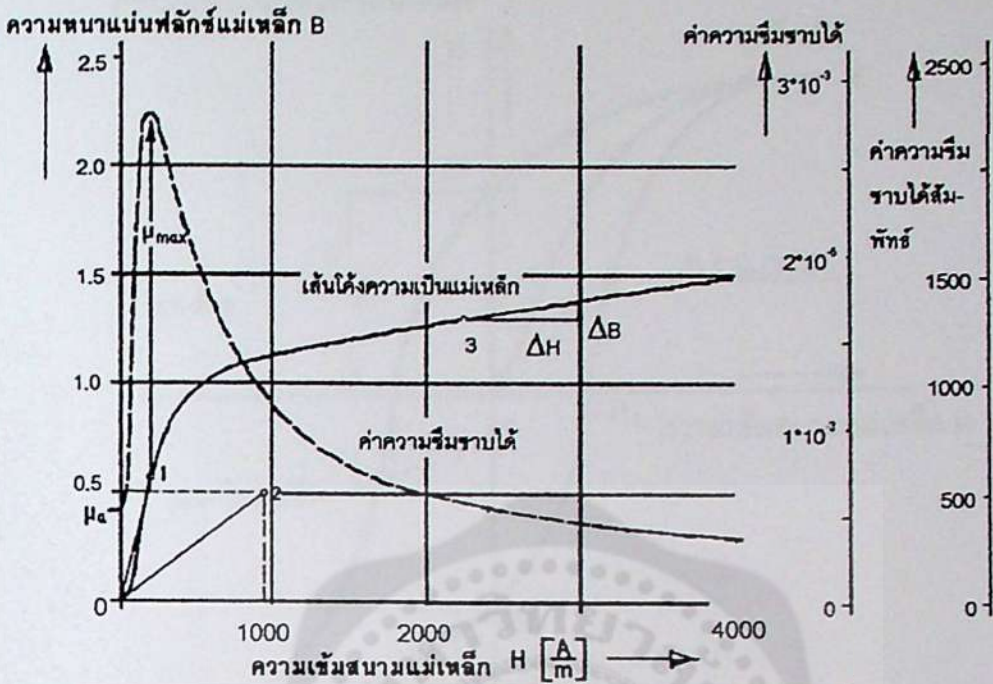
เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H

จากรูป ถ้าเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแกนเหล็ก เช่น ทอรอยด์นั้น จะได้กราฟดังรูปที่ 2.30 แต่ค่าความซาบซึมได้จะไม่คงที่ เมื่อค่า H เพิ่มขึ้นค่า μ จะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุด เมื่อค่า μ ถึงจุดสูงสุดแล้ว การเพิ่ม H ก็จะไม่ทำให้ B เพิ่มมากนัก จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัว และทำให้ค่า μ ลดลง เมื่อ H เพิ่มขึ้นอีก

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการเพิ่ม H จะทำให้โดเมนแม่เหล็กขยับตัวก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ผลของบาร์คิสเตน การหาความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ก็เช่นกัน เส้นโค้งความสัมพันธ์จะไม่เรียบจริง แต่จะประกอบด้วยการกระโดดเป็นขั้น ๆ (ตามจังหวะที่โดเมนขยับ) ทำให้เส้นกราฟมีรอยหยัก รอยหยักนี้เรียกกันว่า ขั้นของบาร์คิสเตน ซึ่งจะตรวจวัดได้จากเครื่องวัดที่มีความไวมาก ๆ



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความเป็นแม่เหล็กของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

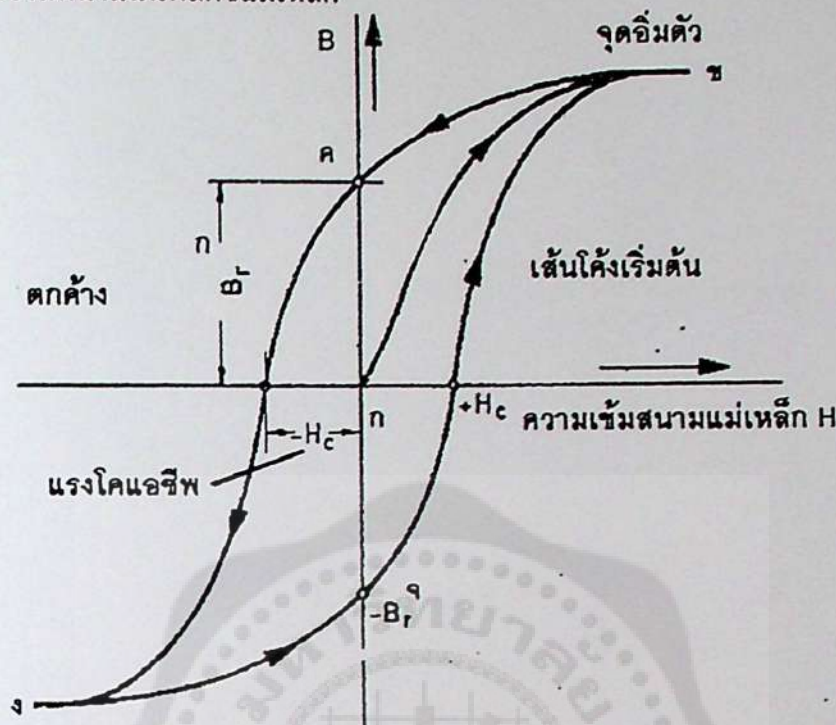


รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H กับค่าความซึมซาบได้ของวัสดุของเหล็ก

สิ่งที่ควรสนใจอีกประการหนึ่งก็คือ ระหว่างที่ H เพิ่มขึ้นโดเมนขั้วนั้น โดเมนจะเรียงตัวกันใหม่ทำให้ความยาวของแท่งแม่เหล็ก หรือแกนโลหะที่ใช้เปลี่ยนไปการเปลี่ยนแปลงมิติต่าง ๆ ของสารโดยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กนี้เรียกกันว่า แมกนีโตสตรักชัน (magnetostriction)

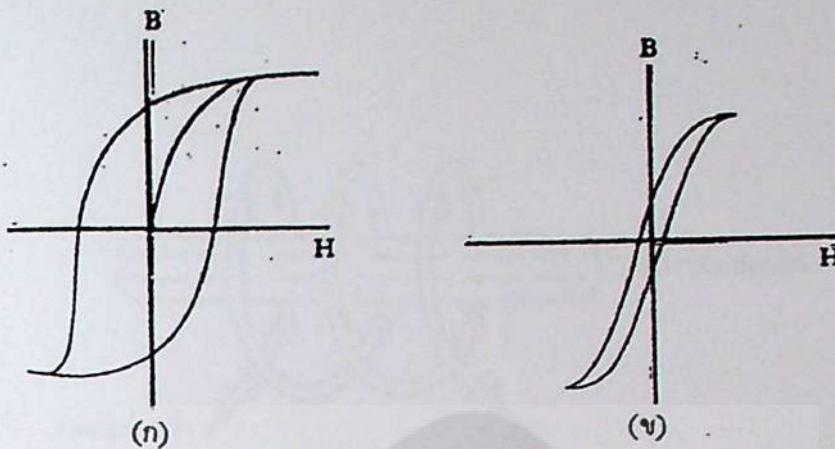
เมื่อใช้แกนเหล็กในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง H และ B ถึงจุดอิ่มตัวของกราฟแล้ว ถ้าทำให้ H หดไปโดยการลดกระแสออกทีละน้อยจนถึงกระแสเป็นศูนย์ ค่า B จะลดลงแต่ไม่ซ้ารอยเส้นกราฟเดิม โดยที่กระแสเป็นศูนย์แล้ว ค่า B ก็ยังไม่เป็นศูนย์จะได้กราฟดังเส้น ข ค ในรูปที่ 2.31 และในขั้นต่อไปกลับทิศทางของกระแส และวัดค่า B จะได้กราฟดังเส้น ค ง เมื่อถึงจุด ง อันเป็นจุดอิ่มตัวอีกทิศทางหนึ่งของค่า B ก็ลดปริมาณกระแสลง กราฟก็จะเป็นตามแนว ง จ และถ้ากลับทิศกระแสและค่อยๆ เพิ่มกระแสอีก กราฟจะเป็นดังเส้น จ ข ซึ่งทำให้ได้เส้นรอบรูปเป็น ข ค ง จ ข กราฟดังกล่าวเรียก เส้นโค้งความล่า (hysteresis curve)

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก



รูปที่ 2.31 แสดงเส้นโค้งความล่า (Hysteresis loop)

กราฟที่แสดงเส้นโค้งความล่ามีความสำคัญในอันที่จะใช้ออกแบบหรือ จัดหาสาร มาทำแกนแม่เหล็ก แม่เหล็กถาวร เช่น แม่เหล็กเกือกม้าหรือแม่เหล็กแท่ง หรือแม่เหล็กที่ทำเข็มทิศ จะต้องมีความล่ากว้าง ๆ เพื่อให้อำนาจแม่เหล็ก B คงอยู่ได้นาน สารดังกล่าวเอามาทำแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ดี ถ้าจะเอาเหล็กมาทำแกนหม้อแปลง เหล็กดังกล่าวต้องมีเส้นโค้งความล่าแคบ ๆ เหตุผลก็คือ การจะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กในหม้อแปลงต่อหนึ่งรอบของไฟสลับนั้นต้องเปลืองพลังงาน พื้นที่ของเส้นโค้งความล่าจะบอกปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งรอบต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรของวัตถุที่ทำแกนหม้อแปลงพลังงานดังกล่าวจะสูญเสียมากในเมื่อมีเส้นโค้งความล่า กว้าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวรมีเส้นโค้งความล่ากว้าง ได้แก่ โลหะผสมอลนิโค (alnico) ทำจาก อลูมิเนียม นิกเกิล และเหล็กโคบอลต์ ส่วนแกนหม้อแปลงนั้นนิยมจะใช้เหล็กอ่อน (soft iron) เนื่องจากมีพื้นที่เส้นโค้งความล่าแคบดังกล่าวแล้ว ดังรูป



รูปที่ 2.32 (ก) แสดงสารที่ทำแม่เหล็กถาวรดี

(ข) แสดงสารที่ทำแกนหม้อแปลงไฟฟ้า

ลักษณะของสนามแม่เหล็ก (CHARACTERISTICS OF MAGNETIC FIELDS)

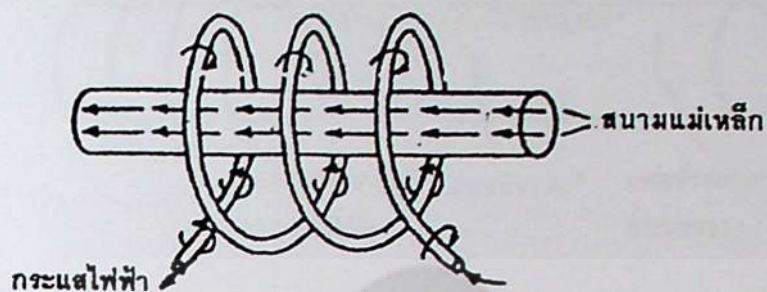
การตรวจสอบต้องให้ชิ้นงานเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งการตรวจหาจุดบกพร่องที่ได้ผลดีที่สุดนั้น ตำแหน่งของจุดบกพร่องต้องตัดขวางกับเส้นแม่เหล็กเป็นมุม 90 องศา ในทางปฏิบัตินั้น สามารถใช้ได้ถึง 45 องศา

1. สนามแม่เหล็กตามแนวยาว (Longitudinal)

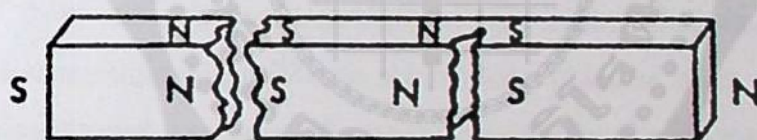
ได้แก่ สนามแม่เหล็ก แท่ง (BAR MAGNET) มีลักษณะดังนี้

- 1.1 แม่เหล็กจะมีขั้วเหนือ (N) และ ขั้วใต้ (S) ที่ปลายขั้วทั้งสองของแท่ง
- 1.2 สามารถดูด หรือผลักสารแม่เหล็กอื่นได้
- 1.3 เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งตามแนวยาวระหว่างขั้วทั้งสอง

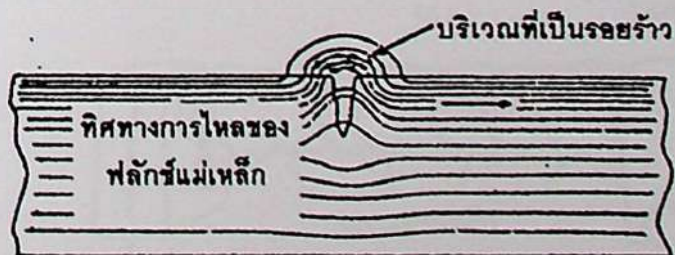
1.4 แท่งแม่เหล็กที่เกิดการแตกร้าวนั้นจะเกิดขั้วใหม่ ดังรูปที่ 2.34 ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการบิดเบี้ยวออกมาภายนอก (Flux leak) และแสดงอำนาจออกมา ดังนั้นถ้าเอาอนุภาคแม่เหล็กโรย อนุภาคแม่เหล็กจะเกาะติดบริเวณที่เกิดการบิดเบี้ยวของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.33 แสดงการเกิดสนามแม่เหล็กตามแนวขั้ว



รูปที่ 2.34 แสดงแท่งแม่เหล็กที่เกิดการแตกหัก



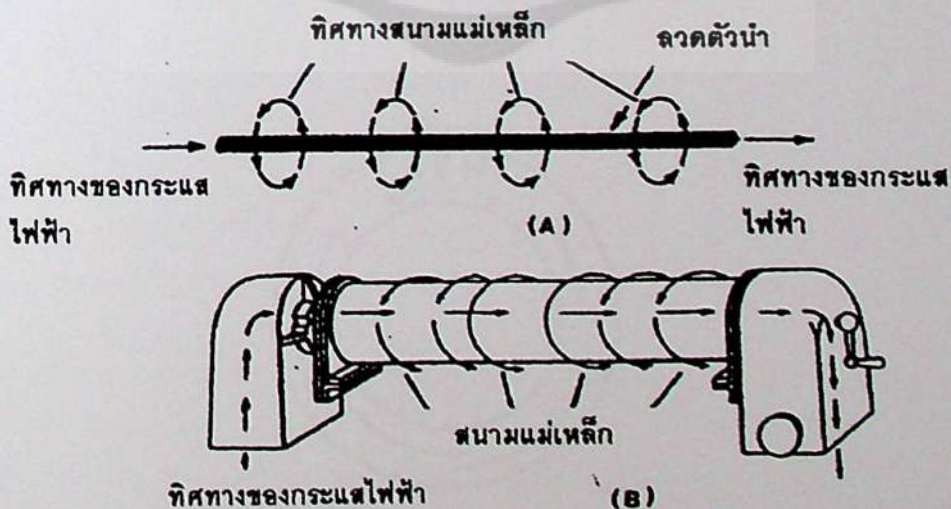
รูปที่ 2.35 แสดงตำแหน่งที่อนุภาคแม่เหล็กรวมตัวกันบนจุดบกพร่อง



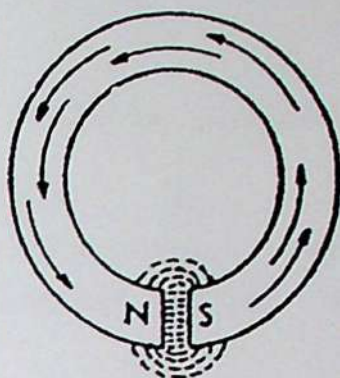
รูปที่ 2.36 แสดงลักษณะรอยร้าวที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสนามแม่เหล็กตามแนวยาว

2. สนามแม่เหล็กวงกลม (CIRCULAR)

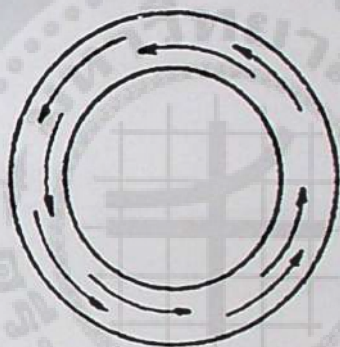
เมื่อนำสนามแม่เหล็กมาโค้งงอให้เป็นวงกลมลวดตัวนำทั้งสองอยู่ห่างกัน จะเห็นว่าระหว่างปลายทั้งสองนั้น (N-S) สามารถดึงดูดวัสดุแม่เหล็กได้ (รูปที่ 2.38, a) แต่ถ้าให้ปลายทั้งสองเชื่อมติดกันก็จะได้แม่เหล็กวงแหวน ซึ่งจะไม่แสดงอำนาจแม่เหล็กออกมา ทั้งนี้เพราะไม่มีขั้วเหนือ-ใต้ (N-S) แต่โมเลกุลภายในเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางเป็นวงกลม และเส้นแรงแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่า สนามวงกลม (Circular field) แต่ในกรณีที่แม่เหล็กวงแหวนเกิดช่องอากาศ (Air gap) หรือรอยแตกร้าวจะเกิดขั้วเหนือ-ใต้ (N-S) และแสดงอำนาจแม่เหล็กที่บริเวณนั้น ทำให้ทราบว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.38, c



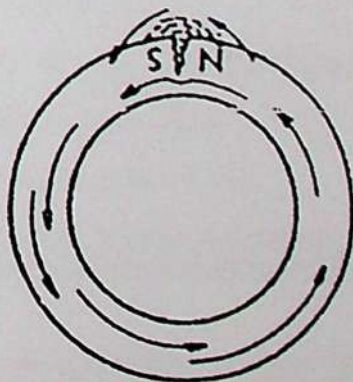
รูปที่ 2.37 แสดงสนามแม่เหล็กวงกลม a. โดยรอบตัวนำ b. โดยรอบชิ้นงาน



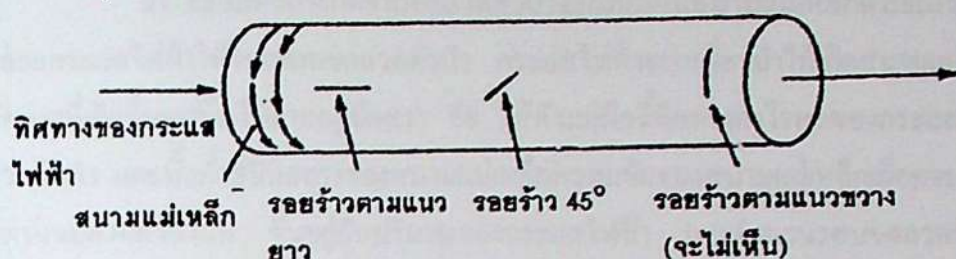
รูปที่ 2.38 a. แสดงแท่งแม่เหล็กนำมาโค้งเป็นวงกลม



รูปที่ 2.38 b. แสดงแม่เหล็กวงแหวน



รูปที่ 2.38 c. แสดงแม่เหล็กวงกลมที่เกิดการแตกร้าง



รูปที่ 2.39 แสดงลักษณะขดลวดแม่เหล็กที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยขดลวดแม่เหล็กวงกลม

การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization Methods)

การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กมีหลายวิธีด้วยกัน แต่สำหรับการตรวจสอบด้วยผงเหล็กนี้ จะใช้การเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กถาวร หรือใช้แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.4 การทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก

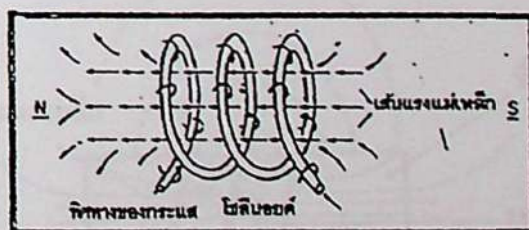
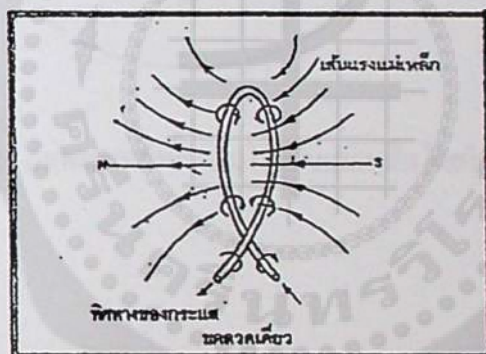
วิธีการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็ก	สัญลักษณ์
1. วิธีใช้แม่เหล็ก (Magnetic Yoke)	J
a) ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent magnet yoke)	JD
b) ใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic yoke)	JE
2. วิธีให้กระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Current Flow in Conductor)	L
a) ใช้ขดลวดตัวนำ (Coil)	LS
b) ใช้ตัวนำอื่น ๆ เช่น สายเคเบิล	LK
3. วิธีให้กระแสโดยตรงที่ชิ้นงาน (Current flow in Specimens)	S
a) ใช้หน้าสัมผัส (Contact Current Flow)	SS
b) ใช้การเหนี่ยวนำ (Induced Current Flow)	SI
4. วิธีการสร้างสนามแม่เหล็กแบบผสม (Combined Method)	JEG/SSW

ข้อสังเกต : เฮอร์มัน G = DC อังกฤษ, เฮอร์มัน W = AC อังกฤษ

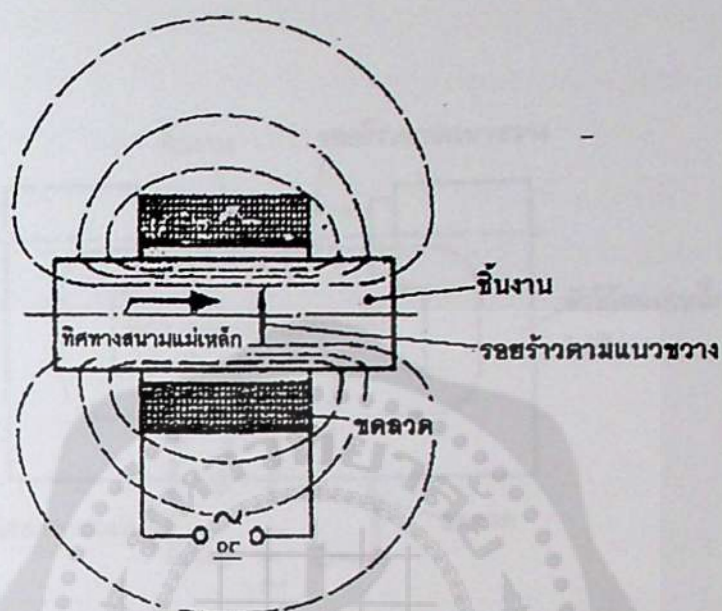
1. ขดลวดตัวนำ (Coils)

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวนำจะเป็นแบบสนามแม่เหล็กตามแนวยาว คือ ถ้าปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านขดลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งทิศทางที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามกฎมือขวา คือ ให้หัวแม่มือชี้ทิศทางกาไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำ และนิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางของสนามแม่เหล็กความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบขดลวดที่พันรอบชิ้นงาน ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 2 หรือ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหรืออัตราส่วนของความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลาง (LD) และในการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จะใช้นั้นทำได้โดยสูตร

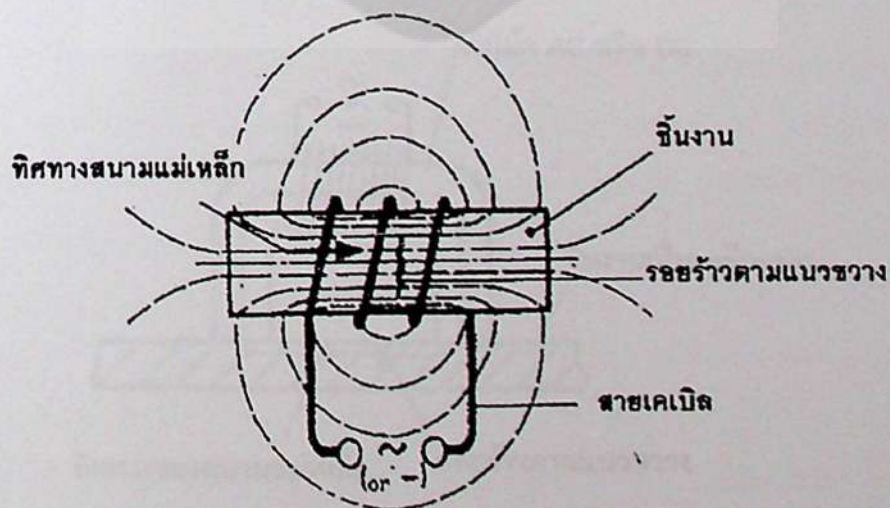
$$\text{แอมป์ - รอบ} = 45000 / (\text{ความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลาง})$$



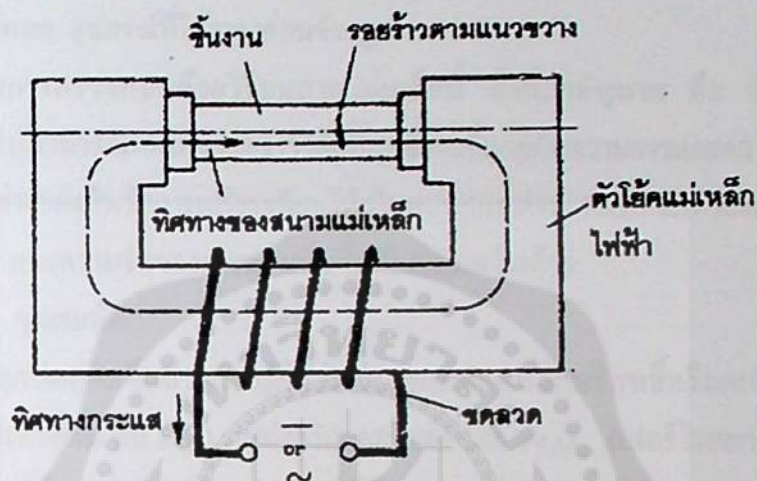
รูปที่ 2.40 แสดงทิศทางสนามแม่เหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำ



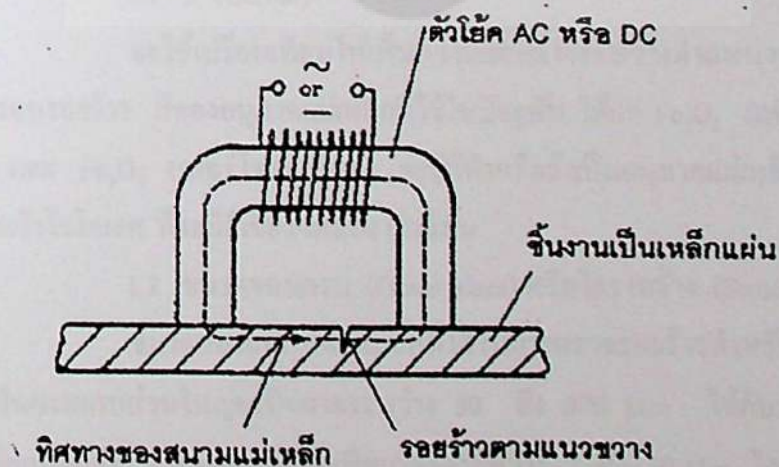
รูปที่ 2.41 แสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดตัวนำ



รูปที่ 2.42 แสดงการทำชิ้นงานให้เป็นแม่เหล็กโดยใช้เคเบิล เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสูงมาก



รูปที่ 2.43 แสดงโยกแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตั้งโต๊ะ



รูปที่ 2.44 แสดงโยกแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเคลื่อนย้ายได้

อนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particles)

ในการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กนี้จะต้องใช้การตรวจด้วยสายตา สิ่งบกพร่องที่พบก็บอกได้เพียงแต่ขนาดความยาวไม่สามารถบอกได้ว่ามีความลึกเท่าไร และต้องใช้บุคลากรเป็นผู้ตรวจสอบซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้ระบบอัตโนมัติตรวจสอบได้ ความสามารถในการตรวจสอบรอยร้าวที่ผิวมีความลึกได้ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร และสามารถตรวจสอบกับชิ้นงานที่มีรูปร่างต่างๆ กันได้หมด อุปกรณ์ที่ใช้ราคาค่อนข้างถูก

ในการตรวจสอบด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กนี้ สิ่งที่สำคัญมาก คือ ต้องหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้สามารถมองเห็นรอยร้าวได้ดีที่สุดซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวและความกว้างของรอยร้าว ความแตกต่างของสีหรือการเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่าง (Contrast) ระหว่างรอยร้าวกับบริเวณใกล้เคียง และความชัดของการมองเห็นขึ้นกับความสว่างด้วย

1. คุณสมบัติ

อนุภาคแม่เหล็กส่วนใหญ่มีส่วนประกอบของเหล็กบริสุทธิ์หรือเหล็กออกไซด์ (Iron Oxides) มีสูตรทางเคมี คือ Fe_2O_3 (เฟอร์ริกออกไซด์) และ Fe_3O_4 (เฟอร์ไรต์ออกไซด์) สิ่งที่อนุภาคแม่เหล็กนำมาใช้บอกตำแหน่งของรอยร้าว ก็คือ คุณสมบัติในตัวของมันเอง ดังนี้

- สี (Colour)
- ขนาดของเกรน (Grain sizes) หรือโครงสร้าง (Structure)
- น้ำหนัก (weight)
- คุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic properties)

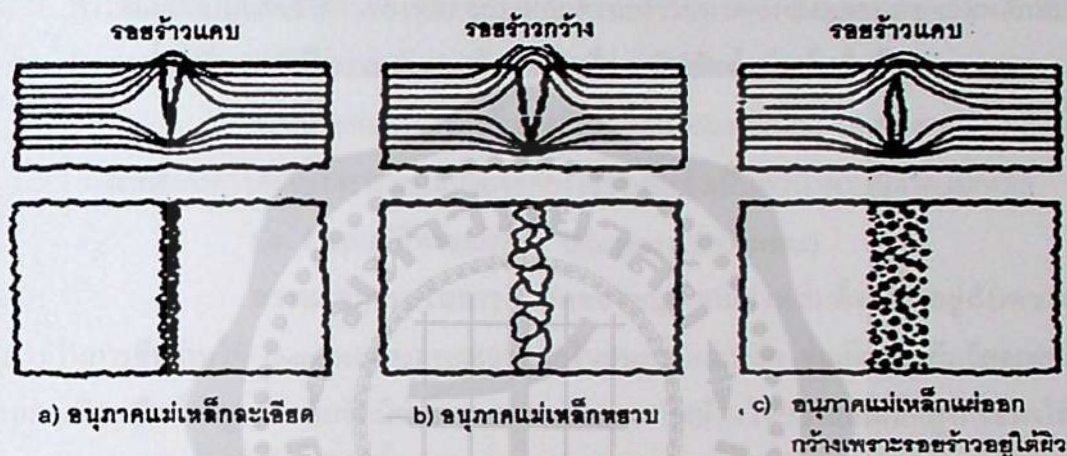
1.1 สี (Colour)

จะใช้เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างตำแหน่งของรอยร้าวกับบริเวณพื้นผิวรอบรอยร้าว สีของอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ Fe_2O_3 (เฟอร์ริกออกไซด์) จะมีสีแดงเข้ม และ Fe_3O_4 (เฟอร์ไรต์ออกไซด์) จะมีสีดำหรือดำเป็นอนุภาคแม่เหล็กชนิดเรืองแสงภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต ก็จะมีสีเขียว-เหลือง กับสีส้ม

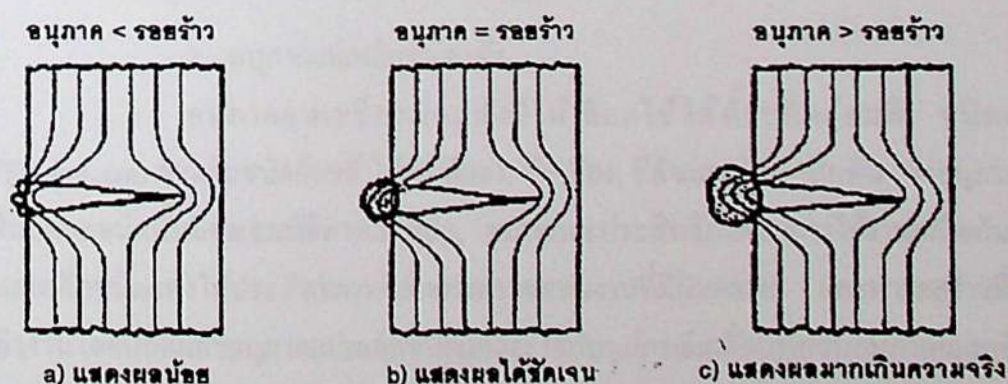
1.2 ขนาดของเกรน (Grain sizes) หรือโครงสร้าง (Structure)

ขนาดของอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้ในการตรวจรอยร้าวสำหรับแสงสว่างปกติ จะมีประเภทเป็นผงหยาบส่วนใหญ่จะมีขนาดระหว่าง 30 ถึง 300 μm ใช้กับการตรวจโดยใช้อนุภาคแม่เหล็กแบบแห้ง ส่วนผงละเอียดจะมีขนาดระหว่าง 2 ถึง 10 μm โดยมากจะใช้ผสมกับน้ำ หรือน้ำมัน ใช้กับการตรวจโดยใช้อนุภาคแม่เหล็กแบบเปียก

ส่วนอนุภาคแม่เหล็กสำหรับการตรวจสอบสำหรับหลอดแสงฟลูออเรสเซนซ์ส่วนใหญ่จะใช้ในสภาพเปียก อนุภาคจะมีขนาดโคระหว่าง 0.2 ถึง 2.2 μm ซึ่งปกติอนุภาคแม่เหล็กแบบแห้งส่วนใหญ่จะมีขนาดโตกว่าแบบเปียกทำให้อนุภาคแม่เหล็กแบบแห้งมีความไวในการแสดงผลต่อรอยร้าวที่มีลักษณะแคบ ๆ ได้ไม่ดีเท่าที่ควรแต่เหมาะกับการใช้ตรวจรอยร้าวบนชิ้นงานที่มีผิวคิบหรือบนชิ้นงานที่มีความร้อน เช่น แท่งบิลเลียดที่มีอุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.45 แสดงผลของอนุภาคแม่เหล็กกับรอยร้าวบนชิ้นงาน



รูปที่ 2.46 แสดงผลของแรงยึดเหนี่ยวอนุภาคแม่เหล็กสัมพันธ์กับขนาดความโตของอนุภาคแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.46 จะแสดงให้เห็นความแตกต่างของการใช้อุณหภูมิแม่เหล็ก ขนาดต่าง ๆ ต่อรอยร้าวบนชิ้นทดสอบทำให้เราจำเป็นต้องเลือกขนาดของอุณหภูมิแม่เหล็กให้เหมาะสมกับขนาดความกว้างของรอยร้าวด้วยเหตุนี้ชิ้นทดสอบที่มีความกว้างของรอยร้าวที่แตกต่างกัน จะต้องมีการใช้อุณหภูมิแม่เหล็กขนาดโตแตกต่างกันเพื่อให้ทราบผลของรอยร้าวได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

1.3 น้ำหนัก (Weight)

น้ำหนักของอุณหภูมิแม่เหล็ก จะมีผลกับการตรวจด้วยอุณหภูมิแม่เหล็ก แบบแห้ง คือ ถ้ารอยร้าวมีขนาดเล็ก แต่เราใช้อุณหภูมิแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ซึ่งหมายถึงน้ำหนักก็มากตามไปด้วย ทำให้แม่เหล็กที่เกิดจากรั่วของฟลักซ์แม่เหล็กที่รอยร้าวขนาดเล็กดึงดูดอุณหภูมิแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมากไม่ไหว เพราะรอยร้าวขนาดเล็กจะมีฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อย

และมีผลต่อการตรวจด้วยอุณหภูมิแม่เหล็กแบบเปียก คือ อุณหภูมิแม่เหล็กที่ น้ำหนักมากจะเคลื่อนตัวได้ยาก เพราะแบบเปียกจะต้องใช้ของเหลวเป็นตัวนำพาอุณหภูมิแม่เหล็ก

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic Properties)

ความสามารถในการยึดติดของอุณหภูมิแม่เหล็กก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) ของแม่เหล็กในอุณหภูมิแม่เหล็ก เช่นเดียวกันกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก คือถ้าอุณหภูมิแม่เหล็กมีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของแม่เหล็กสูงก็จะทำให้สามารถตรวจหารอยร้าวที่เล็กมาได้ดีขึ้น

อุณหภูมิแม่เหล็กแบ่งออกตามลักษณะการนำพา (vehicle) ได้ 2 ชนิด ได้แก่ การนำพาโดยอากาศ เรียกว่าผงแม่เหล็กชนิดแห้ง (Dry-Particle) และการนำพาโดยของเหลว เรียกว่าผงแม่เหล็กชนิดเปียก (Wet-Particle) อุณหภูมิแม่เหล็กทำด้วยวัสดุแม่เหล็กต่าง ๆ ที่มีความคงตัวต่อการเป็นแม่เหล็กต่ำ (Low-Retentivity) และยังมีคุณสมบัติต่าง ๆ อีกเช่น Permeability สูง, Low coercive force, สามารถมองเห็นได้ชัด, ขนาดและรูปทรงเหมาะสมกับงาน เป็นต้น

2. อุณหภูมิแม่เหล็กชนิดแห้ง

อุณหภูมิแม่เหล็กชนิดแห้งมีให้เลือกใช้ได้ทั้งชนิดย้อมสี, ชนิดเรืองแสง (Fluorescent) สำหรับชนิดย้อมสี ได้แก่ สีแดง, สีเหลือง, สีดำและสีเทา เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิแม่เหล็กในแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก, ขนาดและประสิทธิภาพในการใช้งานคล้ายกัน อุณหภูมิแม่เหล็กชนิดแห้งให้ประสิทธิภาพดีกับการตรวจสอบงานที่มีผิวหยาบ และหารอยร้าวที่อยู่ภายใต้ผิวงาน โดยปกติแล้วอุณหภูมิแม่เหล็กชนิดแห้งจะใช้กับอุปกรณ์เคลื่อนที่ส่วนอุณหภูมิแม่เหล็กที่ใช้ไปแล้วไม่แนะนำให้กลับมาใช้ใหม่

การโรยอนุภาคแม่เหล็กชนิดแห้งบนชิ้นงาน กระทำได้โดยใช้กระปุกยางสำหรับโรยอนุภาคแม่เหล็ก หรือใช้อุปกรณ์โรยอนุภาคแม่เหล็กที่ออกแบบพิเศษ ด้วยการเป่าลมแรงดันต่ำพาเอาอนุภาคแม่เหล็กโรยบนผิวงาน การใช้ออนุภาคแม่เหล็กด้วยการนำชิ้นงานไปกลิ้งบนอนุภาคแม่เหล็ก หรือเทอนุภาคแม่เหล็กลงบนผิวงานไม่แนะนำให้ใช้

3. อนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียก

อนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียกเหมาะกับการตรวจสอบจุดบกพร่องขนาดเล็ก ได้แก่ รอยแตกเนื่องจากความล้า ฯลฯ อนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียกที่ใช้กับอุปกรณ์แบบตั้งพื้นจะประกอบด้วยถังใส่อนุภาคแม่เหล็กที่ผสมกับของเหลว ส่วนการตรวจสอบงานสนามจะต้องใช้กับอุปกรณ์ชนิดเคลื่อนที่จะประกอบได้ด้วยอนุภาคแม่เหล็กที่บรรจุไว้ในกระป๋องสเปรย์ซึ่งสะดวกต่อการใช้งานอนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียกก็มีให้เลือกใช้ได้หลายสี เช่นเดียวกับอนุภาคแม่เหล็กชนิดแห้ง

วัสดุนำพาอนุภาคแม่เหล็กชนิดเปียก มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันและน้ำ หน้าที่ของวัสดุนำพา ได้แก่ เป็นตัวพียงอนุภาคแม่เหล็กให้ลอยตัวอยู่เหนือพื้นผิวงาน เพื่อให้เคลื่อนตัวไปรวมตัวอยู่ที่บริเวณจุดบกพร่องได้ง่าย

สารนำพาน้ำมัน	ควรมีคุณสมบัติดังนี้ เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่กลั่นแล้วมีความหนืดต่ำ, ไม่มีกลิ่น, มีกำมะถันผสมอยู่มาก และจุลวามไฟสูง เป็นต้น
สารนำพาน้ำ	การที่ใช้น้ำเป็นสารนำพาแทนน้ำมันนั้น เพราะน้ำมีราคาถูกและไม่เกิดปัญหาการติดไฟอีกด้วย น้ำที่ใช้จะต้องเติมสารอื่น ๆ ลงไปอีก ได้แก่ Wetting, agents, น้ำยาทำให้เกิดการแพร่กระจาย, น้ำยาป้องกันสนิมและน้ำยาป้องกันน้ำเกิดฟอง

เนื่องจากน้ำเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องออกแบบเพื่อป้องกันการรั่วของกระแสไฟ และการเกิดการกัดกร่อนจากอิเล็กโตรไลต์

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction coil)

ขดลวดเหนี่ยวนำทำจากวัสดุทองแดงอบน้ำยาเบอร์ 20 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.97 มิลลิเมตร สามารถรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 3 แอมแปร์ แต่ต้องเผื่อค่าความปลอดภัยไว้ จึงให้ขดลวดรับกระแสไฟฟ้าที่ 2.5 แอมแปร์ และใช้ขดลวดจำนวนสองขด ซึ่งได้จากการคำนวณดังนี้

ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่ต้องการในการใช้งานคือ 1 เทสลา โดยดูจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

∴ ค่า B = 1 เทสลา ก็จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) สำหรับเหล็กเครื่องมือเท่ากับ 1000 แอมแปร์/เมตร

ใช้หลักการคำนวณหาแรงดันแม่เหล็ก (Magnetomotive Force ; MMF)

หาค่า MMF ของช่องอากาศ (Airgap)

จากสมการ

$$MMF = H_{\text{airgap}} \times L_{\text{airgap}}$$

โดยที่

$$MMF = \text{แรงดันไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ - รอบ}$$

$$H_{\text{airgap}} = \text{ความเข้มสนามแม่เหล็กของช่องว่าง หน่วย แอมแปร์/เมตร}$$

$$L_{\text{airgap}} = \text{ระยะช่องว่าง หน่วย เมตร}$$

หาค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กของช่องว่าง (H_{airgap}) จากสมการ

$$H_{\text{airgap}} = \frac{B_{\text{airgap}}}{\mu_0}$$

โดยที่

$$B_{\text{airgap}} = 1 \text{ เทสลา และ}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ วัตต์วินาที/แอมแปร์เมตร}$$

เพราะฉะนั้น

$$H_{\text{airgap}} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = 795,774 \text{ แอมแปร์/เมตร}$$

ระยะของช่องว่าง $L_{\text{airga}} = 0.008$ เมตร

นำค่า H_{airgap} และ L_{airgap} แทนลงในสมการ จะได้

$$\text{MMF} = 795,774 \times 0.008 = 6,366 \text{ แอมแปร์-รอบ}$$

∴ จะได้แรงดันแม่เหล็กของช่องว่างเท่ากับ 6,366 แอมแปร์-รอบ

ฉะนั้น ค่า MMF ที่ได้อีก 6,366 แอมแปร์-รอบ จึงใช้ขดลวดสองชุด คือ ด้านหัวเครื่องและด้านท้ายเครื่องอย่างละหนึ่งชุด ดังนั้นแต่ละชุดจะมีค่า MMF ดังนี้

$$\text{MMF} = \frac{6366}{2} = 3,183 \text{ แอมแปร์-รอบ}$$

∴ จะสามารถหาจำนวนของขดลวดแต่ละชุดได้โดยที่ทองแดงสามารถรับกระแส

ไฟฟ้าได้ที่ 2.5 แอมแปร์ จากสมการ $\text{MMF} = N \times I$

$$\therefore \text{จำนวนขดลวด คือ } N = \frac{\text{MMF}}{I} = \frac{3183}{2.5} = 1,273 \approx 1300 \text{ รอบ}$$

ส่วนที่เป็นโยคแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Yoke)

โยคแม่เหล็กไฟฟ้าทำจากวัสดุเหล็ก St 37 พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 60 x 60 มิลลิเมตร ซึ่งมีหน้าที่ทำให้การไหลของฟลักซ์แม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดเหนี่ยวนำไหลครบวงจรในลักษณะวงจรปิด (Close Loop)

ชุดนิวตารอนภาคแม่เหล็ก

มีส่วนประกอบต่าง ๆ คือ

- ถังใส่น้ำผสมสารอนูภาคแม่เหล็ก
- ปั๊มน้ำ มีกำลังขับ 0.5 แรงม้า และมีปริมาตรการไหล 40 ลิตร/นาที

- ระบบท่อ เนื่องจากปั๊มน้ำมีปริมาตรการไหลที่สูงกว่าปริมาตรบรรจุของถังใส่น้ำมันผสมสารอนุภาคแม่เหล็กจึงต้องมีท่อที่ต่อให้น้ำมันที่ผสมสารอนุภาคแม่เหล็กไหลกลับลงถังด้วย

โครงเครื่องทดสอบ

โครงเครื่องทำจากเหล็กกล่องที่มีขนาด 1 นิ้ว x 1/2 นิ้ว มีความสูงของตัวเครื่อง 650 มิลลิเมตร มีความยาว 1250 มิลลิเมตร



บทที่ 4

การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องทดสอบอนุภาคแม่เหล็ก
2. ชิ้นงานทดสอบที่ทำการเชื่อมและตกแต่งแล้ว
3. สีสเปรย์สีขาว
4. ทินเนอร์ชนิด AAA.
5. สารอนุภาคแม่เหล็ก

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

1. นำเหล็กแผ่นที่มีความหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร จำนวนสองแผ่นมาทำชิ้นทดสอบ
2. นำชิ้นทดสอบมาบากร่องตัววีเพื่อทำการเชื่อม
3. นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ไปเชื่อมด้วยวิธีเชื่อมซึมลึก
4. ทำความสะอาดแนวเชื่อมและทำการเจียรระโนแนวเชื่อมให้เป็นเนื้อเดียวกับแผ่นเหล็ก
5. ทำความสะอาดให้ไร้สนิมและคราบน้ำมัน

เตรียมเครื่องทดสอบ

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะใช้งาน
2. ปรับตั้ง Time Relay ให้ได้ตามเวลาที่กำหนด
3. ตรวจสอบชุดหัวฉีดและสารอนุภาคแม่เหล็ก

วิธีการทดสอบรอยร้าวด้วยอนุภาคแม่เหล็ก

1. นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ไปพ่นสีขาวเพื่อเป็นการรองพื้น
2. นำชิ้นทดสอบวางลงบนเครื่องทดสอบ
3. ทำการฉีดสารอนุภาคแม่เหล็กลงบนชิ้นงานทดสอบ
4. ปลดปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดขดลวดโซลินอยด์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กประมาณ 5 วินาที
5. ถอดชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบรอยแตกร้าว

หมายเหตุ ถ้าเกิดการลัดวงจรหรือผิดปกติขณะเครื่องทำงานให้กดปุ่ม “หยุดเงิน

ผลการทดลอง

จากการทดลองจะสามารถมองเห็นรอยแตกร้าวบนชิ้นทดสอบ โดยที่จะมีผงเหล็กมารวมตัวกันตามลักษณะของรอยแตกร้าว



ดังนั้นรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบดังรูปด้านบนจะเห็นได้ว่าการแตกร้าวบริเวณขอบแนวเชื่อมตลอดแนวเชื่อม เกิดจากการนำชิ้นทดสอบหลังจากการทำการเชื่อมให้เย็นเร็วเกินไปจึงทำให้แนวเชื่อมหดตัวอย่างรวดเร็วจึงเกิดการแตกร้าวที่บริเวณขอบแนวเชื่อม

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็กนี้สามารถสรุปได้ว่าเครื่องทดสอบนี้จะสามารถตรวจสอบรอยร้าวได้เพียงแค່รอยร้าวที่เกิดขึ้นตามแนวขวางกับสนามแม่เหล็กเท่านั้นก็จะสามารถทดสอบได้เพียงชั้นทดสอบที่เป็นแผ่นเท่านั้นเพราะว่าระบบการสร้างสนามแม่เหล็กนั้นได้มาจากการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดทองแดงที่พันรอบแกนเหล็กโดยใช้หลักการของขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งจะให้สนามแม่เหล็กแบบการแพร่สนามแม่เหล็กจากทิศเหนือมายังทิศใต้ แต่ถ้าชิ้นงานเป็นเนื้อเดียวตลอดทิศของแม่เหล็กก็จะสามารถผ่านไปยังขั้วอีกขั้วได้ดี แต่ถ้าชิ้นทดสอบมีรอยแตกขั้วแม่เหล็กผ่านมาเจอก็จะทำให้ตรงบริเวณรอยแตกเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นใหม่ ดังนั้นผงเหล็กจึงไปเกาะเรียงตัวกันเป็นรูปร่างรอยแตกร้าวให้เห็น

แต่ถ้าต้องการที่จะทดสอบรอยแตกร้าวตามแนวเส้นรอบวงเครื่องทดสอบนี้จะไม่สามารถตรวจสอบได้เพราะว่าหลักการทดสอบแบบนี้จะใช้วิธีการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ปัญหาที่เกิดขึ้นและวิธีแก้ไข

1. ขดลวดโซลินอยด์

ในการสร้างสนามแม่เหล็กในวิธีนี้จะทำให้เกิดความร้อนที่ขดลวดและที่แกนเหล็ก
วิธีแก้ไข

ทำการเปลี่ยนแกนของขดลวดที่ใช้อยู่เดิมที่ทำมาจากเหล็กเหนียว St 37 แบบคันที่มีขนาด 60 x 60 มิลลิเมตร มาเป็นเหล็กเหนียวแผ่นที่มีความหนาไม่เกิน 10 มิลลิเมตร มาเรียงซ้อนกันจนมีพื้นที่หน้าตัด ให้เท่ากับเหล็กคันที่ใช้อยู่เดิมเพราะว่าเหล็กแผ่นที่นำมาซ้อนกันจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าเหล็กคัน

2. ชุดหัวฉีดสารอนุภาคแม่เหล็ก

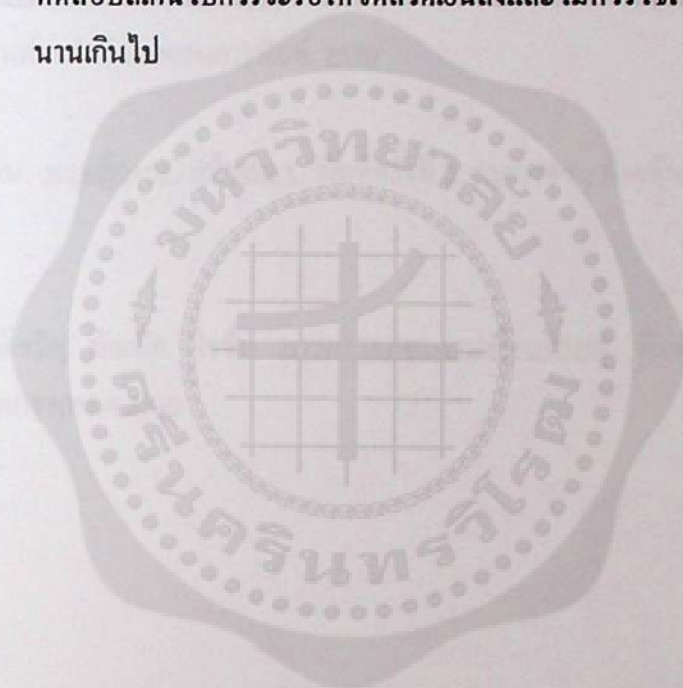
หัวฉีดที่สร้างติดกับเครื่องทดสอบนี้จะให้ระยะการฉีดที่กว้างเกินความจำเป็นทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเพราะสารอนุภาคแม่เหล็กนั้นมีราคาแพงเพราะเป็นสินค้านำเข้าจากต่างประเทศ

วิธีการแก้ไข

ควรใช้สารอนุภาคแม่เหล็กแบบสเปย์ดีกว่าเพราะสามารถควบคุมปริมาณได้

ข้อควรระวัง

1. เนื่องจากการทำงานของเครื่องจะเกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าที่สูงมากควรจะต้องตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าและสายไฟให้อยู่ในสภาวะปกติ
2. เนื่องจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนที่แกนเหล็กมากไม่ควรทดสอบถี่เกินไปควรจะรอให้ขดลวดเย็นลงและไม่ควรใช้เวลาในการทดสอบนานเกินไป



บรรณานุกรม

- 1 ปราโมทย์ วีรานุกุล. วิศวกรรมการเชื่อมและทดสอบ. พิมพ์ครั้งที่ 1 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี. 2540
- 2 พุจิณี ชาโตะ การทดสอบแบบไม่ทำลาย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดเอชเอนการพิมพ์. 2530
- 3 มงคล ทองสงคราม. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดพริ้นติ้ง . 2540
- 4 สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ. บัณฑิต ใจชื้น การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะ พิมพ์ครั้งที่ 1 วิทยาเขต เทคนิกกรุงเทพฯ 2530

ตารางภาคผนวกที่ 1.1 ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability μ_r) ของวัสดุ

วัสดุพาราแมกเนติกส์ (Paramagnetic Materials)	ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability , μ_r)
อะลูมิเนียม	1.000021
แพลตตินัม	1.000264
ออกซิเจน	1.0000018
ยาง ชนิดแข็ง	1.000014
เหล็กออกซิไดซ์ (ปราศจากเฟอร์ไรต์เคลด้า)	ประมาณ 1.001 ถึง 1.1
เหล็กออกซิไดซ์ (ผสมเฟอร์ไรต์เคลด้า 5 %)	ประมาณ 1.3

วัสดุไดอาแมกเนติกส์ (Paramagnetic Materials)	ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability , μ_r)
ทองแดง	0.999993
บิสมีท์	0.999847
แก้ว	0.999990

วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกส์ (Paramagnetic Materials)	ค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability , μ_r)
โลหะเหล็ก-โคบอลต์เจือ	2,000 ถึง 6,000
โลหะเหล็ก Armco	5,000 ถึง 7,000
เหล็กบริสุทธิ์	มากกว่า 280,000 (สูงสุด 1,450,000)
โลหะเหล็ก-ซิลิกอนเจือ	10,000 ถึง 20,000
โลหะเหล็ก-นิกเกิลเจือ	15,000 ถึง 30,000
โคบอลต์	245
นิกเกิลอิเลคโตรไลต์	2,400
เหล็กหล่อ	355
เหล็กหล่อ แบบกราไฟต์ก่อนกลมเฟอร์ริติก	554
เหล็กหล่อ แบบกราไฟต์ก่อนกลมเฟอร์ริติก	1,400

ตารางภาคผนวกที่ 1.2 ตารางปริมาณทางไฟฟ้า (Electrical Quantity)

ปริมาณ (Quantity)	สัญลักษณ์ของปริมาณ (Quantity symbol)	สมการที่แสดง (Expression)	หน่วย (Unit)	สัญลักษณ์ของหน่วย (Unit symbol)
กระแสไฟฟ้า (Current)	I	$I = V/R$	แอมแปร์ (Ampere)	A
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Potential difference)	V , U	$V = I \cdot R$	โวลต์ (Volt)	V
ความต้านทาน (Resistance)	R	$R = V/I$	โอห์ม (Ohm)	Ω
ความต้านทานจำเพาะ (Specific Resistance)	ρ (Rho)		โอห์ม.ตารางมิลลิเมตรต่อ เมตร (Ohm.mm ² / Meter)	$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$
สภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity)	σ (Sigma)	$\sigma = 1/\rho$	เมตรต่อโอห์ม.ตารางมม (Ohm.mm ² / Meter)	$\text{m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$
กำลัง (Power)	P	$P = V \cdot I$	วัตต์ (Watt)	W
ประจุไฟฟ้า (Electric charge)	Q	$Q = I \cdot t$	คูลอมป์ (Coulomb)	C
ความจุ (Capacity)	C	$C = Q/V$	ฟารัด (Farad)	F
สนามไฟฟ้า (Electric field strength)	E		โวลต์ต่อเมตร (Volt /meter)	V/m
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force)	E		โวลต์ (Volt)	V

ตารางภาคผนวกที่ 1.3 ตารางปริมาณทางแม่เหล็ก (Magnetic Quantity)

ปริมาณ (Quantity)	สัญลักษณ์ของปริมาณ (Quantity symbol)	สมการที่แสดง (Expression)	หน่วย (Unit)	สัญลักษณ์ของหน่วย (Unit symbol)
กาเหนียวนำ (Inductance)	L		เฮนรี (Henry)	H
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux)	Φ (Phi)		เวเบอร์(Wb)	Wb
ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)	B	$B = \Phi/A$ $B = \mu \cdot H$	เทสลา (Tesla)	T
ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field strength)	H	$H = \theta/l$	แอมแปร์ต่อเมตร (Ampere/meter)	A/m
สภาพความซึมซาบได้ (Permeability)	μ	$\mu = \mu_0 \mu_r$	โวลทวินาทีต่อแอมแปร์เมตร (Volt.sec / Amp.meter)	Vs/Am
สภาพความซึมซาบได้สัมบูรณ์ (Absolute Permeability)	μ_0	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$	โวลทวินาทีต่อแอมแปร์เมตร (Volt.sec / Amp.meter)	Vs/Am
สภาพความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability)	μ_r		_____	_____
แรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magnetomotive force)	F		แอมแปร์(Ampere (-turn))	A , At



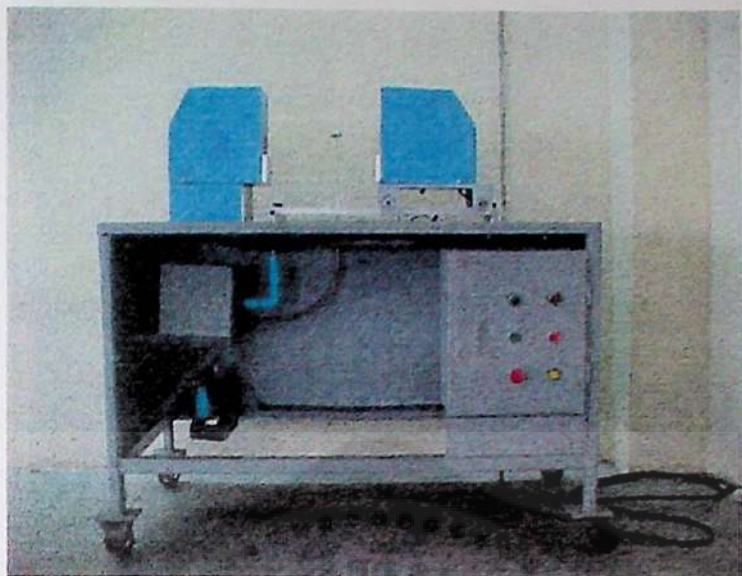
ภาคผนวกที่ 2
รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และชิ้นงาน



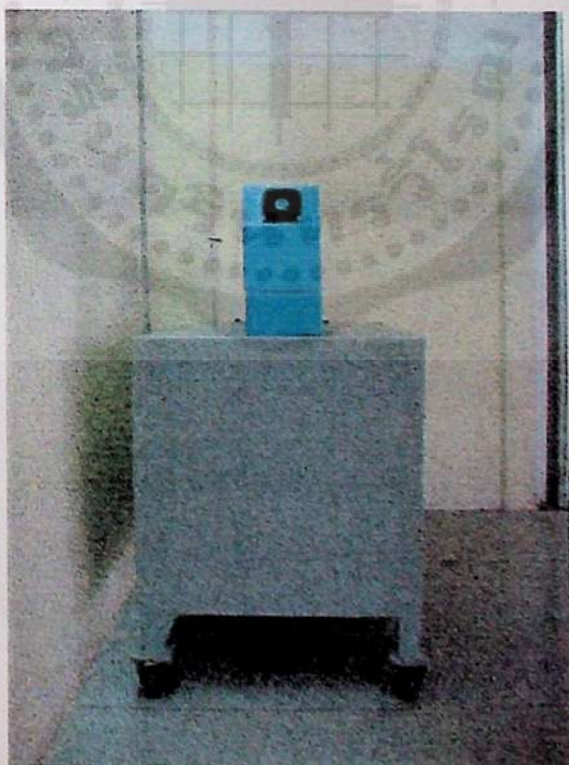
รูปภาคผนวกที่ 2.1 อนุภาพสารแม่เหล็กชนิดเปียกและแห้ง



รูปภาคผนวกที่ 2.2 ชิ้นทดสอบก่อนเหนียวนำสนามแม่เหล็ก



รูปภาคผนวกที่ 2.3 เครื่องทดสอบด้านหน้า



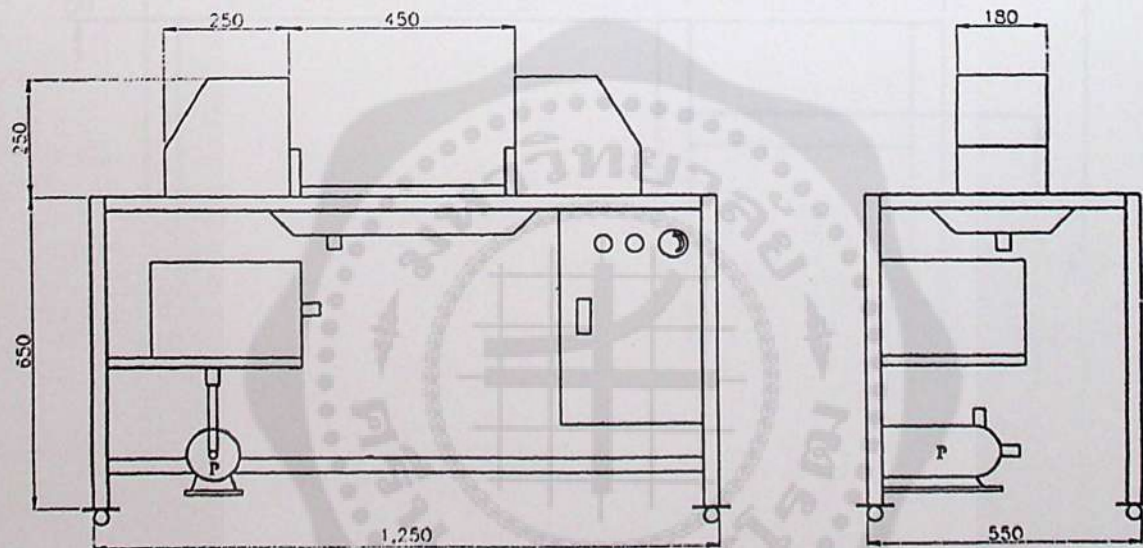
รูปภาคผนวกที่ 2.4 เครื่องทดสอบด้านข้าง



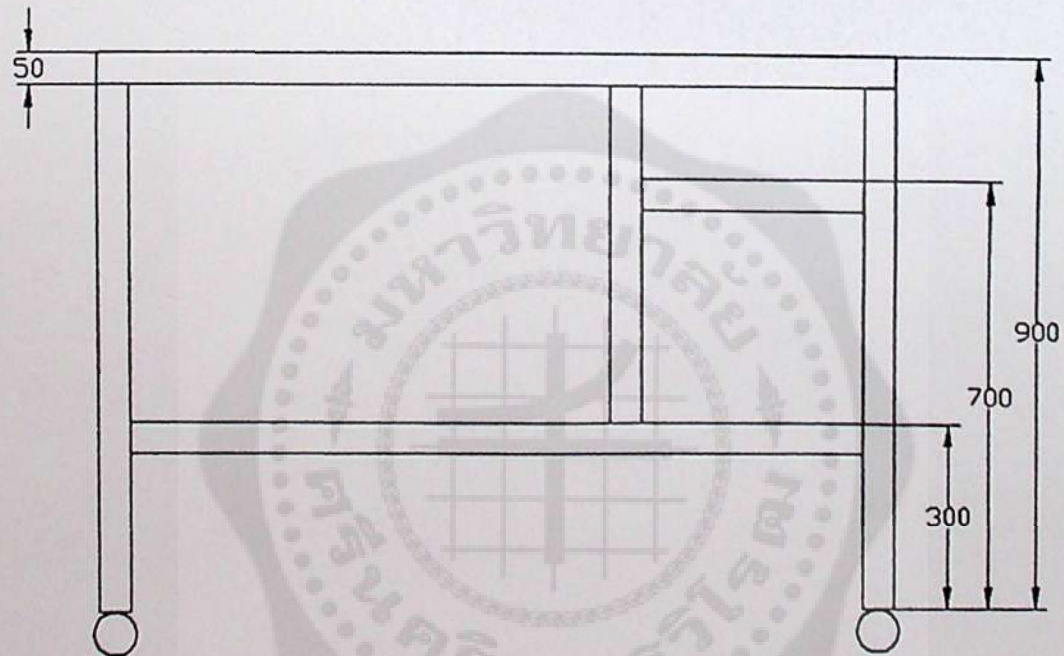
รูปภาคผนวกที่ 2.5 ชิ้นทดสอบหลังการเหนียวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ภาคผนวกที่ 3

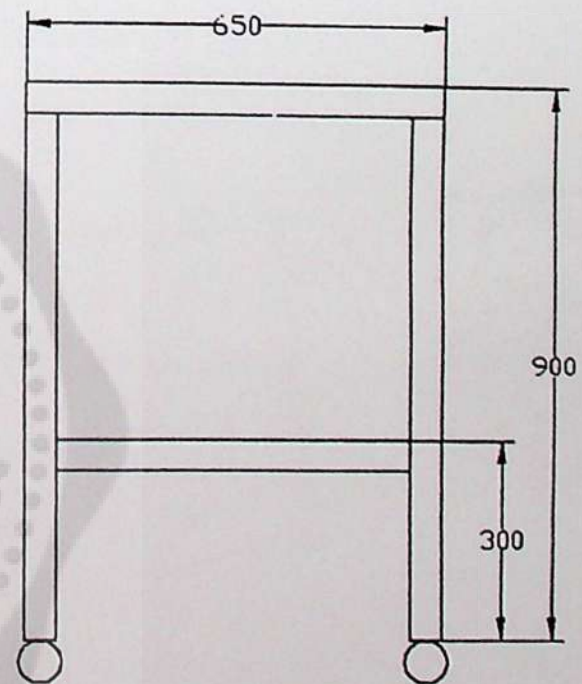
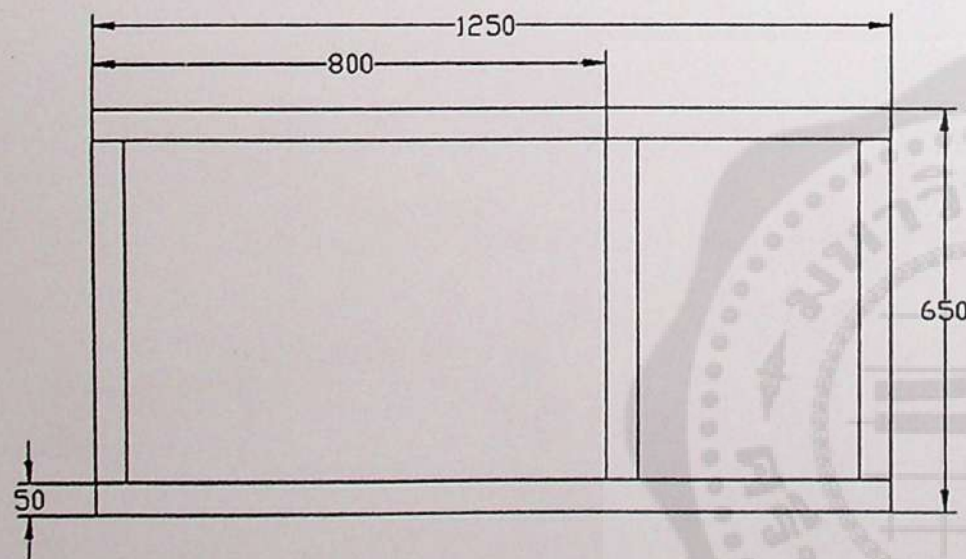
แบบแสดงโครงสร้างของเครื่องทดสอบรอยร้าวด้วยวิธีอนุภาคแม่เหล็ก



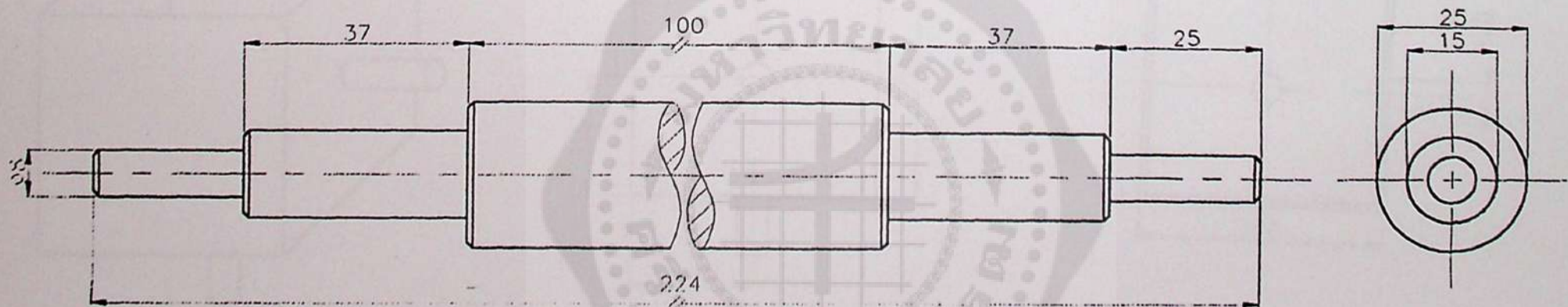
1		เครื่องทดสอบรอกด้วยอนุภาคแม่เหล็ก				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน : SI	
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อแฟ้ม	วันที่	มาตราส่วน
ปกรณ์		สุรศักดิ์	ผศ. กันจวีร์วิทย์		9/9/2543	1:10
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์						
				หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



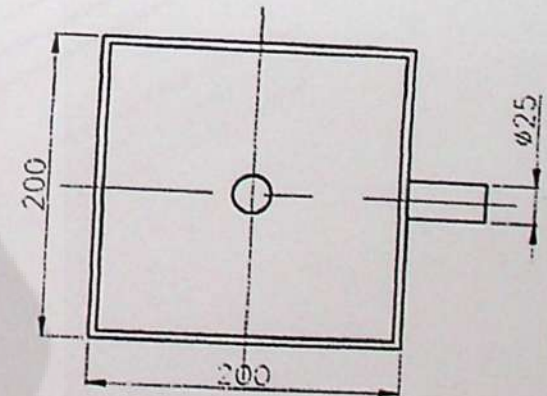
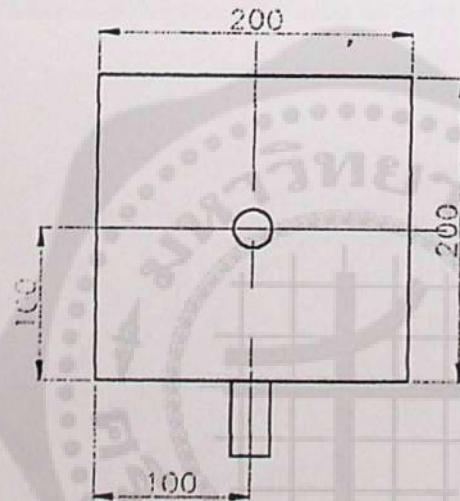
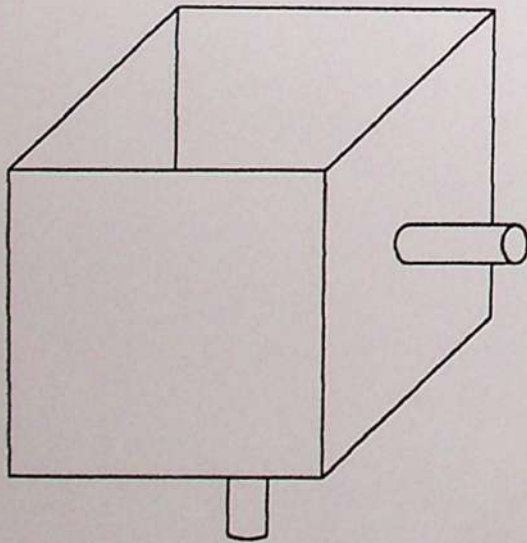
2		โครงเครื่องด้านหน้า				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน : SI	
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อแฟ้ม	วันที่	มาตราส่วน
ปกรณ์		สุรศักดิ์	ผศ. กันต์วิชญ์		9/9/2543	1:10
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์						
				หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



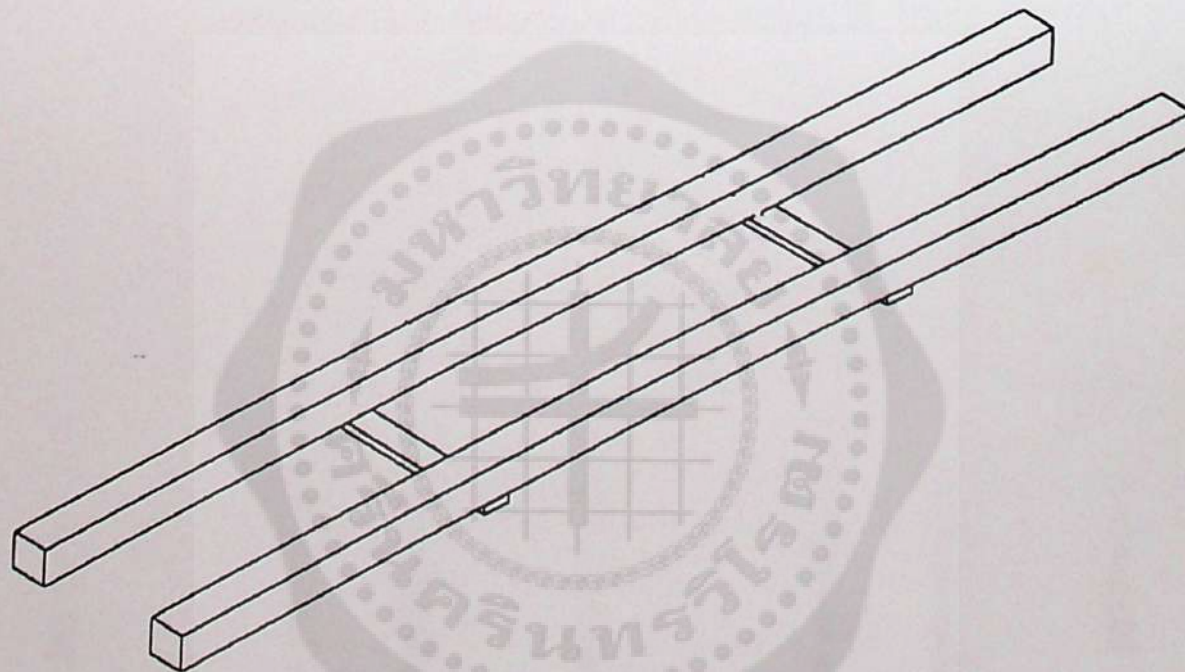
3		โครงเครื่องด้านข้างและด้านบน			มาตรฐาน : SI	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			วันที่	มาตราส่วน
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อแป้น	9/9/2543	1:10
ปกรณ		สุรศักดิ์	พศ. กันจักษ์วิชัย			
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์						
				หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่



4		ชื่อเล่น			มาตรฐาน : SI	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			วันที่	
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อแฟ้ม	9/9/2543	มาตราส่วน
ปกรณ์		สุรศักดิ์	ศศ. กันจวีร์วิทย์			1:10
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				หมายเลขแบบ		
				แก้ไขครั้งที่		แผ่นที่



5		ตั้งโต๊ะสารอนภาคแม่เหล็ก			มาตรฐาน : SI	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			วันที่	มาตราส่วน
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อเพิ่ม	9/9/2543	1:10
ปรกรณ์		สุรศักดิ์	ผศ. กัญจวิรัชญ์			
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์				หมายเลขแบบ		
				แก้ไขครั้งที่ แผ่นที่		



6		ร่างเลื่อน				
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, วัสดุ, ขนาด			มาตรฐาน : SI	
ผู้เขียน		ผู้ตรวจ :	ผู้อนุมัติ	ชื่อแฟ้ม	วันที่	มาตราส่วน
ปกรณ์		สุรศักดิ์	ผศ. กัญจวิรัชญ์		9/9/2543	1:10
มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์						
				หมายเลขแบบ	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่

ประวัติของผู้จัดทำ

ชื่อ นายปรกรณ์ หมีนเดช

ประวัติ เกิดวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2520

56/49 ม. 7 ซ. พหลโยธิน 59 แขวง อนุสาวรีย์

เขต บางเขน กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537 สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคนิคการผลิตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตนนทบุรี

ปัจจุบัน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิไล

ชื่อ นายสุรศักดิ์ สมนประเทศ

ประวัติ เกิดวันที่ 1 ธันวาคม 2520

121 ม.5 ซ. นนทบุรี 12 ถ.นนทบุรี 1 ต. บางกระสอ

อ. เมือง จ. นนทบุรี

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537 สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคนิคการผลิตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตนนทบุรี

ปัจจุบัน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิไล

ชื่อ นายนรินทร์ สร้อยเชื้อดี

ประวัติ เกิดวันที่ 1 สิงหาคม 2521

33/5 ม.2 ซ. นนทบุรี 7 ถ.นนทบุรี 1 ต. สวนใหญ่

อ. เมือง จ. นนทบุรี

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537 สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคนิคการผลิตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตนนทบุรี

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิไล