

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เรื่อง แยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูง
ชนิดลูกกลิ้งเหนียวน้ำ (แบบแห้ง)



นายจักรกฤษณ์ จูเจริญ
นายวัชรพงษ์ ปถมพานิชย์
นายอรรถพร กุลธรรมโยธิน

๑/๗๖

๑๒๑๖๓

๒๕๓๖

๖ ๑๒๕๓๓๘๙๐

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๖

High-intensity Magnetic Separator for mineral separation:
Induced Magnetic Roll Separator (Dry Type)

Mr.Chakrit	Chucharoen
Mr.Watcharapong	Pathompanich
Mr.Auttaporn	Kulathumyotin

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1993

หัวข้อโครงการพิเศษ

เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูง
ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ (แบบแห้ง)

โดย

นายจักรกฤษณ์ อุเจริญ

นายวัชรพงษ์ ปัทมพานิชย์

นายอรรถพร กุลธรรมโยธิน

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้ทำโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
2/8/07

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(ผศ. ปรีชา เทียนสมประสงค์)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

.....
ดร. วิเชียรฉาย

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย)

.....
ดร. บุญส่ง

กรรมการ

(ผศ.ดร.บุญส่ง ศิวโมกษธรรม)

.....
อ. สุน

กรรมการ

(อ. สุน จ่างประยูร)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

-ก-

หัวข้อโครงการพิเศษ

เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูง
ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ (แบบแห้ง)

นักศึกษา

นายจักรกฤษณ์ จูเจริญ
นายวัชรพงษ์ ปถมพานิชย์
นายอรรถพร กลุธรรมโยธิน

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา

2536

บทคัดย่อ

เครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ(แบบแห้ง) ได้รับการพัฒนาและสร้างขึ้นโดยอาศัยต้นแบบของต่างประเทศ มีความสามารถให้สนามแม่เหล็กสูง 19,000 เกาส์ ที่ระยะช่องว่างขั้วแม่เหล็กกับลูกกลิ้งเหนียวนำ 2 มม. อัตราการป้อน 20 กก./ชม. และความเร็วรอบของลูกกลิ้งเหนียวนำ 88 รอบต่อนาที เครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้นได้รับการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องต้นแบบโดยการแยกแร่โอลิเมนไนต์ พบว่ามีความสามารถในการแยกสูงกว่าเครื่องต้นแบบประมาณ 10-18 %

Special Project Title High-intensity Magnetic Separator for Mineral
 Separation: Induced Magnetic Roll Separator
 (Dry Type)

Name Mr.Chakrit Chucharoen
 Mr.Watcharapong Pathompanich
 Mr.Auttaporn Kulathumyotin

Special Project Advisor Asst.prof.Dr. Aree Wichianchai

Department Applied Physics

Academic Year 1993

Abstract

Induced Magnetic Roll Separator ,dry type ,was developed and constructed using the imported magnetic as the separator prototype. The constructed electromagnet consists of single coil providing magnetic field strength of 19,000 gauss at the gap between roller and magnetic pole 2 mm. ,capacity 20 kg/hr. and roller speed 88 rpm. The efficiency of the constructed magnetic separator was tested and then compared to that of the prototype separator by separating ilmenite. The separation efficiency was higher than the prototype magnetic separator about 10-18 %

กิติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการวิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อสถาบันโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวง
วิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ที่ให้ทุนสนับสนุนกระทั่งโครงการวิจัยนี้สำเร็จ ไปด้วยดี คณะผู้วิจัย
ใคร่ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความสะดวกในด้านการศึกษาเครื่องต้นแบบ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์
ต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ
ประกอบการวิเคราะห์เบื้องต้น

คณะผู้ดำเนินการวิจัย

เมษายน 2537

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการเบื้องต้นทางแม่เหล็ก.....	3
2.1 นิยามพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแม่เหล็ก.....	3
2.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก.....	4
2.2.1 สารแม่เหล็กไดอะ.....	4
2.2.2 สารแม่เหล็กพารา.....	5
2.2.3 สารแม่เหล็กเฟอร์โร.....	5
2.2.4 สารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร.....	6
2.2.5 สารแม่เหล็กเฟอร์รี่.....	6
2.3 ฮิสเทอรีซิสลูป.....	9
บทที่ 3 ชนิดของเครื่องแยกแรงแด้วยสนามแม่เหล็ก.....	12
3.1 เครื่องแยกแรงแด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแยกหัวแร่ให้สะอาดแบบแห้ง... 12	
3.1.1 เครื่องแยกแรงแด้วยความเข้มแม่เหล็กต่ำแบบแห้ง.....	13
3.1.2 เครื่องแยกแรงแด้วยความเข้มแม่เหล็กสูงแบบแห้ง.....	14
3.2 เครื่องแยกแรงแด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแยกหัวแร่และ แยกแร่ให้สะอาดแบบเปียก.....	21
3.2.1 เครื่องแยกแรงแแบบเปียกด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำ.....	21
3.2.2 เครื่องแยกแรงแแบบเปียกด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูง.....	21

บทที่ 4	หลักการและวิธีการของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก.....	23
4.1	หลักการเบื้องต้นของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก.....	24
4.2	หลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก.....	24
4.2.1	แรงดึงดูดแม่เหล็กที่เกิดบนเม็ดวัสดุ.....	25
4.2.2	แรงต้านที่เกิดบนเม็ดวัสดุ.....	27
บทที่ 5	การดำเนินการสร้างเครื่องแยกแรงชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ.....	28
5.1	ส่วนโครงสร้าง.....	29
5.2	ระบบควบคุม.....	39
บทที่ 6	การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในการสร้างเครื่องแยกแร่.....	43
6.1	ทดสอบปริมาณคาร์บอนในเหล็ก.....	43
6.2	การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของขั้วแม่เหล็ก (gap) กับสนามแม่เหล็ก.....	43
6.3	การทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กโดยวิธี ดี.ซี. ฮิสเทอรีซิส.....	48
บทที่ 7	การทดสอบการทำงานและสรุปผล.....	53
7.1	การทดสอบการทำงาน.....	53
7.2	สรุปและวิจารณ์.....	58

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบการทำงาน

ภาคผนวก ค. คุณสมบัติแร่

ภาคผนวก ง. คู่มือการใช้อินเวอร์เตอร์

ภาคผนวก จ. คู่มือการใช้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบ

ประวัติผู้เขียน

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ตัวอย่างพารามิเตอร์สำคัญทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย.....	8
ตารางที่ 1.2	ตัวอย่างพารามิเตอร์สำคัญทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดเหนียวยาก.....	8
ตารางที่ 3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก และ ลูกกลิ้งกับความเข้มของสนามแม่เหล็กเหนียวที่ระยะห่างต่างๆ 2-12 มม....	20
ตารางที่ 3.2	เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ และลักษณะสมบัติของเครื่องแต่ละชนิด.....	22

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่	2.1	แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	4
รูปที่	2.2	แสดง ไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก ไดอา.....	4
รูปที่	2.3	แสดง ไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก พารา.....	5
รูปที่	2.4	แสดง ไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก เฟอร์โร.....	5
รูปที่	2.5	แสดงสปินแม่เหล็กของ Mn^{2+} ใน MnO	6
รูปที่	2.6	แสดงการเรียงตัวของ ไดโพลแม่เหล็กในสารแม่เหล็ก เฟอร์รี.....	7
รูปที่	2.7	พารามิเตอร์ต่างๆที่หาได้จากฮิสเทอรีซิสลูป.....	9
รูปที่	2.8	แสดงฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กชนิดอ่อนและชนิดแข็ง.....	10
รูปที่	3.1	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ ชนิดกระบอกกลมความเร็วสูง.....	13
รูปที่	3.2	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ ชนิดกระบอกกลมสลับขั้ว.....	14
รูปที่	3.3	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ชนิดสายพานขวาง.....	16
รูปที่	3.4	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ชนิดจานหมุนเร็ว.....	17
รูปที่	3.5	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ชนิดจานหมุนแม่ถลัน.....	17
รูปที่	3.6	ลูกกลิ้ง ในเครื่องแยกแรงแม่เหล็กแบบแห้งความเข้มสูง ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ.....	19
รูปที่	3.7	เครื่องแยกแรงแบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ (แบบเกาะติด).....	19
รูปที่	3.8	แสดงลักษณะการติดแปร่งใต้ลูกกลิ้ง.....	20
รูปที่	4.1	แผนผังการแสดงการแยกวัสดุด้วยสนามแม่เหล็ก.....	24
รูปที่	4.2	แสดงค่า r และ θ ในสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ.....	26
รูปที่	5.1	รูปแสดงเครื่องต้นแบบโดยรวม.....	30
รูปที่	5.2	รูปแสดงเครื่องต้นแบบอีกมุมมองหนึ่ง.....	30
รูปที่	5.3	แสดงบริเวณ Roller ทั้งสองของเครื่องต้นแบบ.....	31
รูปที่	5.4	ภาพสเก็ทของเครื่องแยกแรงแบบลูกกลิ้งซึ่งสเก็ทจากเครื่องต้นแบบ.....	32
รูปที่	5.5	ภาพแสดงวงจรแม่เหล็กของเครื่องแยกแรงแที่จะสร้าง.....	33
รูปที่	5.6	ภาพแสดง Roller.....	33
รูปที่	5.7	แสดงแผ่นเหล็ก และทองเหลืองที่ใช้ประกอบเป็น Roller.....	34

รูปที่	5.8	แสดงลักษณะ Roller ทั้ง 2 ลูก.....	35
รูปที่	5.9	แสดงการประกอบ Roller ลงบนส่วนฐานโครงสร้าง.....	35
รูปที่	5.10	แสดงการประกอบ Yoke บนตัวเครื่อง.....	36
รูปที่	5.11	แสดงการประกอบส่วนขับเคลื่อน Roller.....	36
รูปที่	5.12	แสดงการพันขดลวด.....	37
รูปที่	5.13	ขดลวดที่พันเสร็จแล้ว ความต้านทานประมาณ 20 โอห์ม.....	37
รูปที่	5.14	ขดลวดเมื่อสำเร็จเรียบร้อยแล้ว.....	38
รูปที่	5.15	แสดงการจัดวางขดลวดในตัวเครื่อง.....	39
รูปที่	5.16	แสดงชุด Inverter ปรับความเร็วของ Roller.....	40
รูปที่	5.17	แสดงตัวตรวจนับเพื่อบอกจำนวนรอบของ Roller.....	40
รูปที่	5.18	วงจรจ่ายกระแสให้กับขดลวด.....	41
รูปที่	5.19	แสดงตัวเครื่องด้านหน้า.....	42
รูปที่	5.20	แสดงตัวเครื่องด้านหลัง.....	42
รูปที่	6.1	แสดงเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กด้วยวิธี ดี.ซี.อีสเทอริซิส.....	48
รูปที่	6.2	แสดงเครื่องวัดอีสเทอริซิสของเหล็กที่ใช้.....	49
รูปที่	6.3	กราฟอีสเทอริซิสของเหล็กที่นำมาทดสอบ.....	50
รูปที่	6.4	แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์.....	51
รูปที่	7.1	แสดงแร่ที่ได้หลังจากการแยก.....	56
รูปที่	7.2	แสดงแร่แต่ละชนิด.....	57
รูปที่	7.3	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกชนิด recovery materials ที่ความเร็วรอบของ Roller ต่างๆ.....	57
รูปที่	7.4	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกชนิด graded materials ที่ความเร็วรอบของ Roller ต่างๆ.....	58

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทย พยายามที่จะคิดค้นหาแนวทางการผลิตเครื่องจักรเครื่องมือ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมในประเทศ เพื่อลดการสูญเสียงบประมาณ และเรียนรู้เทคโนโลยีการพัฒนาเครื่องจักรเครื่องมือ สำหรับอุตสาหกรรมการแยกแร่ ก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญที่ต้องใช้เครื่องมือ หรืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้เพราะแร่เป็นทรัพยากรอย่างหนึ่ง ซึ่งทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ในการแยกแร่แต่ละครั้ง ความบริสุทธิ์ของแร่เป็นปัจจัยอันหนึ่งที่เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากขึ้นอยู่กับการใช้งาน ที่เหมาะสมว่าต้องการแร่ชนิดใด และมีผลต่อราคาของแร่ ดังนั้นในการแยกแร่ หรือแต่งแร่แต่ละชนิดจึงต้องมีการใช้ความพยายามที่จะ ได้มาซึ่งคุณภาพของแร่ จึงพยายามหาวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการแยกแร่แต่ละประเภท เพื่อให้เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ สำหรับการแยกแร่ในประเทศไทย แร่ที่ส่งออกยังต่างประเทศมักจะส่งออกในรูปแร่ดิบ หรือมีการแยกอย่างหยาบๆ เท่านั้น ความบริสุทธิ์ของแร่จึงมีเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างต่ำ แต่ในอุตสาหกรรมที่สำคัญบางประเภท ต้องการความบริสุทธิ์ของแร่มากกว่าที่เรามียู่ จึงต้องสั่งแร่จากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูงเพิ่มขึ้นอีกทั้งทำให้เราต้องเสียรายได้ให้ต่างประเทศด้วยจึงมีการพยายามใช้เทคโนโลยี ที่จะส่งผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแร่ให้ดีขึ้น โดยใช้เครื่องแยกแร่ด้วย สนามแม่เหล็กกำลังสูง หรือ เกรเดียนท์สูง (High Intensity หรือ High Gradient Magnetic Separators) ซึ่งเป็นเครื่องแยกแร่ที่มีประสิทธิภาพสูง และนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมแต่งแร่ในต่างประเทศ โดยนำไปใช้ในการแยกแร่ที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กทั้งชนิด Ferromagnetic material และ Paramagnetic material สำหรับประเทศไทยเครื่องแยกแร่ดังกล่าวที่สั่งซื้อจะมีราคาสูงมาก ตกประมาณ 3-20 ล้านบาท เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีกำลังสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับทั้งทางด้านไฟฟ้า แม่เหล็ก อิเลคทรอนิกส์ วัสดุที่ใช้ในการออกแบบต้องเหมาะสม ทั้งเหล็กที่ใช้ต้องมีประสิทธิภาพของคาร์บอนต่ำ เพื่อให้ได้ความแรงของสนามแม่เหล็กมากๆ ในการซื้อเครื่องแยกแร่ดังกล่าวแต่ละครั้ง ก็เป็นการขายเทคโนโลยีการสร้างเครื่องดังกล่าวรวมไว้ด้วย จึงมีความพยายาม สร้างเครื่องแยกแร่เลียนแบบเครื่องต้นแบบ เพื่อจะลดต้นทุนค่าใช้จ่ายให้ลดน้อยลง ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับเครื่องต้นแบบ แต่ก็มีราคาที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึง ได้เห็นถึงความสำคัญในการสร้างเครื่องแยกแร่ สำหรับอุตสาหกรรมแต่งแร่และแยกแร่ในเมืองไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่ชนิดแห้ง โครงการนี้จึงเป็นการสร้างเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูงแบบแห้ง (Dry Magnetic Separators)

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูงสำหรับใช้ในการแยกแร่
2. เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องแยกแร่ชนิดนี้ในการประยุกต์งานอุตสาหกรรมในประเทศ

1.2 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. สร้างเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูงให้เสร็จสิ้นพร้อมส่วนควบคุม
2. ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบ

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมและศึกษาข้อมูล เกี่ยวกับเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้ากำลังสูงชนิดลูกกลิ้ง เพื่อย่นำ
2. ออกแบบโครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้ากำลังสูงแบบแห้ง
3. จัดซื้ออุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเครื่องแยกแร่
4. จัดทำส่วนโครงสร้างพร้อมพันขดลวดเพื่อให้ได้กระแส 10 แอมแปร์ จำนวน 5842รอบ
5. ติดตั้งชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
6. สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและระบบควบคุม
7. ทดลองเครื่องแยกแร่และทดสอบใช้งานเครื่องแยกแร่
8. สรุปผลการทดสอบและเขียนรายงาน

บทที่ 2
หลักการเบื้องต้นทางแม่เหล็ก

2.1 นิยามพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแม่เหล็ก

ค่าความเข้มสนามทำแม่เหล็กที่ตัดผ่านตัวกลาง H กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น B มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$B = \mu H \quad (2.1)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสภาพซึมทางแม่เหล็กของตัวกลางที่สนามทำแม่เหล็กตัดผ่าน ความเข้มของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ หรือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก, B มีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศตามสมการ

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

โดย

μ_0 คือ ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กในสุญญากาศ, Hm^{-1}
ในหน่วย SI ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กในสุญญากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$
สำหรับอัตราส่วนของ μ/μ_0 เรียกว่า สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ ที่วัดเทียบกับตัวกลางในสุญญากาศ (μ_r) ค่าของสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการอีกสมการหนึ่ง คือ

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.3)$$

เมื่อ M คือ แมกเนติกเชกซ์ของสารแม่เหล็ก ค่าแมกเนติกเชกซ์ของสารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสนามแม่เหล็กตามสมการ

$$M = (\mu/\mu_0 - 1)H$$

และได้กำหนดความสัมพันธ์ของ H/M โดยให้

$$\chi_m = M/H \quad (2.4)$$

โดย χ_m คือ ค่าสภาพความอ่อนไหวทางแม่เหล็ก(magnetic susceptibility) มีความสัมพันธ์กับสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กตามสมการ

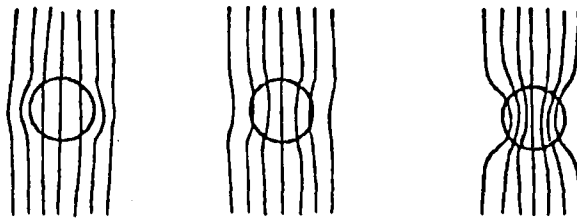
$$\chi_m = \mu_r - 1 \tag{2.5}$$

2.2 ชนิดของสารแม่เหล็ก

สารแม่เหล็กสามารถแบ่งตามสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ 5 ชนิดดังนี้

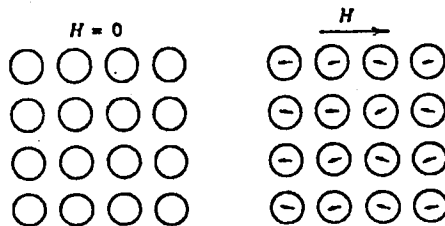
2.2.1 สารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic material)

เมื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กกับอะตอมของสารแม่เหล็กไดอะ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านอะตอมของสารแม่เหล็ก ไดอะจะเลื่อนและแยกออก มีเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปได้น้อยมาก โดยเปรียบเทียบการตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กในสารชนิดไดอะ พารา และเฟอร์โร ดังรูปที่ 2.1 ก. ข. และ ค. ตามลำดับ



ก. สารแม่เหล็กไดอะ ข. สารแม่เหล็กพารา ค. สารแม่เหล็กเฟอร์โร
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านสารแม่เหล็กที่ผ่านสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ

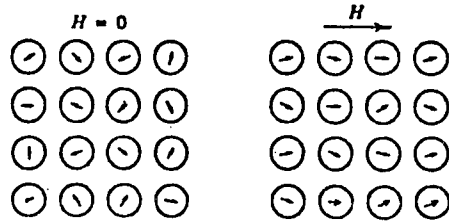
สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสารแม่เหล็กไดอะมีค่าน้อยมาก และเป็นลบซึ่งหมายความว่า สารแม่เหล็กไดอะอาจจะผลักเส้นแรงแม่เหล็ก ค่าสภาพอ่อนไหวทางแม่เหล็กของสารมีค่าเป็นลบอยู่ในช่วง -10^{-6} ลักษณะของไดโพลแม่เหล็กไดอะ เมื่อไม่มีสนามภายนอก และมีสภาพภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.2 ก. และ ข. ตามลำดับ



ก. เมื่อไม่มีสนามภายนอก ข. เมื่อมีสนามภายนอก
รูปที่ 2.2 แสดงไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็กไดอะ

2.2.2 สารแม่เหล็กพารา (Paramagnetic material)

เป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพแม่เหล็กอ่อนมาก ผลตอบสนองต่อสนามทำแม่เหล็กภายนอกมีค่าน้อยขณะที่ไม่มีสนามทำแม่เหล็กภายนอก สารแม่เหล็กพาราจะมีไดโพลแม่เหล็กวางตัวในลักษณะสุ่ม ผลรวมของไดโพลแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์หมายถึงไม่แสดงอำนาจแม่เหล็กออกมา ดังรูปที่ 2.3 ก. และ ข. เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจะลู่เข้าสู่อะตอมของสารได้แต่ไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.1 ข. ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในสารแม่เหล็กพารามีค่าใกล้เคียงกับสูญญากาศ ค่าของสภาพอ่อนไหวทางแม่เหล็กมีค่าน้อยอยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-6} มีค่าเป็นบวก และไม่ขึ้นกับความเข้มของสนามทำแม่เหล็ก ค่าสภาพอ่อนไหวทางแม่เหล็กนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

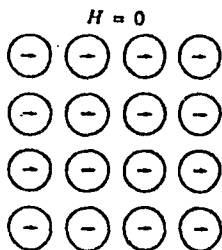


ก. เมื่อไม่มีสนามภายนอก ข. เมื่อมีสนามภายนอก

รูปที่ 2.3 แสดงไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็กพารา

2.2.3 สารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic material)

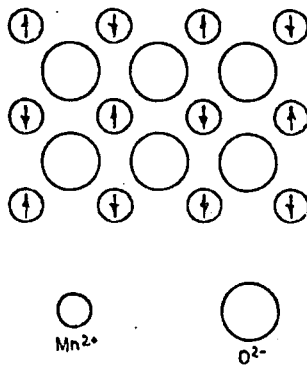
เป็นสารแม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวร แม้จะไม่มีสนามทำแม่เหล็กภายนอกค่าโมเมนต์แม่เหล็กมีค่ามาก สารพวกนี้มีความเป็นแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร สารเหล่านี้มักจะประกอบด้วยธาตุได้แก่ โลหะทรานสิชัน เช่น เหล็ก โคบอล นิเกิล เป็นต้น ค่าสภาพอ่อนไหวทางแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกและขึ้นกับความเข้มของสนามทำแม่เหล็ก เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านสารแม่เหล็กเฟอร์โร เส้นแรงแม่เหล็กสามารถจะผ่านเข้าไปในอะตอมได้มาก (ลู่เข้าสู่อะตอม) ดังรูปที่ 2.1 ค. ไดโพลแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเองในสารแม่เหล็กเฟอร์โร มีลักษณะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์โร

2.2.4 สารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetic material)

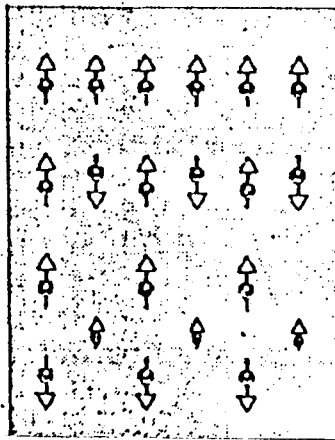
เป็นสารแม่เหล็กที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก ระหว่างอะตอมที่สามารถแสดงสภาพแม่เหล็ก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสารแม่เหล็กเฟอร์โร แต่การเชื่อมต่อของโมเมนต์แม่เหล็กในสารแอนติเฟอร์โร มีลักษณะหักล้างกันจนทำให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมมีค่าต่ำมากๆ ยกตัวอย่างสารที่เป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร เช่น MnO เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าสปินของโมเมนต์แม่เหล็กของไอออน Mn^{+2} เรียงสลับไปมาหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ดี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งเรียกว่า อุณหภูมิของเนล T_N (Neel temperature) จะทำให้สารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเป็นสารแม่เหล็กพารา



รูปที่ 2.5 แสดงสปินแม่เหล็กของ Mn^{2+} ใน MnO

2.2.5 สารแม่เหล็กเฟอร์ริ (Ferrimagnetic material)

คุณสมบัติทางมหภาคของสารแม่เหล็กเฟอร์ริ และสารแม่เหล็กเฟอร์โรมีลักษณะคล้ายกัน แต่แตกต่างกันตรงแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กซึ่งสารแม่เหล็กเฟอร์รินั้น โมเมนต์แม่เหล็กเกิดจาก คิวบิตเฟอร์ไรต์ (cubic ferrite) ดังนั้นไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์ริจะมีค่าแตกต่างจากสารแม่เหล็กเฟอร์โรอย่าง ลักษณะการเรียงตัวของไดโพลแม่เหล็กของสารแม่เหล็กเฟอร์ริแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเรียงตัวของ ไดโพลแม่เหล็กในสารแม่เหล็กเฟอร์รี

สารแม่เหล็กเฟอร์รีจะมีส่วนประกอบของไอออนเหล็กอยู่ 2 ตัว คือ Fe^{2+} กับ Fe^{3+} ผลทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดนี้มีลักษณะอยู่กลางๆ ระหว่างสารแม่เหล็กเฟอร์โร กับสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร และคุณสมบัติทางแม่เหล็กจะหมดไป เมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่ง (เช่นเดียวกับสารเฟอร์โร) อุณหภูมิค่านี้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperature)

สำหรับสารแม่เหล็กเฟอร์โรและสารแม่เหล็กเฟอร์รี ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่คล้ายๆ กัน มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

- สารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย (soft magnetic materials)

สารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่ายนี้ เป็นสารที่มีค่าความเข้มของ เส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation flux density) ต่ำ แต่มีค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กสูง แสดงในตารางที่ 1.1 และมีค่า energy loss ต่ำ สามารถทำให้สนามแม่เหล็กเหนียวที่เกิดขึ้นสลับไปมาได้ง่าย จากเหตุผลเหล่านี้ทำให้สารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย มีประโยชน์อย่างมาก ในการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมประเภทสวิทช์และภาคขยายสัญญาณ และมีความเหมาะสมอย่างมาก ในการนำมาทำเป็นแกนของทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ใช้ในงานความถี่สูง

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างพารามิเตอร์สำคัญของสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย

Material	Composition (wt%)	Initial Relative Permeability, μ_i	Saturation Flux Density, B_s [Tesla (gauss)]	Hysteresis Loss/Cycle $[J/m^3 (erg/cm^3)]$	Resistivity, ρ (ohm-m)
Commercial iron ingot	99.95 Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	1.0×10^{-7}
Silicon-iron (oriented)	97 Fe, 3 Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	4.7×10^{-7}
45 Permalloy	55 Fe, 45 Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	4.5×10^{-7}
Supermalloy	79 Ni, 15 Fe, 5 Mo, 0.5 Mn	75,000	0.80 (8000)	—	6.0×10^{-7}
Ferroxcube A	48 MnFe ₂ O ₄ , 52 ZnFe ₂ O ₄	1400	0.33 (3300)	-40 (-400)	2000
Ferroxcube B	36 NiFe ₂ O ₄ , 64 ZnFe ₂ O ₄	650	0.36 (3600)	-35 (-350)	10 ⁷

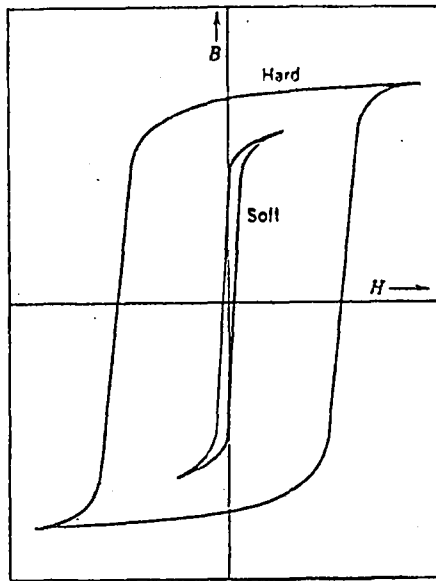
- สารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย (hard magnetic materials)

สารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่ายเป็นสารแม่เหล็ก ที่มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก อิมิตัวสูง มีค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กต่ำ และมีค่า energy loss สูง จากคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมานี้จะเห็นว่าสามารถนำสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย ไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ในลักษณะของแม่เหล็กถาวร เช่น ทำลำโพง ทำมอเตอร์ ทำมิเตอร์ เป็นต้น ตัวอย่างของสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่ายแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างพารามิเตอร์สำคัญของสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย

Material	Composition (wt%)	Remanence, B_r [Tesla (gauss)]	Coercivity, H_c [amp-turn/m (oersted)]	$(BH)_{max}$ $[J/m^3 (gauss-oersted)]$	Curie Temperature, T_c [°C (°F)]
Martensitic carbon steel	98.1 Fe, 0.9 C, 1 Mn	0.95 (9500)	4000 (50)	1600 (0.20×10^6)	—
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2600 (0.33×10^6)	760 (1400)
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12,000 (1.5×10^6)	410 (770)
Cunico	29 Co, 21 Ni, 50 Cu	0.34 (3400)	54,000 (680)	6400 (0.8×10^6)	860 (1580)
Sintered Alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	123,000 (1550)	36,000 (4.5×10^6)	860 (1580)
Ferroxdur (oriented)	BaO-6Fe ₂ O ₃	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20,000 (2.5×10^6)	450 (840)

การแบ่งสารแม่เหล็กออกเป็นชนิดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ได้อาศัยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่แตกต่างกันของสาร พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้เราสามารถหาได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่นิยมคือหาจากฮิสเตอร์ริซิสของสารชนิดนั้นๆ



รูปที่ 2.8 แสดงฮิสเทอริซิสของสารแม่เหล็กชนิดอ่อนและชนิดแข็ง

- สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตกค้าง (Residual induction : B_r)

เป็นค่าของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ยังคงเหลือค้างอยู่ในสารแม่เหล็ก หลังจากทำการเหนี่ยวนำด้วยสนามทำแม่เหล็ก และทำการลดสนามแม่เหล็กภายนอกให้กลับมีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กตกค้างนี้ จะมีค่ามากสำหรับสารแม่เหล็กชนิดเหนี่ยวนำยาก และมีค่าน้อยสำหรับสารแม่เหล็กชนิดเหนี่ยวนำง่าย

- สนามทำลายแม่เหล็ก (Coersive force : H_c)

เป็นค่าสนามทำแม่เหล็กที่เป็นคัมมิตีไทเซอร์ (Demagnetizer: สนามแม่เหล็กในทิศตรงข้ามกับสนามที่เคยทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ) สนามทำลายแม่เหล็กนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กตกค้างของสารแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ โดยสนามทำลายแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับ hysteresis loss อย่างใกล้ชิด เนื่องจากสนามทำลายแม่เหล็กจะเป็นค่าความกว้างของ hysteresis loop

- hysteresis energy loss

เป็นค่าพลังงานสูญเสียทางแม่เหล็กของสาร มีค่าเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ภายในของฮิสเทอริซิสลูป โดย hysteresis energy loss จะมีค่าตามสมการ

$$W_h = KA/4\pi \tag{2.1}$$

W_h คือ hysteresis energy loss

K คือ ค่าคงที่ที่เกิดจากความสัมพันธ์ของ B และ H

A คือ พื้นที่ของฮิสเทอรีซิสลูป

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่ายจะมี hysteresis energy loss มากกว่าสารแม่เหล็กชนิดเหนียวง่าย

ฮิสเทอรีซิสลูปมีประโยชน์มาก ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กชนิดต่างๆ โดยเฉพาะสารแม่เหล็กเฟอร์โรและเฟอร์ริทั้งชนิดเหนียวง่ายและชนิดเหนียวง่าย

บทที่ 3

ชนิดของเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็ก

เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็ก แบ่งตามลักษณะการทำงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. ประเภทเกาะติด (Holding Type)

เครื่องแยกแร่ประเภทนี้ แร่หรือวัสดุที่ต้องการแยกจะถูกป้อนโดยตรง และสัมผัสกับขั้วแม่เหล็ก แร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กจะถูกแยกออกโดยการเหวี่ยง ส่วนแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กจะเกาะติดกับเครื่องแยก ไปจนกระทั่งบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจึงถูกปล่อยให้ตก ถ้าเป็นเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กชนิดเปียก น้ำจะช่วยล้างแร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กออก

2. ประเภทคูดัก (Pick up or lift type)

เครื่องแยกแร่ประเภทนี้ แร่หรือวัสดุที่ต้องการแยก ไม่ได้ป้อนโดยตรงลงสัมผัสกับขั้วแม่เหล็ก แต่จะถูกนำมาผ่านสนามแม่เหล็ก แร่ที่คูดักแม่เหล็กจะถูกคูดักขึ้นมาที่ขั้วแม่เหล็ก ส่วนแร่ที่ไม่ติดแม่เหล็กจะมีสายพานหรือจานนำแร่ออกไปจากขั้วแม่เหล็ก

อย่างไรก็ตาม การแบ่งเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกหัวแร่และแยกแร่ให้บริสุทธิ์นี้นิยมแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบแห้ง (Dry Type)

2. แบบเปียก (Wet Type)

ซึ่งในการสร้างและพัฒนาเครื่องแยกแร่ในครั้งนี้ เราเน้นการพิจารณา ในแบบแห้งซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้

3.1 เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแยกหัวแร่ให้สะอาดแบบแห้ง

(Dry Magnetic Separator)

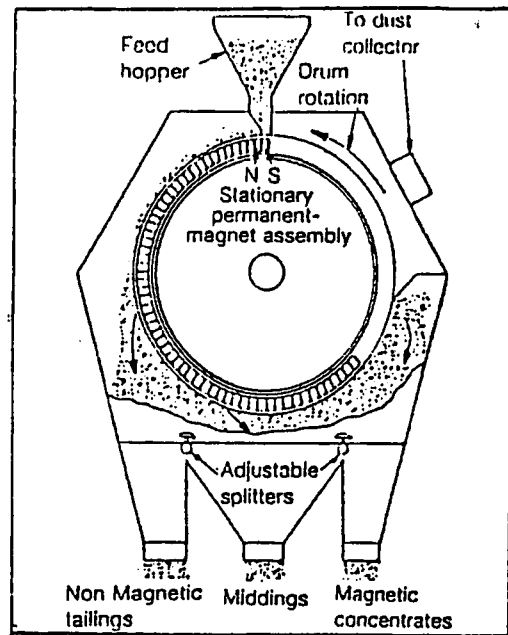
ปกติการแยกแร่แบบแห้งใช้แยกแร่ที่มีขนาดตั้งแต่ 3 ม.ม. ไปจนถึง 0.075 มม. หรือ 75-3000 ไมครอน แบ่งได้เป็น 2 แบบ ตามความเข้มสนามแม่เหล็ก คือพวกความเข้มต่ำ และพวกความเข้มสูง

3.1.1 เครื่องแยกแร่ความเข้มแม่เหล็กต่ำแบบแห้ง (Dry Low Intensity Magnetic Separator)

เครื่องแยกแร่นี้ใช้สำหรับแยกเศษเหล็ก และแยกแร่ที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กสูงที่มีขนาดใหญ่ เช่น แร่แมกนีไทต์ (Magnetite) ซึ่งเรียกขบวนการแยกแร่แมกนีไทต์นี้ว่า "Magnetic cobbing" ที่ใช้กันอยู่ มี 2 ชนิด

- เครื่องแยกแร่ชนิดกระบอกกลมความเร็วสูง (High-Speed Drum Magnetic Separator)

เป็นเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็ก ที่แยกแร่ที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กสูง เช่น แมกนีไทต์และ แร่โรนิกิล ซึ่งใช้ทั้งแม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวร โดยมีขั้วแม่เหล็กวางสลับขั้วอาจมีจำนวนถึง 44 ขั้ว ซึ่งประกอบเป็นส่วนโค้งของทรงกระบอกกลมประมาณ 270 องศา แสดงดังรูปที่ 3.1



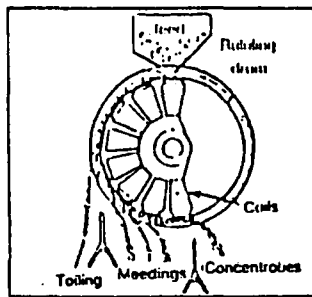
รูปที่ 3.1 เครื่องแยกแร่แบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ ชนิดกระบอกกลมความเร็วสูง

ส่วนใหญ่จะใช้แยกแร่เม็ดละเอียดเป็นผงแห้งขนาดเล็กลงกว่า 100 เมช หรือ 38 ไมครอน แต่อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจใช้กับแร่ที่ป้อนอาจมีขนาดโตถึง 1 นิ้ว ก็ยังสามารถแยกได้ แร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กจะถูกเหวี่ยงออกไป ส่วนแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กจะเกาะติดกับกระบอกกลมจนพันสนามแม่เหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกกลมมีค่า 18 ถึง 48 นิ้ว โดยกระบอกกลมมีค่าความเร็วปกติโดยทั่วไป 20 ถึง 45 รอบต่อนาที และอาจมีความเร็วสูงถึง 200 รอบต่อนาที ขนาดของเม็ดแร่ที่ป้อน มีอิทธิพลต่อความเร็วสูงของกระบอกกลม กล่าวคือ เมื่อแร่มีขนาดโต ความเร็วจะต้องลดลง ที่ความเร็วสูงจะแยกแร่เม็ดละเอียดได้ปริมาณมาก แต่อาจมีแร่ที่ไม่เป็น

สารแม่เหล็กหลงปะปนไปกับแร่ที่เป็นสารแม่เหล็ก และการที่ขั้วแม่เหล็กสลับกันหลายขั้วทำให้แร่ที่เป็นสารแม่เหล็กเคลื่อนพลิกตัวได้ดีทำให้ได้หัวแร่ที่สะอาดขึ้น ส่วนแร่คละ นำมาแยกใหม่ได้อีก

- เครื่องแยกแร่ชนิดกระบอกกลมสลับขั้ว (Alternating polarity Drum Separator)

ภายในกระบอกกลมมีขั้วแม่เหล็กสลับขั้วเหนือ-ใต้ ติดต่อกันเป็นระยะ 1/2 ถึง 2/3 ของความยาวเส้นรอบวงของกระบอกกลม แร่ที่เป็นสารแม่เหล็กจะถูกขั้วแม่เหล็กดูดให้ติดอยู่ที่ผิวของกระบอกกลมซึ่งหมุนไปตามลูกศรโดยที่ขั้วแม่เหล็กตั้งอยู่กับที่ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องแยกแร่แบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำชนิดกระบอกกลมสลับขั้ว

เมื่อแร่จะพลิกกลับไปกลับมา เมื่อเคลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่ต่างขั้วกัน การสลับขั้วของแม่เหล็ก ทำให้พวกแร่ลพิษที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กไม่สามารถเกาะปนมากับแร่ดีคแม่เหล็กได้ จนทันสนามแม่เหล็ก เม็ดแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กจึงผละออกจากผิวกระบอกกลม และตกลงในช่องแร่ ส่วนแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก เช่น หิน กรวด ทราย จะเลื่อนหล่นมาตามผิวของลูกกลิ้งกระบอกกลม และตกลงในช่องแร่สำหรับแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก ความเร็วของกระบอกกลมประมาณ 50 รอบต่อนาที เครื่องแยกแร่ออกมาสำหรับแร่ป้อนที่เป็นสารแม่เหล็ก ปริมาณมากที่มีคุณภาพสูง สามารถแยกแร่แม่เหล็กที่มีขนาด 1 นิ้วลงไปจนถึง 38 ไมครอน โดยสนามแม่เหล็กจะสามารถดูดแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กปริมาณมากซึ่งความจุ (capacity) ของเครื่องเป็นส่วนกลับกันกับขนาดของแร่ที่ป้อน

3.1.2 เครื่องแยกแร่แบบแห้งที่ใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูง (Dry High Intensity Magnetic Separator ,DHIMS)

ใช้แยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กพารา (Paramagnetic Mineral) เช่น แร้อิลเมนไนต์ (Ilmenite) แร่ซีเดอไรต์ (siderite) แร่ทังสเตนไมต์ (Wolframite) แร่แมงกานีส (Manganese Ore) ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กสูงนี้ได้มาจากอำนาจการเหนี่ยวนำทางกระแสไฟฟ้า คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของแร่จะมีอิทธิพลในการแยกแร่

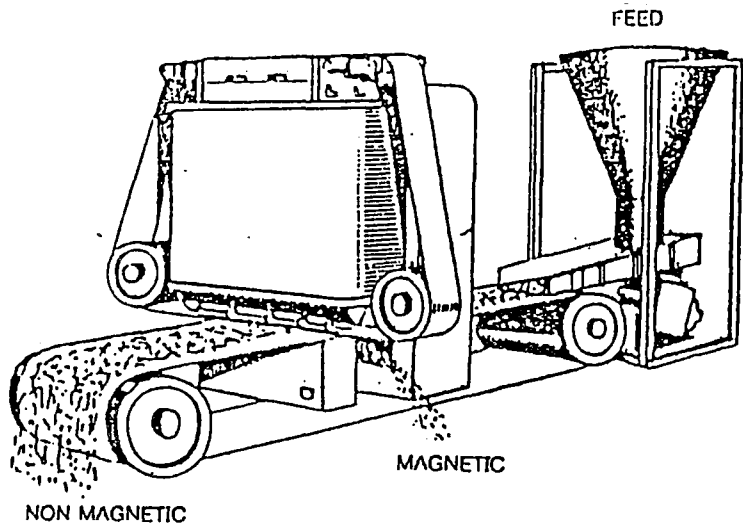
เครื่องแยกแร่ชนิดนี้หากนำมาแยกแร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน หรือ 200 เมช แล้วประสิทธิภาพจะลดลง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากกระแสอากาศ การยึดเกาะกันระหว่างเม็ดแร่

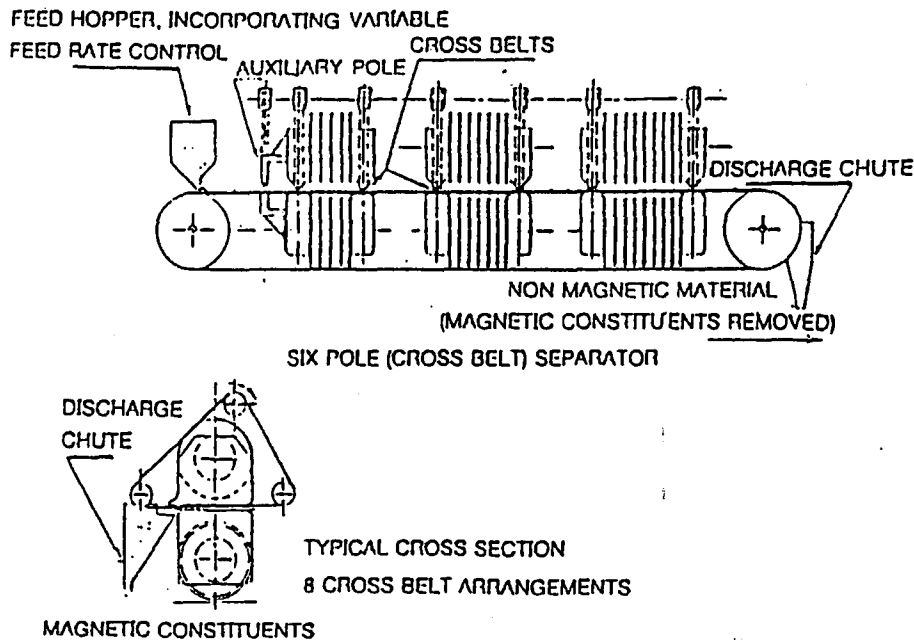
และการยึดเกาะกันระหว่างลูกกลิ้งกับเม็ดแร่ ซึ่งแก้ไขโดยการก่อนการแยกแร่ต้องนำแร่มากำจัดฝุ่นก่อนป้อนเข้า เครื่องก็จะกำจัดปัญหาเหล่านี้ลงได้ แต่มีปัญหาดังที่ผู้เขียนบรรยายต่อสุขภาพ และการกำจัดฝุ่นต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายสูงเพิ่มขึ้น

เครื่องแยกแร่แบบนี้มีหลายชนิด คือ

- เครื่องแยกแร่ชนิดสายพานขวาง (Cross Belt Magnetic Separator)

จัดเป็นเครื่องแยกแร่ประเภทดูดติด (Pick up or Lift Type) โดยการจัดวางให้แม่เหล็กสามารถอุ้มเม็ดแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กออกจากแร่ป้อน เครื่องแยกประกอบด้วยสายพานลำเลียงแร่ป้อนซึ่งเดินอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็กรูปเกือกม้า โดยจำนวนแม่เหล็กรูปเกือกม้าอาจมีมากกว่าหนึ่งชุด ซึ่งแม่เหล็กแต่ละชุดจะมีสายพานเดินอยู่ในแนวขวางกับทิศทางของสายพานลำเลียง แร่ป้อน ขั้วบนของแม่เหล็กจะมีรูปร่างเป็นลิ้ม หรือเป็นขอบแหลม ในขณะที่ขั้วด้านล่างมีหน้าตัดเรียบ เพื่อให้มีค่า Magnetic Field Gradient สูงในช่องว่าง หรือเพื่อรวมเส้นแรงแม่เหล็ก ให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงขึ้นไปอีก แร่จะดูดติดขั้วแม่เหล็กด้านบนซึ่งสายพานขวางจะนำแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กออกจากขั้ว ปล่อยให้ยังด้านท้ายของสายพานขวางนั้นๆ หากเครื่องแยกมีจำนวนแม่เหล็กรูปเกือกม้า หรือสายพานขวางมากกว่า 1 ชุดแล้ว จะต้องจัดให้สายพานขวางเส้นแรกมีความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำกว่าชุดถัด ๆ มาและออกแบบให้ขั้วแม่เหล็กชุดบนสามารถเลื่อนขึ้นลงเพื่อจัดระยะของช่องว่างได้ โดยทั่วไปขั้วแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะมีช่องว่างแคบที่สุด เพื่อดึงดูดเอาแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อนที่สุดไว้ ส่วนความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถปรับได้โดยการปรับกระแสไฟฟ้าของขดลวดที่พันขั้วแม่เหล็กอยู่ แร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กจะถูกลำเลียงไปตามสายพานลำเลียงแร่จนสุดสายพานแล้วจึงหล่นออกไป โดยมีภาชนะรองรับ ดังนั้นจึงสามารถแยกเอาแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กออกจากแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กได้ เครื่องแยกแร่ชนิดนี้สามารถปรับความเร็วของสายพานป้อนแร่ และสายพานขวางได้ ในการแยกกันความเร็วของสายพาน , ระยะช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กบนและล่าง และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะต้องจัดให้เหมาะสมจึงจะทำให้การแยกได้ผลดีที่สุด ส่วนแร่ที่จะป้อนเพื่อทำการแยกนั้นควรผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาแล้วเป็นอย่างดี และแร่จะต้องแห้ง ส่วนแร่ที่เปียกชื้นนั้นจะแยกไม่ได้ผลดี เครื่องแยกแร่เหล็กชนิดสายพานขวางมีลักษณะดังรูปที่ 3.3





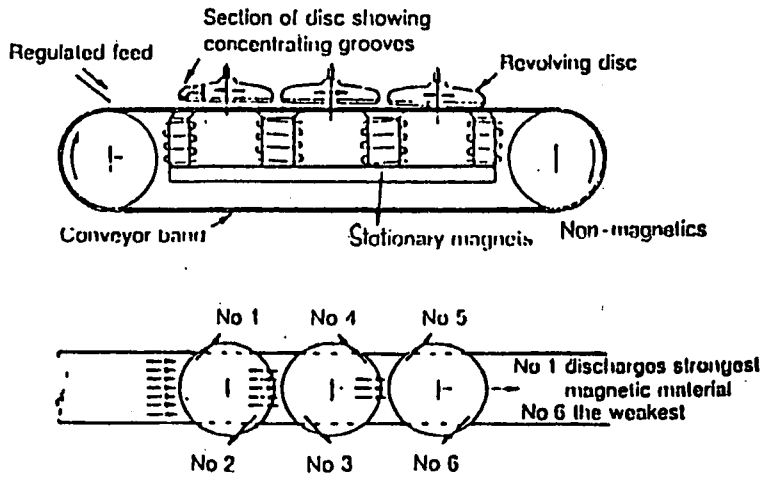
รูปที่ 3.3 เครื่องแยกแร่แบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูงชนิดสายพานขวาง

เครื่องแยกแร่ชนิดนี้สามารถให้แยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อน เช่น แร้อลิเมไนต์ ดิบก โมนาไซต์ การ์เนต โครไมต์ วุลแฟรมไต์ และแร่ที่มีค่าอื่นๆ อีกหลายชนิดโดยการป้อนแร่ลงบนสายพานลำเลียงให้เป็นชั้นบางๆ แร่จะผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงที่ถูกเหนี่ยวนำโดยขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แร่จะดูดติดขั้วแม่เหล็กตามสายพานขวาง ซึ่งแร่แต่ละชนิดจะถูกดูดติดขั้วแม่เหล็กสายพานขวางได้ตามความไวต่ออำนาจแม่เหล็กของแร่ใ้่นๆ

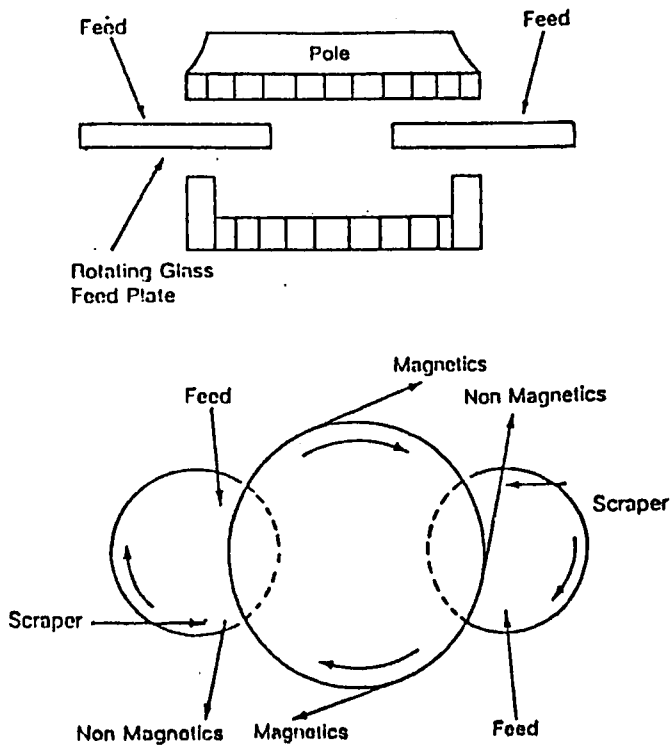
- เครื่องแยกแร่ชนิดจานหมุน (Disc Magnetic Separator)

เป็นเครื่องแยกแร่ประเภทดูดติด ที่ได้รับการพัฒนามาจากชนิดสายพานขวาง แต่ต่างจากชนิดสายพานขวางตรงที่ใส่จานซึ่งมีขอบรูปลิ้นร่องยาว (Grooved Disc) แทนสายพานขวางซึ่งขอบรูปลิ้นยาวจะทำให้ค่าของ Magnetic Field Gradient มีค่าสูง ช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กสามารถปรับได้ โดยการยกจานหมุนให้สูงหรือต่ำลง และสามารถปรับความเอียงของจานหมุนได้ ซึ่งจะทำให้ช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ขอบหน้ามากกว่าขอบหลัง ทำให้แร่ที่เป็นสารแม่เหล็ก 2 ชนิด ที่มีความไวต่ออำนาจแม่เหล็กต่างกันแยกออกจากกันได้ ส่วนใหญ่เครื่องแยกแร่ชนิดจานหมุนใช้กันอยู่มี 2 แบบ คือ

- 1) แบบจานหมุนเร็ว แสดงได้ดังรูปที่ 3.4
- 2) แบบแมคสัน (Mclean) ซึ่งมีจานหมุนเพียงจานเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องแยกแร่แบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูงชนิดจานหมุนเร็ว



รูปที่ 3.5 เครื่องแยกแร่แบบแห้งความเข้มสนามแม่เหล็กสูงชนิดจานหมุนแม่กลืน

เครื่องแยกแร่ชนิดรปัด ผลิตโดย Boxmag Rapid Ltd. ประเทศอังกฤษ สามารถลดช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก และสายพานลำเลียงแร่ป้อนได้แคบกว่าเครื่องแยกแร่ชนิดสายพานขวาง และสามารถเลือกแยกแร่ได้ดีกว่าด้วย

หลักการการทำงานของเครื่องแยกแร่แบบนี้ก็คือ มีการจัดเรียงจานหมุนเป็นแบบอนุกรม ซึ่งมีขอบรูปสี่เหลี่ยมยาว ตามแนวเส้นรอบวงของจานหมุนอยู่ข้างบนสายพานลำเลียงแร่ป้อน โดยมีสนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากขดลวดไฟฟ้าติดตั้งอยู่กับที่ใต้สายพาน (ดูรูปที่ 3.4 ประกอบ) จานหมุนชุดแรกๆ จะมีช่องว่างห่างจากจานหมุนชุดท้ายๆ ซึ่งจะทำให้แต่ละจานหมุนทำการแยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งมีความไวต่ออำนาจแม่เหล็กต่างๆ กันได้ ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นจากจานหมุนแรกไปยังจานหมุนสุดท้าย ซึ่งปรับได้โดยการจัด ระยะห่างระหว่างจานหมุน กับสายพานหรือปรับความเอียงของจานหมุน หรือโดยการปรับกระแสไฟฟ้าของแม่ขดลวดแม่เหล็กเมื่อป้อนแร่ที่กักขนาดมาแล้ว เม็ดแร่จะผ่านเข้าไปยังสนามแม่เหล็ก ที่มีความเข้มสูงขึ้นเรื่อยๆ แร่ที่มีความไวต่ออำนาจแม่เหล็กจะถูกดูดติดขึ้นมาตามช่องว่างของจานหมุน ส่วนแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กจะลำเลียงไปตามสายพาน เครื่องแยกแร่แบบนี้มักมีจำนวนจานหมุน 2 หรือ 3 จาน ซึ่งมันสามารถทำการเลือกแยกแร่ชนิดต่างๆ ออกมาในแต่ละช่องว่างเป็นพวกๆ ได้ดีแม้ว่าแร่ต่างๆ เหล่านั้นจะมีความไวต่ออำนาจแม่เหล็กแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยก็ตาม การทำงานตามปกติของเครื่องแยกแร่แบบนี้ ความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ใช้ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 8,000 ถึง 15,000 เกาส์ ซึ่งเพียงพอที่จะดูดเอาแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อนขึ้นมาได้

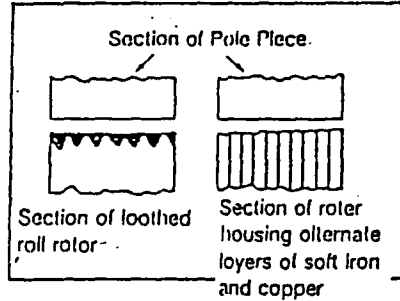
ส่วนเครื่องแยกแร่ชนิดจานหมุนแบบแมคคลีน จะใช้หลักการแยกแร่คล้ายกับแบบรปัด แต่มีจานหมุนอยู่เพียงจานเดียว โดยใช้แม่แท่งขั้วแม่เหล็กเข้าไปแทนสายพาน ซึ่งแสดงให้เห็นตามรูปที่ 5

เครื่องแยกแร่แบบจานหมุนเร็วและแบบแมคคลีน มักนิยมใช้แยกแร่ที่ฝังตัวอยู่ตามชายหาดซึ่งเกิดจากชายหาด (Beach Sand Deposit) และแหล่งลานแร่ (Alluvial Deposit) แร่แยกแร่คาร์เนต ออกจากแร่โมนาไซต์ และแยกแร่โมนาไซต์ออกจากแร่ซีโนไท์ ซึ่งขบวนการแยกแร่จากแหล่งลานแร่ มักจะใช้เครื่องแยกแร่แบบลูกกลิ้งเหนี่ยวนำ (Induced Magnetic Roll Separator) แยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กทั้งหมดออกมาก่อน เพราะมีความจุได้มาก แล้วจึงใช้เครื่องแยกแร่แบบจานหมุนทำการเลือกแยก (Selectivity) อีกทีหนึ่ง ซึ่งการเลือกแยกของเครื่องแยกแร่แบบจานหมุนจะดี แต่ความจุจะต่ำ

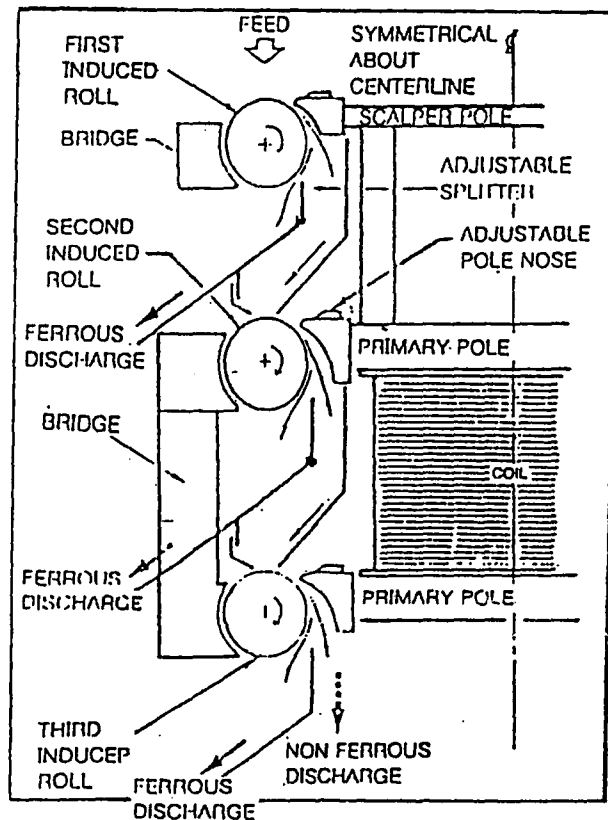
- เครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนี่ยวนำ (Induced Magnetic Roll Separator) หรือ IMRS

เครื่องแยกแร่ชนิดนี้ ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ปี พ.ศ 2451 เพื่อแยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อนและ ได้มีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นเครื่องแยกชนิดเกาะติด (Holding type) มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว มี 2 ชุดประกบกัน ระหว่างขั้วแม่เหล็กมีลูกกลิ้ง (Roll) ภายในลูกกลิ้งกลวง บนลูกกลิ้งจะมีแถบเหล็กอ่อนที่มีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon)

สลักกับวัตถุที่ไม่ติดแม่เหล็ก เช่น ทองแดง(copper) หรืออลูมิเนียม(Aluminum) และอาจทำให้มีรูปร่างเป็นรูปฟันเลื่อย(Tooth) ดังรูปที่ 3.6

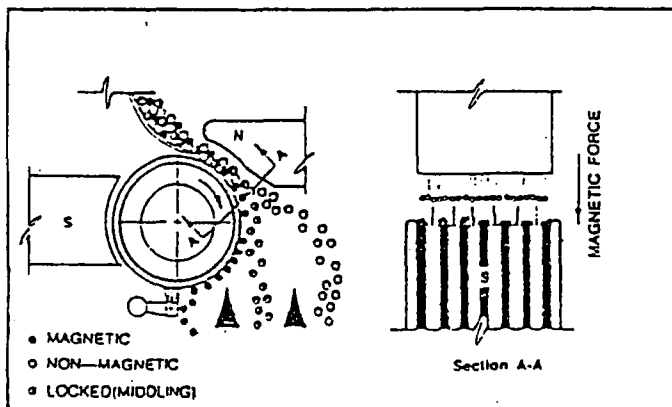


รูปที่ 3.6 ลูกกลิ้งในเครื่องแยกแม่เหล็กแบบแห้งความเร็วสูงชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ ลูกกลิ้งทำหน้าที่เป็นขั้วแม่เหล็ก เพราะได้รับความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำให้แม่เหล็กเกาะติด อีกทั้งยังทำหน้าที่ป้อนแร่อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องแยกแม่เหล็กแบบแห้งสนามแม่เหล็กสูง ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ (แบบเกาะติด) มี 3 ลูกกลิ้ง ลูกกลิ้งบนสุดใช้แยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างแรง

เมื่อลูกกลิ้งหมุนตามทิศทางที่ลูกศรชี้ เม็ดแร่ผ่านลูกกลิ้งลูกแรกไปซึ่งจะแยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างแรงก่อน ส่วนแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กจะถูกเหวี่ยงออกไปจากลูกกลิ้งตัวแรก ตกไปยังลูกกลิ้งตัวถัดไปซึ่งอยู่ด้านล่าง จะทำหน้าที่แยกแร่ที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะได้แร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อนตามลำดับ ปกติเราจะติดแม่เหล็กไว้ใต้ลูกกลิ้งดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะ ในการติดแม่เหล็กไว้ใต้ลูกกลิ้ง

การติดแม่เหล็กไว้ใต้ลูกกลิ้งเพื่อป้องกันแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างแรง ซึ่งไม่ยอมหลุดจากลูกกลิ้ง ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการแยกแร่

ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ป้อนของลูกกลิ้งสามารถปรับค่าได้ โดยลูกกลิ้งบนเครื่องเคลื่อนหาสู่ลูกกลิ้งล่าง เพื่อแยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กตามลำดับความไวต่ออำนาจแม่เหล็กของแร่ชนิดต่างๆ ที่ทำการแยก ซึ่งระยะช่องว่างมีความสัมพันธ์กันกับความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กและลูกกลิ้งกับ ความเข้มของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ระยะห่างต่างๆ 2-12 มม.

Gap (mm)	Magnetic induction (T)
2	1.7
5	1.2
7	1.1
10	0.8
12	0.7

เครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเทรียวนานี้สามารถแยกแร่ที่มีขนาดตั้งแต่ 10-2,000 ไมครอน แต่แร่ที่จะนำมาแยกนั้น ควรผ่านการคัดขนาดมาเป็นอย่างดีก่อน จึงจะทำให้มีประสิทธิภาพสูง

3.2 เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการแยกหัวแร่และแยกแร่ให้สะอาดแบบเปียก (Wet Magnetic Separator)

แบ่งได้เป็น 2 แบบตามความเข้มสนามแม่เหล็ก คือพวกความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ และพวกความเข้มสนามแม่เหล็กสูง

3.2.1 เครื่องแยกแร่แบบเปียกด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำ (Wet Low Intensity Magnetic Separator ,WLIMS)

นิยมใช้กันมากในการแยกเอาแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างแรง เช่นเฟอโรซิลิกอน(Ferro-silicon)

3.2.2 เครื่องแยกแร่แบบเปียกด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator ,WHIMS)

เครื่องแยกแร่แบบเปียกด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กสูงส่วนใหญ่ใช้ในการแยกแร่ที่เป็นสารแม่เหล็กอย่างอ่อน(Paramagnetic Mineral) ออกจากแร่ไม่ติดแม่เหล็กในรูปของเหลว หรือสารแขวนลอย

ชนิดของเครื่องแยกแร่ชนิดต่างๆ และลักษณะสมบัติของเครื่องแต่ละชนิด ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตลอดจนการแนะนำการประยุกต์ใช้งานได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ และลักษณะสมบัติของเครื่องแต่ละชนิด

	Separator Type	Description	Feed Rate (m ³ /min/m)	Field Strength (T at 5 cm)	Size, mm Speed	Applications
TRAMP REMOVAL & COBBING	Suspended Magnets	Fixed position electromagnet over conveyor belt or head pulley. Continuous removal possible.				Protection of crushers and other process equipment by removal of tramp iron. Also used to remove iron from foundry sands, recover iron from slags.
	Plate and Grate Magnets	Magnet below chute (plate); series of parallel magnetized bars (grate). Periodic cleaning of magnet necessary.				Tramp iron removal. Must be free flowing material.
	Magnetic Pulley	Magnets located within head pulley of conveyor belt.			150 m/min max belt speed	As for suspended magnets.
	Cobbing Drum	Wide range of design, basically as shown in Fig. 14.1c. Operated dry.			300-916 (dia)	Coarse magnetic cobbing, tramp iron removal, iron recovery from slags, cleaning of scrap.
WET LOW INTENSITY	Concurrent	Feed slurry passes through trough in same direction as rotation of drum. Magnetic particles attracted to rotating surface by fixed magnets in drum. Non-magnetics sink to lowest point in trough and are drawn off. Magnetic concentrate carried by rotating drum through gap where compressed and dewatered before passing over weir. Agitation during long path through tank gives very good washing action and hence very clean concentrate.	50-350	0.06 to 0.07	760-1200 (dia) 1525-3050 (width)	High grade magnetite concentrate from relatively coarse ore; used on product from rod mill in taconite circuit. Widely used in heavy media recovery systems. Tailings often retreated in counter-rotation unit because of high remaining magnetics. Double or triple tank units (series) commonly used.
	Counter-Rotation	Feed slurry passed through trough in opposite direction to drum rotation. Magnetic particles picked up by drum and discharged almost immediately. Produces high recovery but low grade concentrate since little chance for trapped non-magnetics to be washed out. Recovery high as particles can be picked up further downstream by drum and returned as concentrate.	50-250	0.5-0.8 m/s	760-1200 (dia) 1525-3050 (width)	Good where surges in feed must be handled, where magnetic losses must be minimized, and where high grade is not required. Often used for retreating tailings from a concurrent drum such as in heavy media recovery where one must get maximum recovery of magnetite or ferro-silicon. With taconites, used on ball mill product. Double tanks often used.
	Counter-Current	Feed slurry introduced to about mid-point of magnetic section, so includes features of both concurrent and counter-rotation. Wash water increases agitation of magnetics to remove entrained particles and give clean concentrate. Tailings pass by magnet opposite to rotation to increase recovery.	20-250	0.05 to 0.06	760-1200 (dia) 1525-3050 (width)	Often used as finishing separator. Gives good recovery and extremely clean concentrate.
DRY LOW INTENSITY	High Speed Drum	High-speed separator with large number of permanent magnets (up to 44) placed in stationary 210° yoke within rotating drum (poles alternating). Non-magnetic thrown off by centrifugal force. Magnetics attracted to drum until out of field region. Agration due to large number of poles gives clean product.	0.05-0.45	0.04 to 0.05	400-916 (dia) 300-3000 (width) 1-9 m/s	Used to concentrate magnetite when water is not readily available. Incorporated in circuits with dry grinding. May be used with recycle of middlings.
	Ball-Norton Type	Uses higher intensity magnetic field than high speed type but has only 8-10 alternating poles.	0.13-0.5		to 760 (dia) to 1525 (width)	Concentration of coarse magnetite in dry flowsheet. Gives high grade concentrate.
WET HIGH INTENSITY	Carousel Type	Carousel consists of annular box containing a ferro-magnetic matrix. Matrix can be steel spheres, grooved plates, expanded steel, or steel wool. Carousel rotates through high intensity magnetic field which induces high gradient magnetic field in matrix. Feed enters carousel in magnetic field where magnetics are retained; rotation carries magnetics out of field where they are flushed into a launder.	0.01-1.0 (t/min)	<2.0		Used for paramagnetic minerals. Concentration of hematite and chromite. Used in removing small amounts of iron bearing minerals from china clay and concentrates of cassiterite, scheelite, and ilmenite. Potential use in removal of pyrite from coal.
	Canister Type	Fixed steel wool or expanded steel matrix within magnetic field. Feed pulp followed by wash water with magnet on; flush magnetics with magnet off.	0.07-0.3 (t/min)	2.0	2130 (dia)	Primarily used in removal of fine iron minerals from china clay; similar uses to carousel type.
DRY HIGH INTENSITY	Induced Roll	Consists of a series of revolving laminated rolls formed of alternate magnetic and non-magnetic discs. Rolls are magnetized by induction from high intensity stationary electromagnet. Non-magnetics in natural trajectory from centrifugal action. Magnetics deflected by field. General practice is to have three successive rolls of increasing magnetic field strength, achieved by reducing gap. Sized feed desirable.	0.01-0.10	<2.1	250-1000 (dia)	Concentration of dry paramagnetic materials. Widely used in beach sands industry (see Appendix). Also used with wolframite, monazite, cassiterite, and in cleaning silica sand and feldspar.
	Cross Belt	Electromagnet with poles separated by belts. Magnet lifts magnetics from thin layer on feed belt to cross belt against upper pole. Upper pole comes to sharp edge, lower pole is flat; this gives high field gradient in gap.	0.02	2.0	450 (width)	Similar use to induced roll, but limited to high value minerals such as cassiterite, columbite, monazite, and tungsten minerals. Can be used to simultaneously separate a number of minerals with a range of susceptibilities. Used where extremely selective separation required.

บทที่ 4

หลักการและวิธีการของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก

วิธีการแยกด้วยสนามแม่เหล็กมีมาแล้วประมาณ 200 ปี ในการแยกสินแร่เหล็กยังคงมีความจำเป็นมาจนถึงทุกวันนี้ ความหลากหลายของอุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นกับ ขนาดของสินแร่ที่จะนำไปใช้กับเครื่องแยกแร่

คุณสมบัติของวัสดุที่บอกถึงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก แสดงโดยค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก การแบ่งสารแม่เหล็กตามค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือสารแม่เหล็กพารา และสารแม่เหล็กไดอะ คือสารที่ผลักกับเส้นแรงแม่เหล็ก ในสารแม่เหล็กพาราอย่างแรงจะเรียกอีกอย่างว่าสารแม่เหล็กเฟอร์โร เช่น เหล็ก หรือแร่ที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร เช่น เฮมาไทต์ , อิลเมนไนต์ , ไพไรไทต์ และแร่อื่นๆ ก็เป็นสารแม่เหล็กพารา ควอตซ์ และดินขาวเป็นสารแม่เหล็กแบบไดอะ แร่สามารถแยกออกจากกันได้โดยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

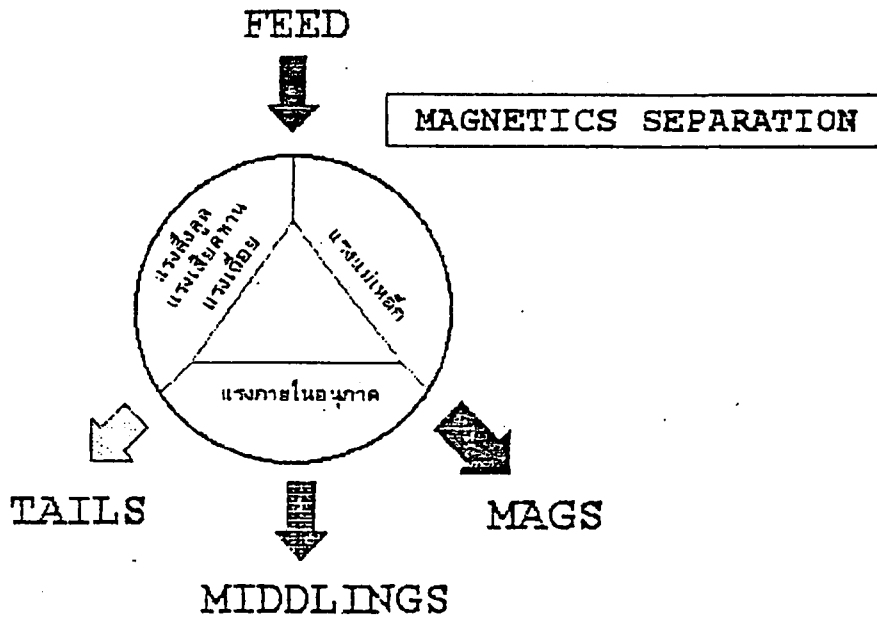
หลักการของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นพื้นฐานของการออกแบบเครื่องแยกด้วยสนามแม่เหล็กและการทำงาน

การแยกด้วยสนามแม่เหล็กเป็นขบวนการแยกทางกายภาพของอนุภาค บนพื้นฐานระหว่างแรงดึงดูด 3 ประการ

1. แรงแม่เหล็ก
2. แรงดึงดูดของโลก , แรงหนีศูนย์กลาง , แรงเสียดทาน หรือแรงภายในโมเลกุล
3. แรงดึงดูด หรือ แรงผลักระหว่างอนุภาค

ความเป็นแม่เหล็ก และแรงระหว่างอนุภาคอธิบายลักษณะของเครื่องแยกแร่ ซึ่งขึ้นกับทั้งธรรมชาติของแร่ และลักษณะของเครื่องแยก ธรรมชาติของแร่รวมไปถึงขนาด , สภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก และคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีอื่นๆ ซึ่งอาจจะมีผลเกี่ยวข้องกับแรง

4.1 หลักการเบื้องต้นของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงการแยกวัสดุด้วยสนามแม่เหล็ก

การแยกด้วยสนามแม่เหล็กเป็นการแยกอนุภาคออกจากกลุ่มของวัสดุที่ต้องการแยกด้วยแรงดึงดูดทางแม่เหล็กซึ่งจะต้องเอาชนะแรงดึงดูดอื่นๆ ที่มาต่อต้าน ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงเสียดทาน แรงเฉื่อยและแรงหนีศูนย์กลาง แรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงต่างๆ เหล่านี้ก็จะกระทำต่ออนุภาคในวัสดุที่ป้อนเข้าเครื่องแยกแร่ในลักษณะต่างๆ กัน วัสดุที่ป้อนเข้าเครื่องแยกจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่า ถ้าเป็นการแยกที่ต้องการให้ได้สารที่เป็นสารแม่เหล็กเข้มข้น ส่วนที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กก็จะเรียกว่า tails ส่วนที่ประกอบด้วยสารแม่เหล็กเป็นจำนวนมากเรียกว่า mags และส่วนที่มีสารแม่เหล็กน้อยลงเรียกว่า middling แรงดึงดูดแม่เหล็กและแรงโน้มถ่วง ,แรงเสียดทาน แรงต้านของของไหล หรือ แรงเฉื่อย เป็นแรงที่แยกอนุภาคให้ออกจากกัน ส่วนแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะเป็นแรงที่ทำให้อำนาจการแยกลดลง ในการแยกจริงๆ แล้ว ทั้งสารแม่เหล็กและสารที่ไม่ติดแม่เหล็ก อาจพบได้ทั้งใน tails และ middling มีน้อยกรณีมากที่ถือได้ว่าการแยกนั้นสมบูรณ์จริง

4.2 หลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทางฟิสิกส์ของการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของเครื่องแยกด้วยสนามแม่เหล็กทั้งด้านคุณภาพและปริมาณ สิ่งสำคัญที่บ่งชี้ถึงความสามารถของเครื่องแยกก็คือแรงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ แรงดึงดูดแม่เหล็ก และแรงต่อต้านทั้งหลายอันได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค แรงเสียดทานและแรงต้านของของไหล แรงเหล่านี้

ขึ้นกับขนาด, คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารที่ต้องการแยกและประสิทธิภาพของเครื่องแยก ประสิทธิภาพของเครื่องแยกขึ้นกับการออกแบบ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สนามแม่เหล็ก และอัตราการป้อนสารที่ต้องการแยก

4.2.1 แรงดึงดูดแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนเม็ดวัสดุ

มันเป็นการยากที่จะคำนวณแรงดึงดูดแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนเม็ดวัสดุ อย่างไรก็ตาม การตั้งสมมติฐานอย่างง่าย ๆ สามารถทำการคำนวณหาค่าแรงดึงดูดแม่เหล็กออกมาได้มีความแม่นยำพอสมควร ถ้าหากอนุภาคที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกมีขนาดเล็กเพียงพอ จนประมาณได้ว่าสนามแม่เหล็กภายในอนุภาคมีค่าสม่ำเสมอก็ถือว่าไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipole) ที่เกิดขึ้นอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของอนุภาค

แรงดึงดูดแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับอนุภาคสามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$F_m = (VM \cdot \nabla)B \tag{4.1}$$

เมื่อ VM = โมเมนต์แม่เหล็กของอนุภาคในปริมาตร V

B = สนามแม่เหล็กภายนอก หรือความเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางมวลของอนุภาค

$M = (K_u - K_m)H$ คือ โมเมนต์แม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยที่ K_u และ K_m เป็น magnetic susceptibility ของอนุภาคและตัวกลางตามลำดับ

ดังนั้นสมการ (4.1) ใน Cartesian coordinates สำหรับแรงแนวแกน x สามารถเขียนได้เป็น

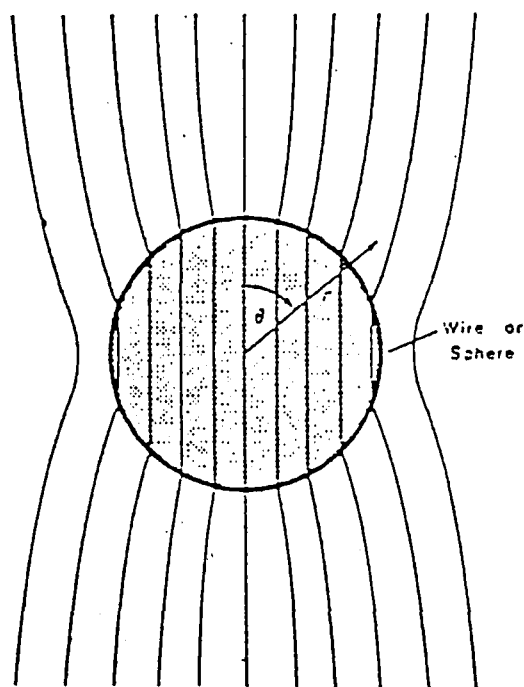
$$F_{m,x} = V(K_u - K_m)(H_x \delta B_x / \delta x + H_y \delta B_y / \delta y + H_z \delta B_z / \delta z) \tag{4.2}$$

ส่วนแรงในแนวแกน y และ z จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะเขียนสมการ (4.1) ในระบบ radial coordinates มีดังนี้

$$F_{m,r} = V(K_u - K_m)(H_r \delta B_r / \delta r + H_\theta \delta B_\theta / \delta r) \tag{4.3}$$

$$F_{m,\theta} = (V/r)(K_u - K_m)(H_r \delta B_r / \delta \theta + H_\theta \delta B_\theta / \delta \theta) \tag{4.4}$$

r และ θ มีค่าดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่า r และ θ ในสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ

ในกรณีของสารพาราแมกเนติกและไดอามกเนติกนั้น โมเมนต์แม่เหล็กต่อหน่วยปริมาตร มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้นจะประมาณได้ว่า $B = H$ (ซึ่งไม่รวมไปถึงกรณีสารเฟอร์โรแมกเนติก) และมักพบสมการเหล่านี้เขียนอยู่ในรูปสมการง่ายๆ ดังนี้

$$F_m = V(K_e - K_m) H_r \frac{dH_r}{dr} \quad (4.5)$$

จะเห็นได้ว่าแรงแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคนั้น ขึ้นกับทั้งสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป และ แกรเดียนท์ของสนามแม่เหล็กที่อนุภาคนั้นอยู่นั้น สนามแม่เหล็กและแกรเดียนท์ของสนามนั้นสามารถสร้างได้ด้วยการออกแบบที่แตกต่างกันไป เพื่อให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

4.2.2 แรงต้านทานที่เกิดบนแม่เหล็ก

แรงโน้มถ่วง แรงเสียดทาน แรงเฉื่อย และแรงต้านของของไหล เป็นแรงต้านที่เกิดขึ้นกับอนุภาคในขบวนการแยกด้วยสนามแม่เหล็ก ในกรณีของเครื่องแยกด้วยสนามแม่เหล็กชนิดถังหมุน จะมีแรงหนีศูนย์กลางก็เข้ามามีบทบาทด้วย ความสำคัญของแรงแต่ละชนิดขึ้นกับลักษณะการออกแบบของเครื่องแยกนั้นๆ แรงโน้มถ่วงและแรงต้านของของไหลเป็นแรงที่มีความสำคัญมากที่จะพิจารณาในรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับอนุภาควัสดุเป็นทรงกลมที่มีความหนาแน่น ρ_s แรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคมีค่าดังนี้

$$F_g = (\pi/6)d_v^3 (\rho_s - \rho_f)g \quad (4.6)$$

เมื่อ g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ρ_f = ความหนาแน่นของตัวกลาง

d_v = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

ในการไหลที่สม่ำเสมอจากกฎของสโตคแรงต้านของของไหล F_d มีค่าเท่ากับ

$$F_d = 3\pi d_v \nu \quad (4.7)$$

เมื่อ ν = ความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคเทียบกับตัวกลาง

μ = ความหนืดของตัวกลาง

ดังนั้น แรงโน้มถ่วงของโลกซึ่ง ขึ้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยกกำลังสาม จึงมีความสำคัญมากสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ส่วนแรงต้านของตัวกลางเป็นปฏิภาคโดยตรงกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคยกกำลังหนึ่ง จึงมีความสำคัญในกรณีอนุภาคมีขนาดเล็ก เพราะฉะนั้น ในการแยกด้วยสนามแม่เหล็กแบบแห้งสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แรงดึงดูดแม่เหล็กที่กระทำต่ออนุภาคจะต้องมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่ออนุภาค ส่วนในเครื่องแยกแบบเปียกสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก แรงดึงดูดจะต้องมีค่ามากกว่าแรงต้านของของไหลที่กระทำต่ออนุภาค

บทที่ 5

การดำเนินการสร้างเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวมา

ในการสร้างเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูงชนิดลูกกลิ้งเหนียวมา (Induced Magnetic Roll Separator, IMR) เป็นการสร้างเพื่อที่จะเรียนรู้เทคโนโลยีการสร้างเครื่องมีอัตราสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมในการแยกแร่ ในการปรับปรุงคุณภาพของแร่ให้สูงขึ้น ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมในประเทศต่อไป

เหตุจูงใจที่มีความสนใจเลือกเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวมา คือ

- ก. ได้ดำเนินการสร้างเครื่องแยกแร่ชนิดเปียกมาแล้ว จึงทำให้ครอบคลุมโดยการสร้างเครื่องแยกแร่ชนิดแห้งด้วย
- ข. มีต้นแบบเครื่องแยกแร่ชนิดนี้อยู่ที่ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แต่มีราคาสูงมาก
- ค. ขนาดของเครื่องแยกแร่ชนิดนี้ไม่ใหญ่มากนัก

1. ส่วนประกอบของเครื่องแยกแร่ที่สำคัญในการศึกษาออกแบบ

- 1.1 แกนเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 0.1% เจือปนอยู่เพราะจะทำให้ได้ค่าความเข้มของแม่เหล็กที่มีค่าสูงกว่าการเลือกใช้เหล็กทั่วไป
- 1.2 เลือกขดลวดให้เหมาะสมเพื่อจ่ายกระแสจำนวน 10 แอมแปร์
- 1.3 ศึกษาลักษณะ Roller + และชนิดของวัสดุ
- 1.4 ศึกษาและสร้างชุดขับเคลื่อนและชุดควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.1 การดำเนินการสร้าง

เพื่อการดำเนินงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้และเสร็จทันตามกำหนด ซึ่งได้แบ่งการดำเนินการสร้างเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนี้ออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งดำเนินการไปได้พร้อมๆ กัน คือ

2.1.1 ส่วนโครงสร้าง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 2.1.1.1 ศึกษาเครื่องต้นแบบที่ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2.1.1.2 เขียนแบบ

2.1.1.3 ทดสอบปริมาณคาร์บอนในเหล็ก ที่จะนำมาสร้างเป็นลูกกลิ้งและแกนเหล็ก

2.1.1.4 คำแนะนำการสร้างส่วนโครงสร้าง

โดยเริ่มทำจากการสร้างส่วนของ

1. Roller
2. Yoke
3. ฐานติดตั้ง
4. ทัชชกลวด
5. นำส่วนต่างๆ มาประกอบเป็นตัวเครื่อง
6. นำส่วนควบคุมมาประกอบและทดสอบ

2.1.2 ระบบควบคุม ประกอบไปด้วย 2 ส่วน

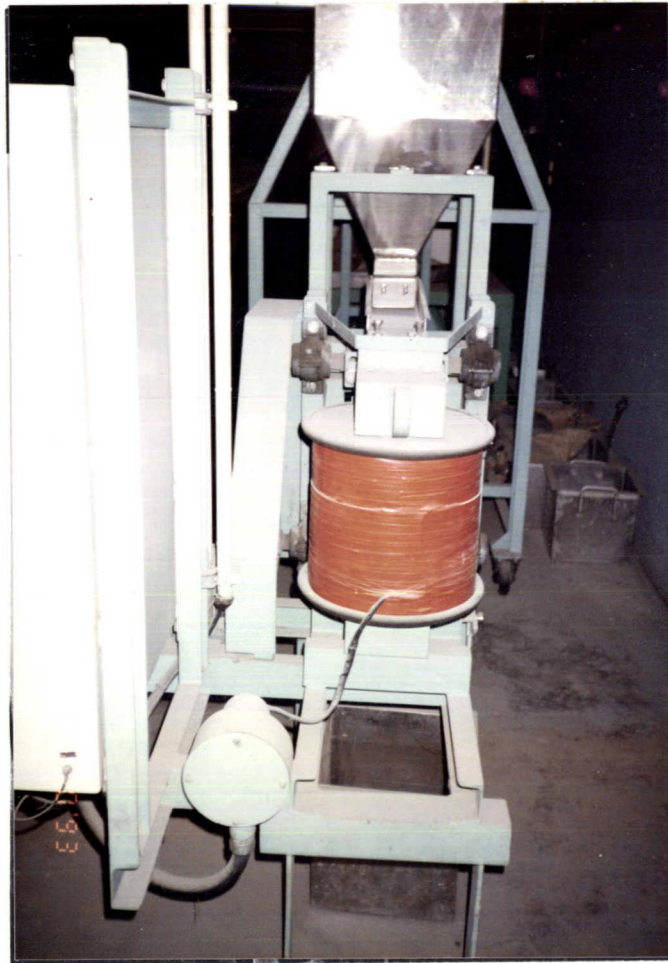
2.1.2.1 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับขับ Roller ให้หมุนช้า-เร็วตามความต้องการซึ่งจะสอดคล้องกับการป้อนวัสดุ ที่ต้องการมากกว่าต้องการน้อยกว่าต้องการความจุเล็กน้อยเพียงใด

2.1.2.2 ส่วนควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็ก

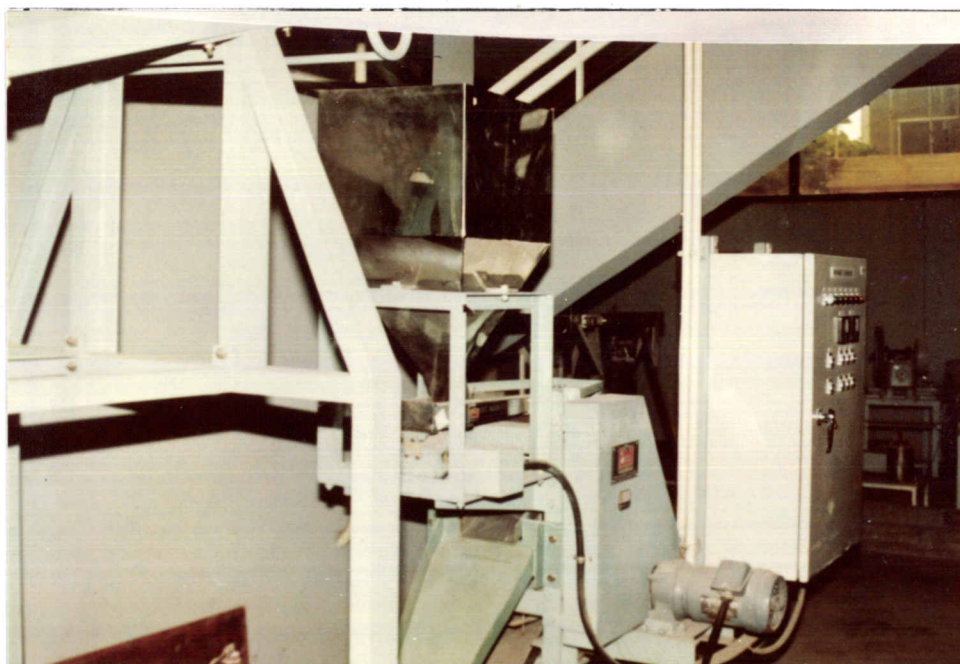
5.1 ส่วนโครงสร้าง

จากส่วนโครงสร้างนั้น ต้นแบบของเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ ของบริษัท ERIEZ MAGNETICS ซึ่งมีเครื่องดังกล่าวอยู่ที่ภาควิชาเหมืองแร่ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีราคาอยู่ในหลักล้านทีเดียว ดังรูปที่ 5.1 ,5.2 และ 5.3 แสดงเครื่องมือต้นแบบ หลังจากนั้นเมื่อเราตกลงจะสร้างเครื่องนี้ก็เก็บรายละเอียดของตัวเครื่อง โดยศึกษาในส่วนรายละเอียดของเครื่องแล้วนำมาเขียนรูปภาพโดยภาพร่างของตัวเครื่องนี้ ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ ของการทำงาน คือ

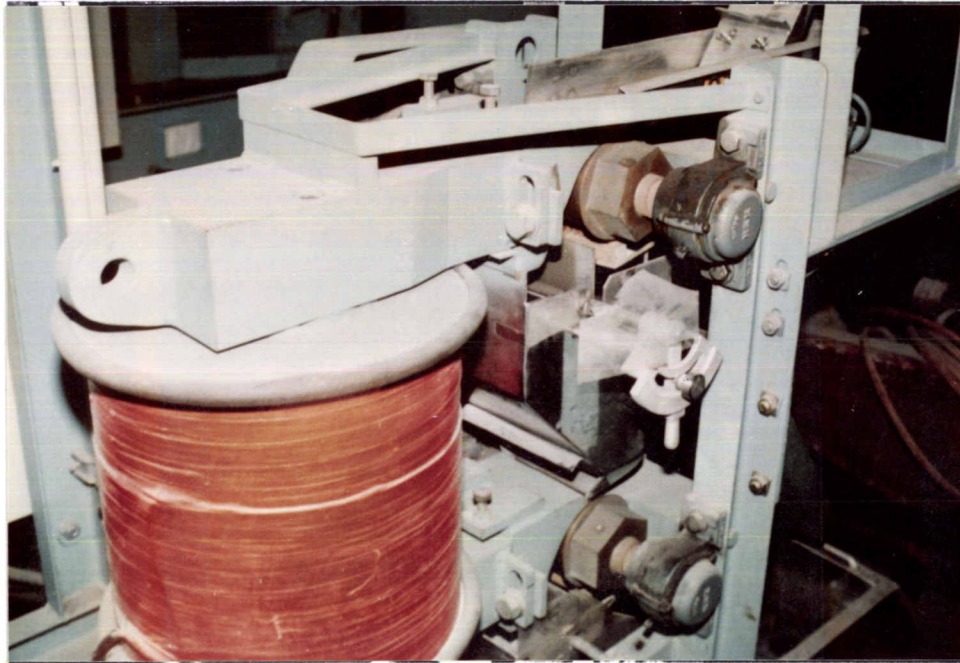
- 1) ชดลวด
- 2) ตู้ควบคุม
- 3) โครงเหล็ก
- 4) Roller
- 5) Feeder
- 6) Vibrator



รูปที่ 5.1 รูปแสดงเครื่องต้นแบบโดยรวม

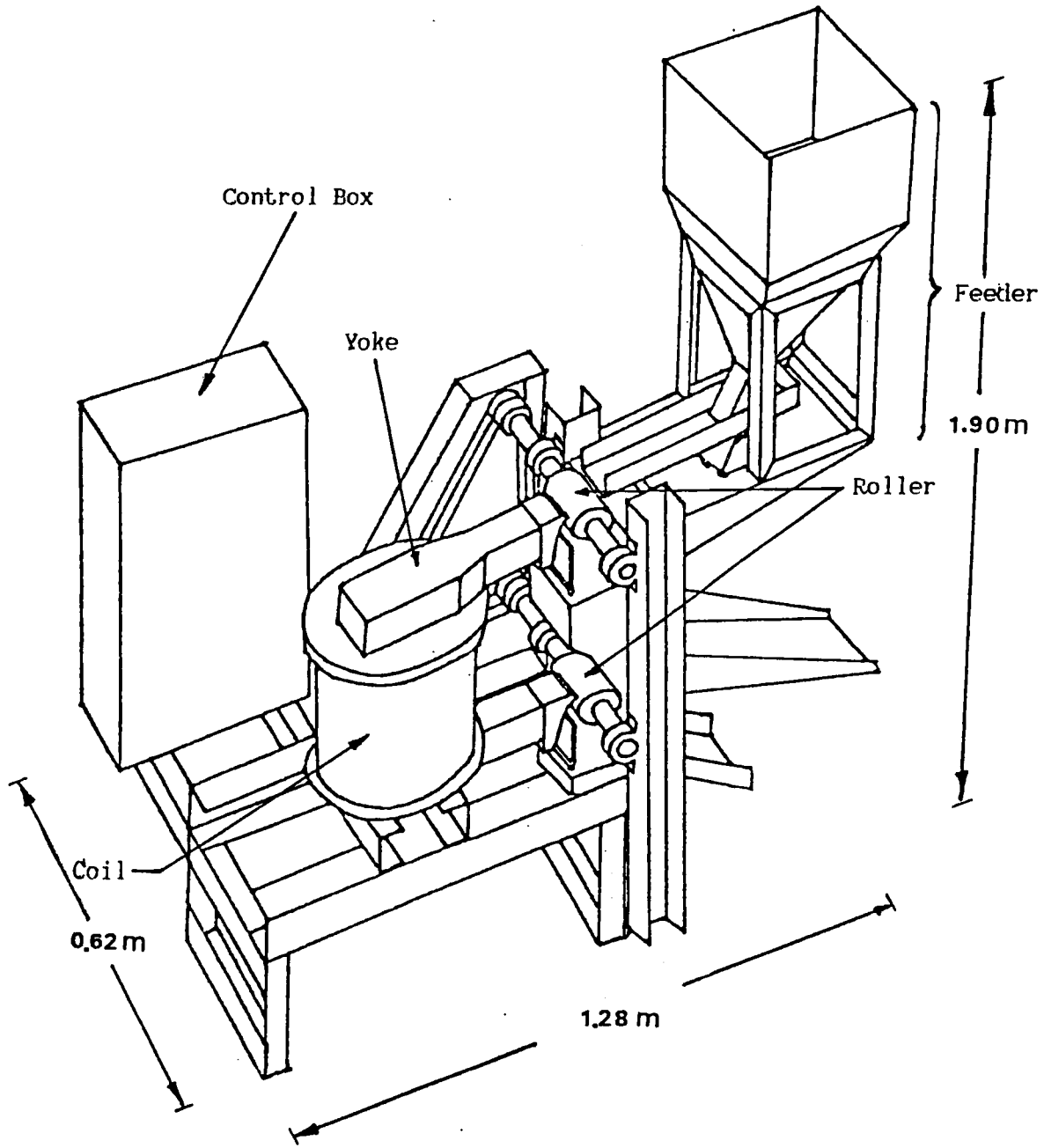


รูปที่ 5.2 รูปแสดงเครื่องต้นแบบอีกมุมมองหนึ่ง

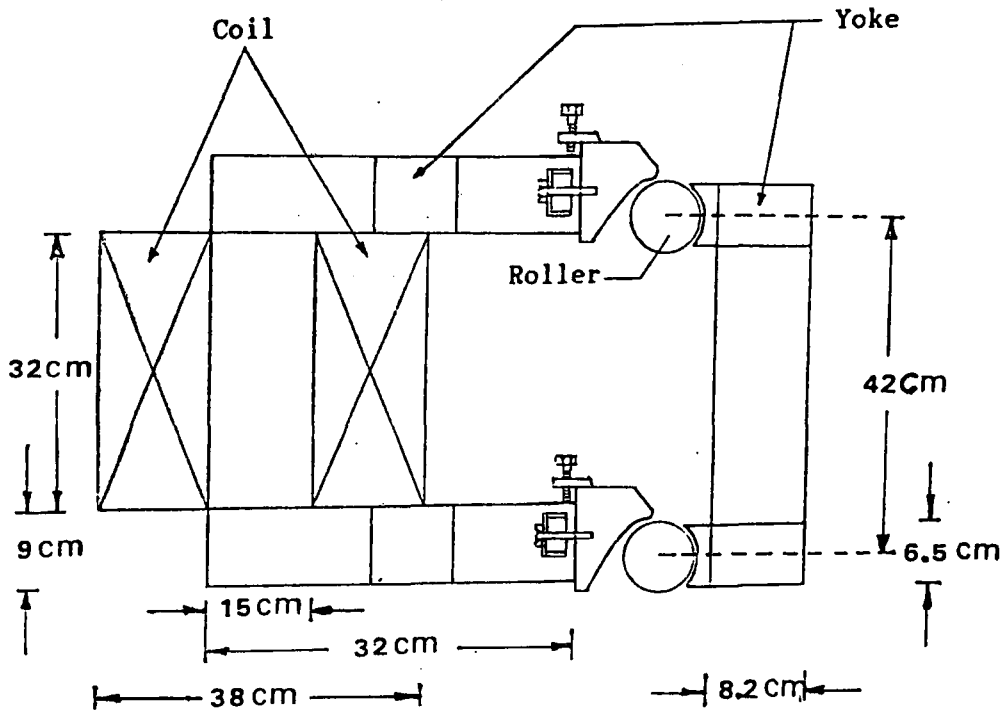


รูปที่ 5.3 แสดงบริเวณ Roller ทั้งสองของเครื่องต้นแบบ

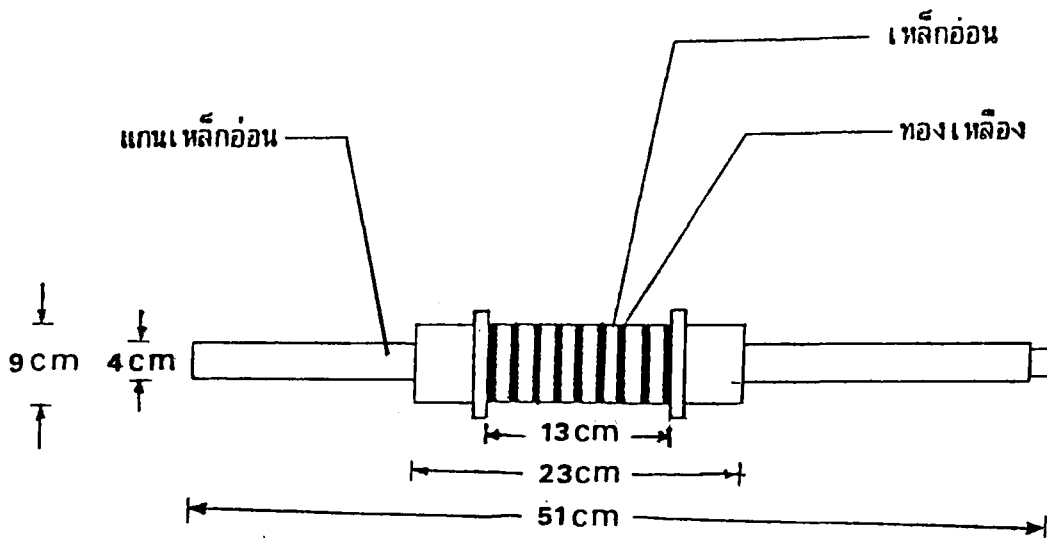
สำหรับขดลวดจะเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กได้เขียนภาพ แสดงตำแหน่งที่ตั้งและส่วนประกอบดังรูป 5.5 โดยความเป็นแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำจากขดลวดจะส่งไปยัง Yoke ไปยัง Roller ซึ่งเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ ซึ่งจะทำให้มีการรวมเส้นแรงแสนามแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี และทำให้ความเข้มของสนามบริเวณช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กกับ Roller มีค่าสูง



รูปที่ 5.4 ภาพสเก็ตของเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งซึ่งสเก็ตจากเครื่องต้นแบบ



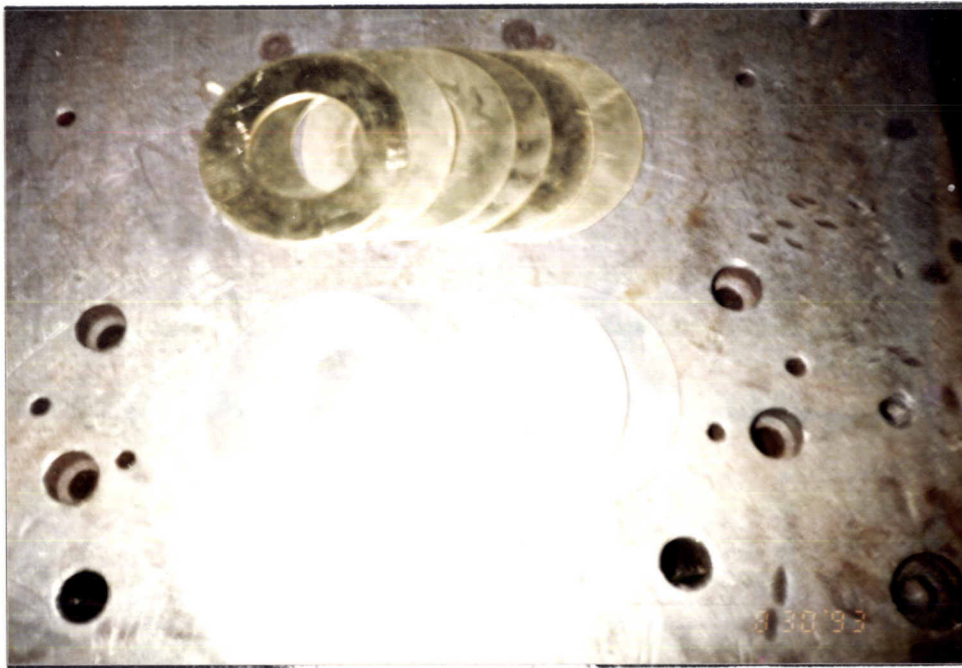
รูปที่ 5.5 ภาพแสดงวงจรมแม่เหล็กของเครื่องแยกแร่ที่จะสร้าง



ภาพแสดง Roller

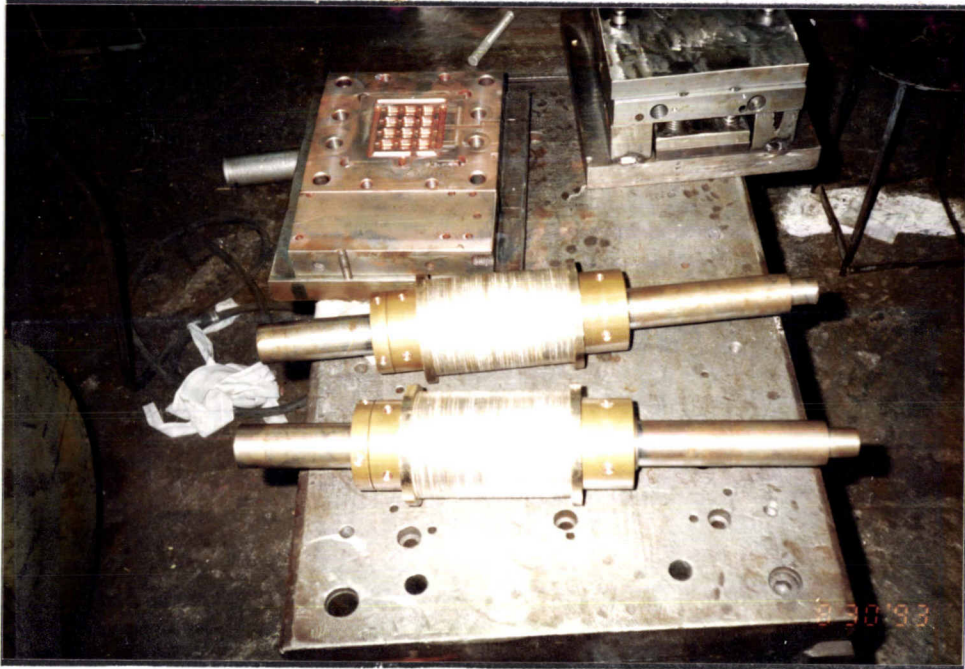
รูปที่ 5.6 ภาพแสดง Roller

หลังจากที่เขียนแบบเรียบร้อยแล้วก็จะพิจารณาหาวัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้ทำ Yoke และ Roller ได้ทำการคัดเลือกหาเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำ โดยก่อนที่จะนำเอาเหล็กที่จะเอาไปใช้ เราจะนำไปทดสอบหาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทดสอบจากเครื่องฮิสเทอริซิสมัล



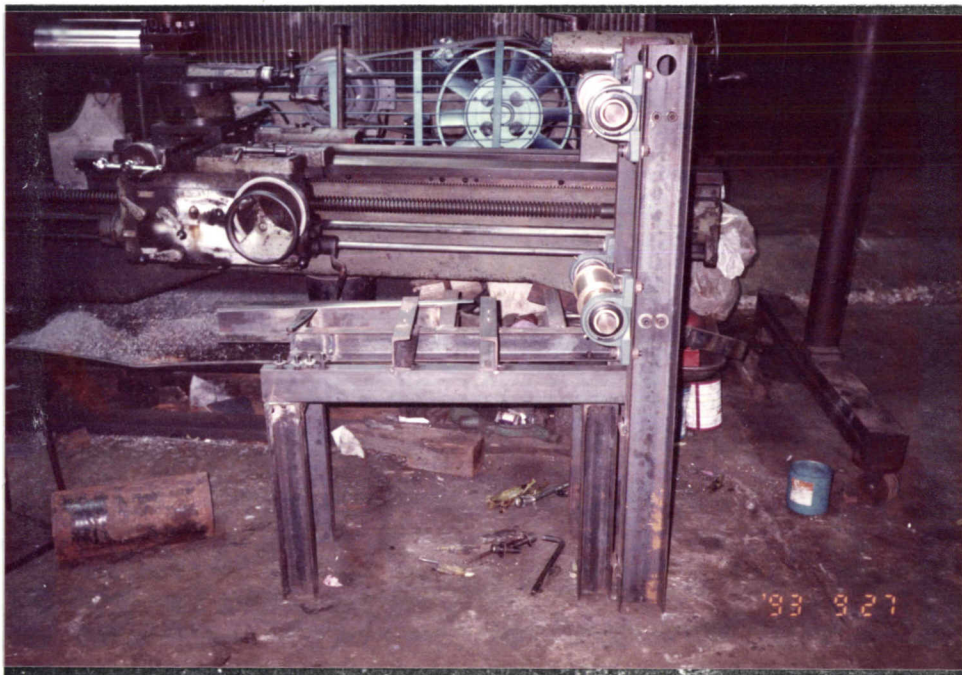
รูปที่ 5.7 แสดงแผ่นเหล็กและทองเหลืองที่ใช้ประกอบเป็น Roller

ในส่วนของโครงสร้างเราได้ออกแบบและเขียนแบบ เพื่อดำเนินการจัดสร้างโดยเริ่มจากส่วนของฐานเป็นอย่างแรก ส่วนที่ตามมาคือ การทำ Roller ซึ่งในส่วนนี้จะมีการนำโลหะ 2 ชนิด มาวางสลับกัน ดังภาพที่ 5.7 แสดงแผ่นโลหะ 2 ชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กต่างกัน คือ เหล็กอ่อนซึ่งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำจะมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โร ซึ่งจะมีอำนาจในการรวมเส้นแรงแม่เหล็กได้ดี ส่วนทองเหลืองซึ่งเป็นสารแม่เหล็กไดอามีคุณสมบัติผลักเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อนำมาประกอบสลับกันไปเป็น Roller จะเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มคล้ายลูกคลื่นบนตำแหน่งต่างๆ ของ Roller เมื่อแร่ตกลงไปกระทบยัง Roller แร่ส่วนที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กจะเกาะติด Roller ในส่วนที่เป็นเหล็กอ่อน และแร่ส่วนที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กก็จะไม่เกาะติดในแผ่นของโลหะ 2 ชนิด ความหนาของแผ่นทั้ง 2 ต่างกัน โดยความหนาของเหล็กอ่อนประมาณ 1.8 มิลลิเมตร ในขณะที่แผ่นทองเหลืองมีความหนา ประมาณ 0.9 มิลลิเมตร โดยมีแกนของ Roller เป็นเหล็กอ่อนเหมือนกัน นำเหล็กอ่อนและแผ่นทองเหลืองมาวางสลับกันจนเป็นรูปร่างดังรูป 5.6 และจัดสร้างขึ้นดังรูปที่ 5.8

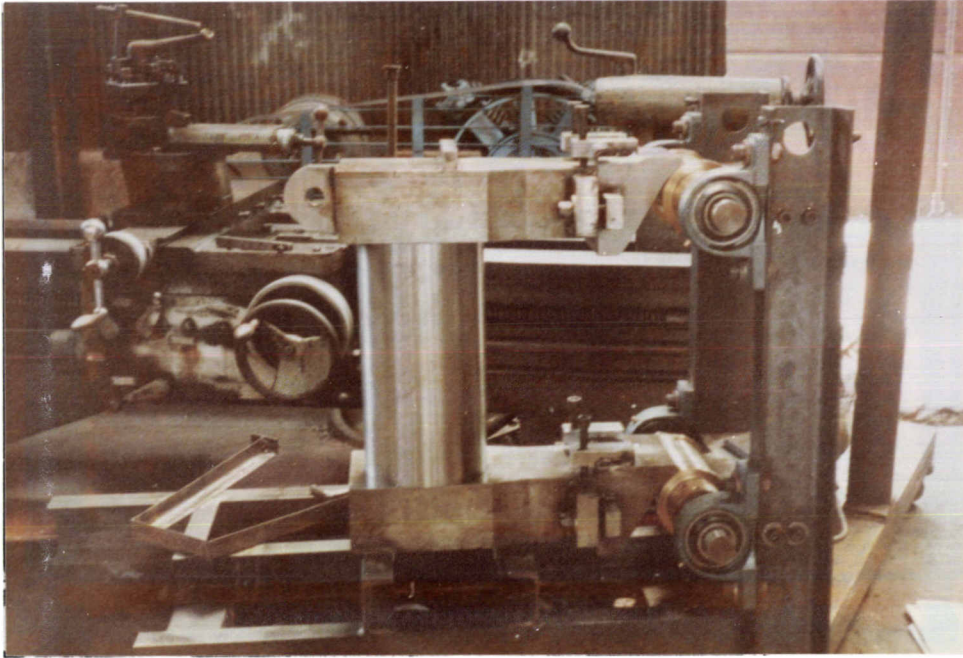


รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะ Roller ทั้ง 2 ลูก

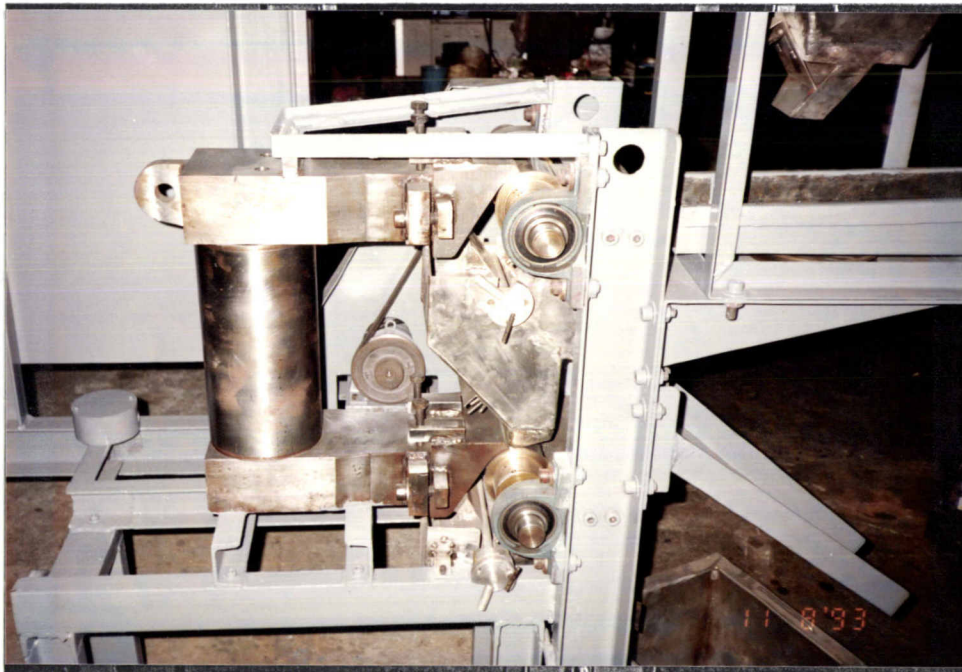
จากนั้นนำ Roller มาประกอบเข้ากับส่วนที่เป็นฐานดังรูปที่ 5.9 และนำ Yoke ที่ขึ้นรูปแล้วมาประกอบเข้าตัวเครื่องเพิ่มเติมดังรูปที่ 5.10 ส่วนต่อไปคือส่วนในการขับเคลื่อนตัว Roller ก็ใช้มอเตอร์ 3 เฟสและสายพาน ซึ่งนำมาติดตั้งดังรูปที่ 5.11 โดยมีการทำรางในการสั่นแร่เพื่อป้องกันให้กับ Roller และกล่องใส่แร่ด้วย



รูปที่ 5.9 แสดงการประกอบ Roller ลงบนส่วนฐานโครงสร้าง



รูปที่ 5.10 แสดงการประกอบ Yoke บนตัวเครื่อง

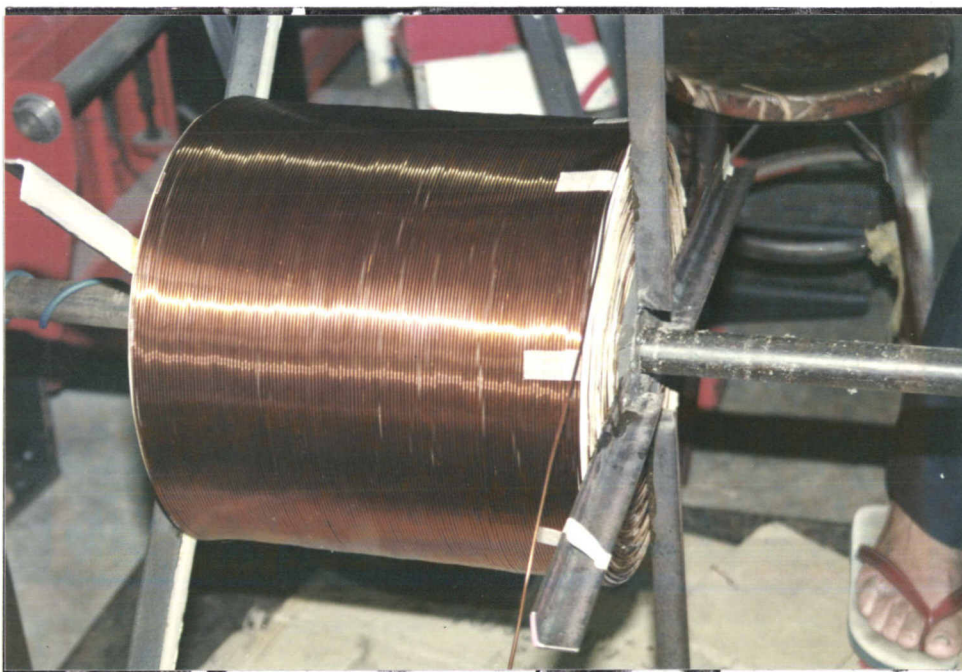


รูปที่ 5.11 แสดงการประกอบส่วนขับเคลื่อน Roller

ในขณะที่ทำส่วนโครงสร้างที่ทำงาน ก็จะทำการพันขดลวดในขณะเดียวกันโดยใช้
ลวดทองแดงเบอร์ 12 และต้องการความต้านทานรวมประมาณ 20 โอห์ม โดยเริ่มพันดังรูปที่
5.12 จนสำเร็จเรียบร้อยครบจำนวน 5842 รอบ ดังรูปที่ 5.13 แล้ว นำมาใช้งานดังรูปที่
5.14



รูปที่ 5.12 แสดงการพันขดลวด



รูปที่ 5.13 ขดลวดที่พันเสร็จแล้วความต้านทานประมาณ 20 โอห์ม



รูปที่ 5.14 ขดลวดเมื่อสำเร็จเรียบร้อยแล้ว

เมื่อได้ขดลวดที่ต้องการแล้ว ก็จะนำมาติดตั้งในตัวเครื่องเพื่อเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากที่เราย้ายกระแสให้กับขดลวดดังรูปที่ 5.15 โดยหลังจากนั้นก็มาจัดทำส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ ตัวสั่น (Vibrator) ซึ่งจะช่วยในการส่งแรงแบบลูกกลิ้ง โดยสำหรับเครื่องนี้เราใช้มอเตอร์ 3 เฟสในการทำตัวสั่น โดยใช้หลักของมอเตอร์หมุนลูกเบี้ยว ทำให้เกิดการสั่นขึ้น

จะเห็นว่าลักษณะการทำงานของเครื่องนี้จะใช้การเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีส่วนของวงจรการควบคุมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



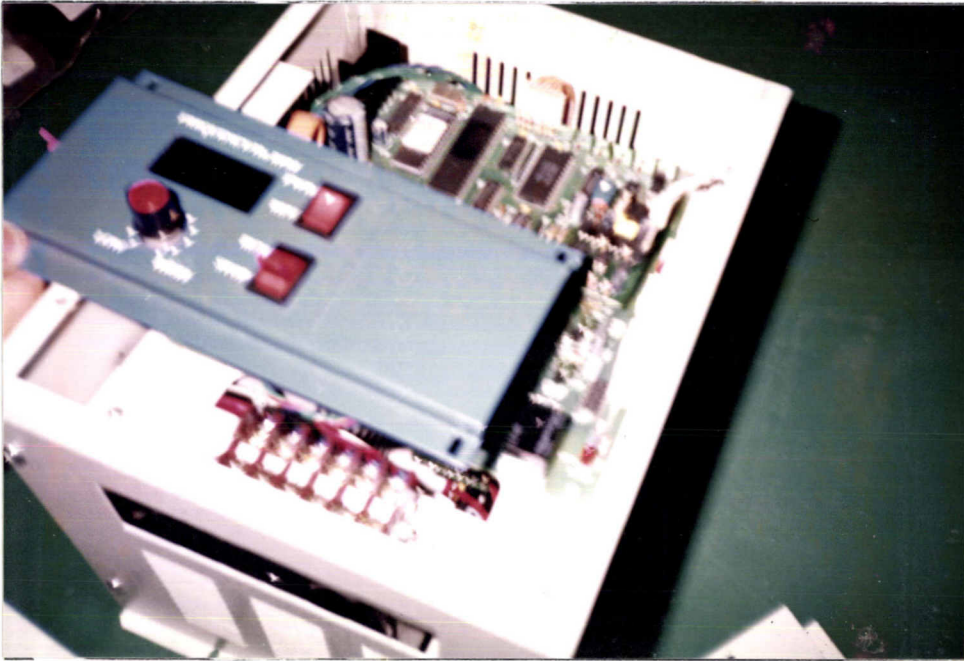
รูปที่ 5.15 แสดงการจัดวางขดลวดในตัวเครื่อง

5.2 ระบบควบคุม

หลังจากที่เราจัดสร้างส่วนของโครงสร้างสำเร็จแล้ว จากนั้นจึงมาศึกษาและติดตั้งวงจรมาเพื่อที่จะมาควบคุมการทำงาน โดยจะมีส่วนหลักๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

1) ส่วนชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ สำหรับขับเคลื่อน Roller

มอเตอร์ที่เรานำมาใช้งานเป็นมอเตอร์ 3 เฟสจึงต้องใช้ไฟ 3 เฟสในการทำงาน ความเร็วรอบของตัว Roller จะใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการควบคุมความเร็วรอบของ Roller ดังรูปที่ 5.16 ซึ่งมีคู่มือการใช้งานอยู่ในภาคผนวก ง. และติดตั้ง Sensor มาเพื่อตรวจวัดจำนวนรอบของ Roller ในการทำงานซึ่งแสดงผลด้วย LCD ดังรูปที่ 5.17



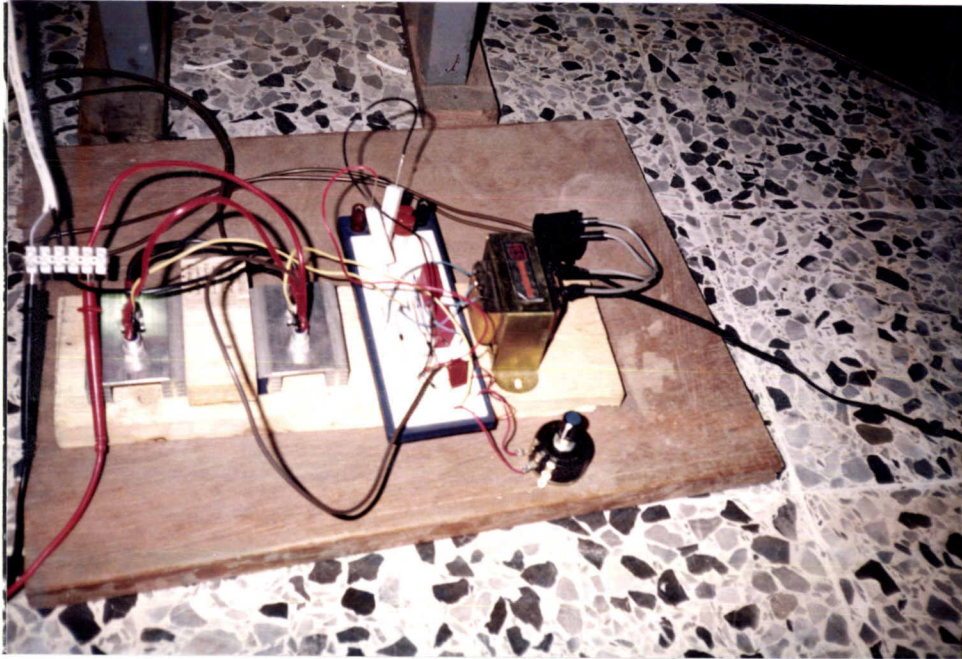
รูปที่ 5.16 แสดงชุด Inverter ปรับความเร็วของ Roller



รูปที่ 5.17 แสดงตัวตรวจจับเพื่อบอกจำนวนรอบของ Roller

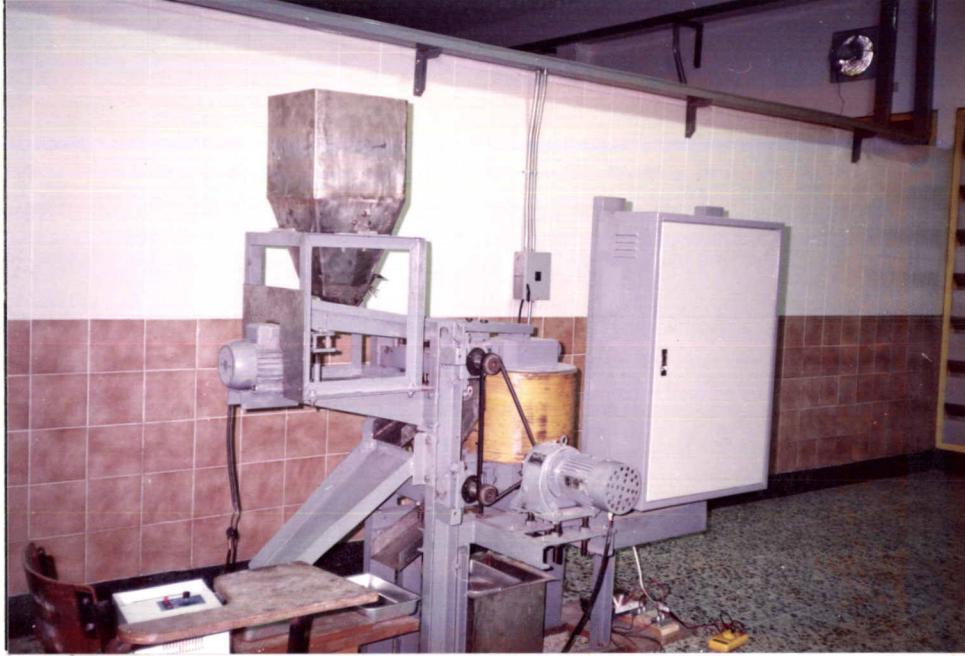
2) ส่วนควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากที่ทราบแล้วว่าแม่เหล็กที่ใช้เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ซึ่งเป็นกระแสตรงโดยจะมีวงจรควบคุมดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 วงจรจ่ายกระแสให้กับขดลวด

หลังจากนั้นก็นำวงจรทั้งหมดมาใช้ในการทำงาน โดยประกอบส่วนควบคุมแต่ละส่วนดังที่กล่าวไปแล้ว ให้เป็นเครื่องแยกแรงดันที่ดูกลิ้งเพื่อย่นำดังแสดงใน รูปที่ 5.19 และ 5.20 จากนั้นจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่อง ดังจะกล่าวในบทถัดไป



รูปที่ 5.19 แสดงตัวเครื่องด้านหน้า



รูปที่ 5.20 แสดงตัวเครื่องด้านข้าง

บทที่ 6

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในการสร้างเครื่องแยกแม่

ในการสร้างเครื่องแยกแม่ด้วยสนามแม่เหล็กให้มีประสิทธิภาพในการแยกสูงนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ คุณภาพของเหล็กที่ใช้ ในเครื่องแยกแม่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูงชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำก็เช่นกัน คุณภาพของเหล็กที่นำมาใช้ในการทำงานมีผลต่อผลของการแยกเป็นอย่างมาก นอกเหนือจากปัจจัยอย่างอื่น เช่น ช่องว่างระหว่าง gap ในการทำงาน หรือความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับเครื่องแยกแม่ชนิดนี้ เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในเหล็กเป็นส่วนที่สำคัญ เหล็กที่เหมาะสมที่จะใช้ในเครื่องแยกแม่ชนิดนี้ต้องเป็นเหล็กอ่อน และควรมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำๆ ควรจะต่ำกว่า 0.1% นอกเหนือจากนั้น เราควรทราบสนามแม่เหล็กที่ตกค้างที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการพิจารณา เพื่อที่จะสามารถเหนียวนำให้ได้สนามแม่เหล็กค่าสูงๆ รวมไปถึงในการใช้งาน เราต้องหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ควรนำมาจ่ายให้กับขดลวดที่เหมาะสม เพื่อเลือกจุดที่เหมาะสมในการทำงาน ซึ่งจะทำให้คุณภาพของเครื่องนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด

6.1 การทดสอบปริมาณคาร์บอนในเหล็ก

คุณภาพของเหล็กที่จะนำมาใช้เป็นส่วนของแกนให้สนามแม่เหล็กและโยคของเครื่องแยกแม่ จะต้องเป็นเหล็กอ่อนหรือมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำ ดังนั้นจึงได้นำเหล็กที่นำไปทดสอบหาปริมาณคาร์บอนจากเครื่อง Vacuum Emission Spectrometer (GMV-500) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการวิเคราะห์ได้ปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.032 % ในรายละเอียดในภาคผนวก ก.

6.2 การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของขั้วแม่เหล็ก (gap) กับ สนามแม่เหล็ก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาว่าระยะห่างของ gap ระหว่างแกน yoke กับ roller มีผลอย่างไรกับความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวด (coil)
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ให้กับขดลวด (I) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้น
3. เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องต้นแบบ กับเครื่องที่ทำการสร้างขึ้น

วิธีทดลอง

1. ปรับระยะห่างของ gap ระหว่างแกน yoke กับ roller ตามขนาดที่เราต้องการทดสอบ (2-10 mm.)
2. จ่ายกระแสให้กับขดลวด (coil) เพื่อให้กำเนิดสนามแม่เหล็ก
3. ใช้หัววัดฮอลล์ (hall probe) วัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยวัดที่ช่องว่างระหว่างแกน yoke กับ roller
4. เพิ่มกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดที่ละ 0.5 A บันทึกค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้
5. ทำการทดลองซ้ำกับข้อ 1 โดยเปลี่ยนระยะห่างของ gap ค่าใหม่แล้วทำตามขั้นตอนข้อ 2-4
6. นำข้อมูลที่ได้ในแต่ละ gap มาทำการเขียนกราฟ ระหว่างค่ากระแส I กับความเข้มสนามแม่เหล็ก B
7. เปรียบเทียบกราฟที่ได้ของเครื่องต้นแบบที่จุฬาฯกับเครื่องที่ทำการสร้างขึ้น

ผลการทดลอง

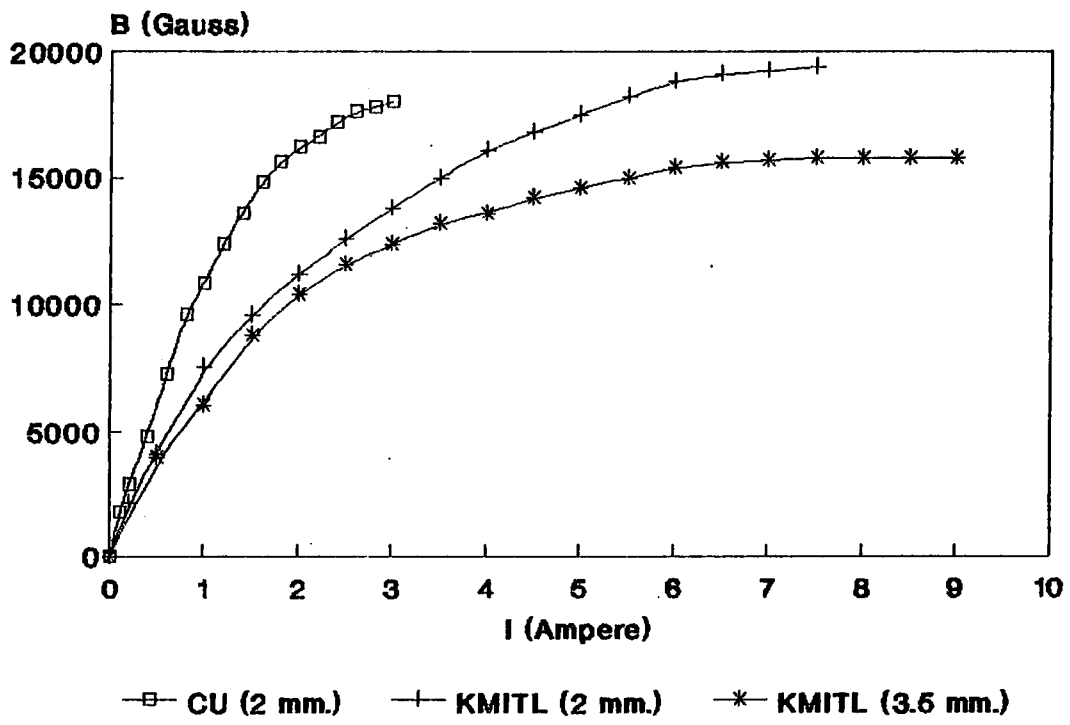
เครื่องต้นแบบ (จู่ฟ้า)

กระแส (A)	สนามแม่เหล็ก (G) ที่ระยะห่างของ gap = 2.0 mm.
0.1	1,800
0.2	2,900
0.4	4,800
0.6	7,200
0.8	9,600
1.0	10,800
1.2	12,400
1.4	13,600
1.6	14,800
1.8	15,600
2.0	16,000
2.2	16,500
2.4	17,200
2.6	17,600
2.8	17,800
3.0	18,000

เครื่องที่ได้พัฒนาขึ้น (ลาดกระบัง)

กระแส (A)	สนามแม่เหล็ก (G)	
	gap = 2.0 mm.	gap = 3.5 mm.
0.2	2,200	-
0.5	4,100	4,000
1.0	8,000	6,000
1.5	9,600	8,800
2.0	11,200	10,400
2.5	12,400	11,600
3.0	13,500	12,400
3.5	15,000	13,200
4.0	16,100	13,600
4.5	16,800	14,200
5.0	17,300	14,600
5.5	18,200	15,000
6.0	18,800	15,400
6.5	19,100	15,600
7.0	19,250	15,700
7.5	19,400	15,800
8.0	-	15,800
8.5	-	15,800

กราฟแสดงผลการทดลอง



อธิบายผลการทดลอง

1. เมื่อทำการเพิ่มกระแสที่จ่ายให้กับขดลวด (coil) เราพบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นจนเมื่อเพิ่มค่ากระแสถึงช่วงหนึ่ง ค่าสนามแม่เหล็กจะเริ่มคงที่ แสดงว่าค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะเริ่มอิ่มตัว

2. เมื่อเปรียบเทียบกราฟระหว่าง I กับ B ของเครื่องต้นแบบที่จุ่มฟ้า กับเครื่องที่ทำการสร้างขึ้นปรากฏว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B และ I ของเครื่องต้นแบบที่จุ่มฟ้า จะมีความชันมากกว่าเครื่องที่เราทำการสร้างขึ้น โดยที่เมื่อจ่ายกระแสค่าเท่ากันปรากฏว่าเครื่องที่จุ่มฟ้าจะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่า แสดงว่าเครื่องต้นแบบที่จุ่มฟ้าจะมีประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำของเหล็กได้ดีกว่า เมื่อเราต้องการค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง เครื่องที่จุ่มฟ้าจะใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องที่เราทำการสร้าง นี้หมายถึงคุณภาพเหล็กของเครื่องแยกแรงแจกร์เครื่องต้นแบบที่จุ่มฟ้า มีสภาพเป็นเหล็กอ่อนสูงกว่าเครื่องแยกแรงแจกร์ที่ผลิตมาขึ้น

6.3 การทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กด้วยวิธี ดี.ซี. ฮิสเทอรีซิส

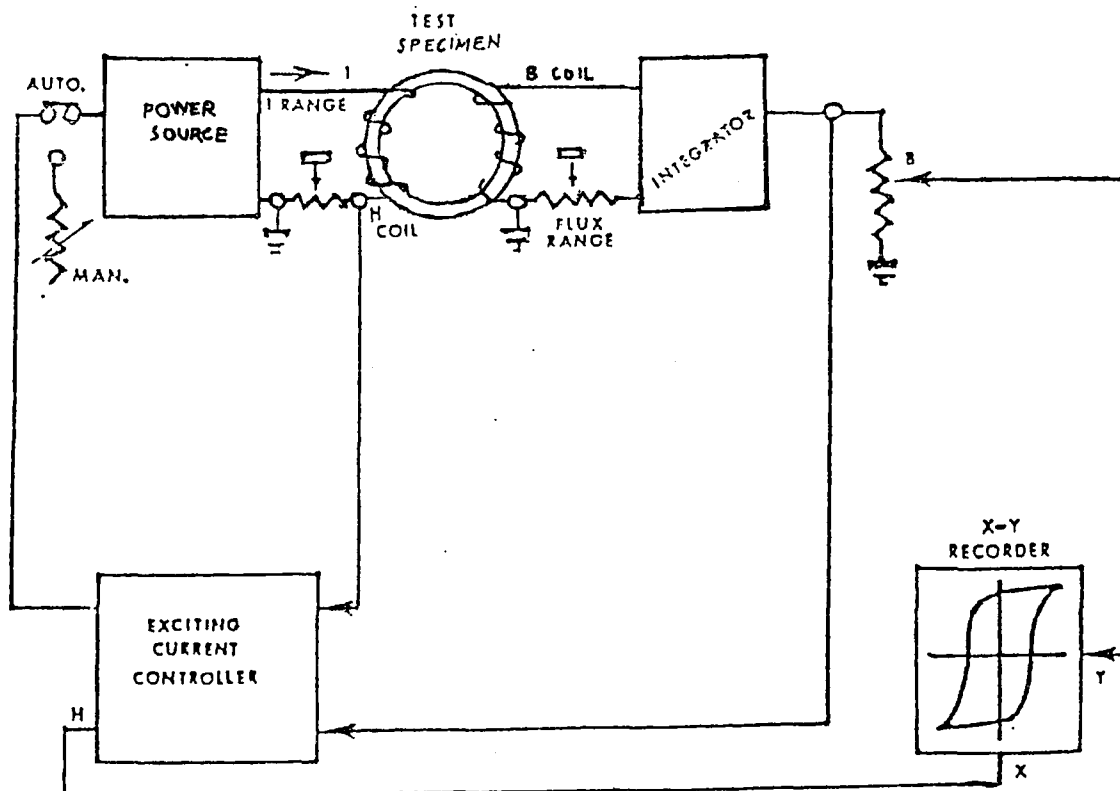
วัตถุประสงค์

- เพื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตกค้าง และค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอิ่มตัวของเหล็กอ่อนที่นำมาสร้างลูกกลิ้งเหนี่ยวนำและ โยค

วิธีการทดลอง

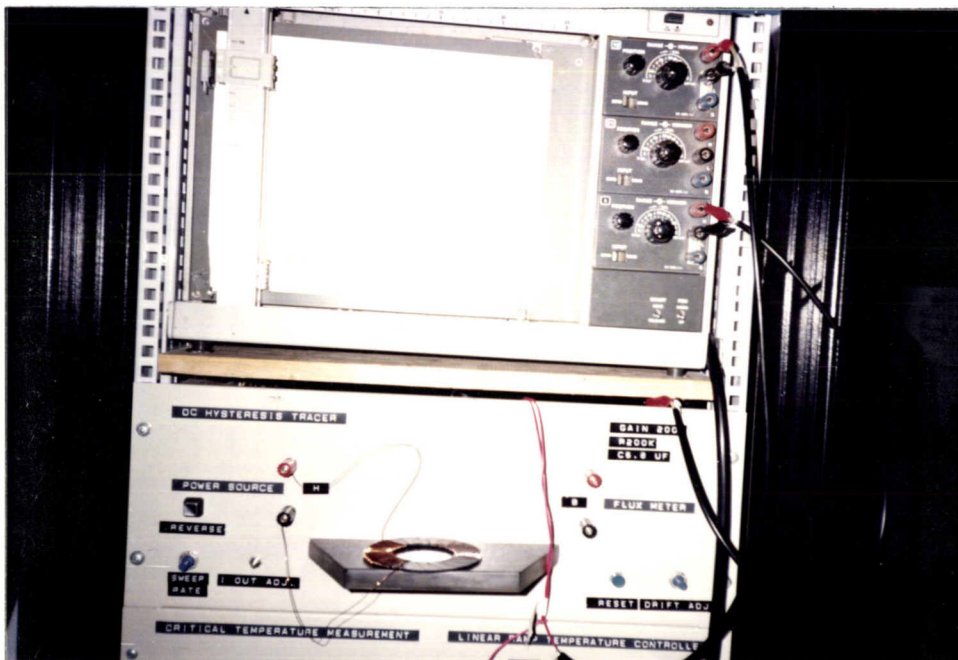
1. นำสารตัวอย่างซึ่งเป็นเหล็กอ่อนที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นวงแหวนมาพันด้วยลวดทองแดง 2 ชุด คือ ชุดลวดปฐมภูมิ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชุดลวดกระตุ้น (exciting coil) ทำให้เกิดสนามทำแม่เหล็ก และชุดลวดทุติยภูมิ ซึ่งทำหน้าที่เป็นชุดลวดค้นหา (searching coil) ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายในสารตัวอย่าง แผนผังชุดทดสอบมาตรฐานฮิสเทอรีซิสดังรูปที่

6.1

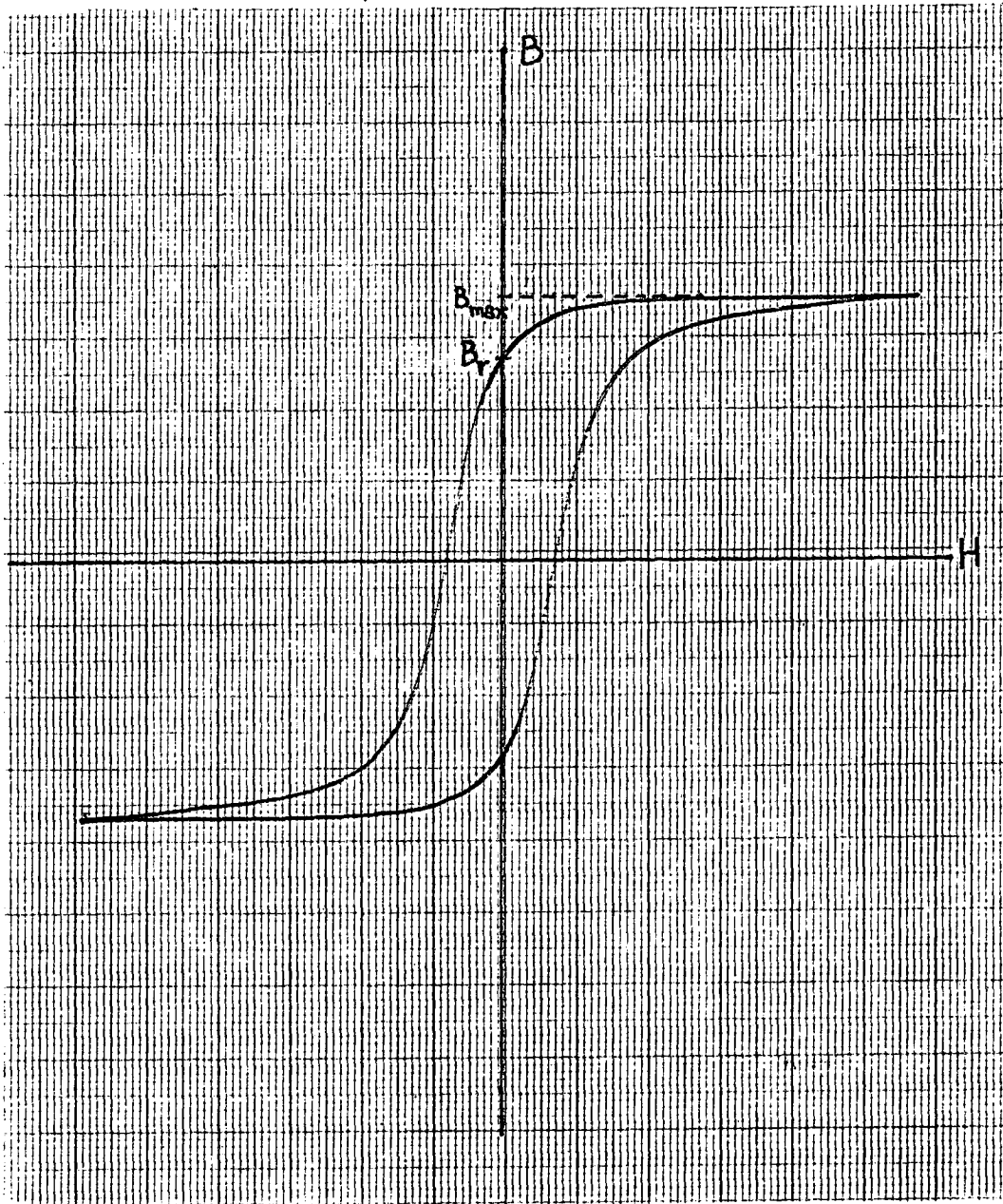


รูปที่ 6.1 แสดงเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กด้วยวิธี ดี.ซี. ฮิสเทอรีซิส

2. นำสารตัวอย่างมาประกอบกับเครื่องทดสอบดังรูป 6.2
3. เปิด power ของเครื่องจ่ายกระแสและ XY-Recorder
4. ปรับ drift ของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากอินทิเกรเตอร์ โดย
 - ปรับกระแสของเครื่องจ่ายกระแสให้เป็นศูนย์
 - กดปุ่ม reset เพื่อคายประจุตัวเก็บประจุที่ใช้ในการอินทิเกรต
 - ปรับสเกลทางแกน Y ของ XY-Recorder ให้เล็กที่สุด ถ้ามีการ drift ของสัญญาณ จะสังเกตเห็นปากกาของ XY Recorder เลื่อนขึ้นหรือลง
 - ปรับ drift adjust ให้ปากกาอยู่นิ่ง
5. จ่ายกระแสให้กับขดลวดปฐมภูมิโดย sweep ขึ้นลงแบบเชิงเส้นซึ่งมีคาบเวลาของการ sweep อยู่ในช่วง 10-120 วินาที
6. ปรับสเกลทางแกน X และ Y ของ XY-Recorder ให้เหมาะสมจนเห็นรูปกราฟที่พอเหมาะ
7. ถ้านวลค่าสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวนำตกต่างจากกราฟ ดังรูปที่ 6.3



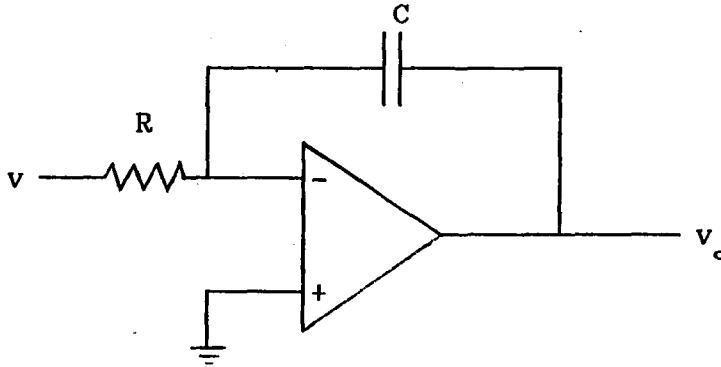
รูปที่ 6.2 แสดงเครื่องวัดฮิสเทอรีซิสของเหล็กที่ใช้



รูปที่ 6.3 กราฟฮิสเทอรีซิสของเหล็กที่นำมาทดสอบ

การคำนวณหาค่า B และ H

จากการทดลอง พารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบคือ ค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตกค้าง (B_r) ซึ่งสามารถหาได้จากสัญญาณทางแกน Y ได้แก่สัญญาณจากอินทิเกรเตอร์



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์

จะได้
$$v_o = -(1/RC) \int v dt \quad (6.1)$$

จากกฎของฟาราเดย์ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดเมื่อเคลื่อนผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นอินทิกรัลของอินทิเกรเตอร์ มีค่าเท่ากับ

$$v = (-N \frac{d\phi}{dt}) \times 10^{-8} \quad (6.2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดค้นหา

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ BA โดย B คือ สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนขดลวด

จะได้
$$v = (-N A dB/dt) \times 10^{-8}$$

$$v dt = -N A dB \times 10^{-8}$$

แทน $v dt$ ใน (5.1) จะได้

$$v_o = (N A B/RC) \times 10^{-8}$$

$$B = (v_o RC/N A G_y) \times 10^8 \text{ Gauss} \quad (6.3)$$

เมื่อ G_y คือ อัตราขยายของอินทิเกรเตอร์

จากการทดลอง ได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$R = 200 \text{ k}\Omega, C = 6.8 \text{ }\mu\text{F}, G_y = 200$$

$$A = 0.36 \text{ cm}^2, N_B = 30 \text{ รอบ}$$

และจากกราฟอ่านค่า v_o ที่จุดตัดแกน Y ได้เท่ากับ 0.135 โวลต์

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} B_r &= (0.135)(200 \times 10^3)(6.8 \times 10^{-6})(10^8)/(30)(0.36)(200) \\ &= 8,500 \text{ Gauss} \end{aligned}$$

นั่นคือ สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตกค้างของเหล็กอ่อนที่ให้มีค่าเท่ากับ 8,500 Gauss

ส่วนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอิมพัลส์ อ่านค่า v_o ได้เท่ากับ 0.1825 โวลต์

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } B_{\text{max}} &= (0.1825)(200 \times 10^3)(6.8 \times 10^{-6})(10^8)/(30)(0.36)(200) \\ &= 1,1490 \text{ Gauss} \end{aligned}$$

นั่นคือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอิมพัลส์ของเหล็กอ่อนที่ให้มีค่าประมาณ 1,1490 Gauss

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเหล็กอ่อนที่ไร้คุณภาพไม่คืนกลับ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำตกค้างภายในค่อนข้างสูง

บทที่ 7

การทดสอบการทำงานและสรุปผล

หลังจากการประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันจนเป็นเครื่องแยกแร่ชนิดลูกกลิ้งเหนียวนำ และทดสอบวัสดุต่างๆ ที่ใช้ประกอบแล้ว ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงจำเป็นจะต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานได้จริง สำหรับคุณภาพของการแยกแร่ของเครื่องที่พัฒนาขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบ โดยพยายามควบคุมวัสดุที่จะนำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการแยกให้มึลักษณะเหมือนเดิม โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดการทดสอบได้ดังนี้

7.1 การทดสอบการทำงาน

ในการทดสอบความสามารถของเครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงแบบลูกกลิ้งเหนียวนำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

จุดประสงค์การทดสอบ

1. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องแยกแร่ที่ได้สร้างขึ้นกับเครื่องต้นแบบ
2. เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้น เมื่อเดินเครื่องเต็มที่ และหาจุดบกพร่องของเครื่องแล้วทำการแก้ไข
3. เพื่อต้องการทราบผลการเก็บแร่ที่ได้ทั้งหมดและต้องการทราบคุณภาพความสะอาดของแร่ที่ทำการแยก
4. เพื่อต้องการทราบผลของกระแสที่ใช้ในการขับเคลื่อนของเครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้น
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะทำงาน
6. เพื่อศึกษาวิธีการในการตรวจสอบความสามารถของการแยกแร่ เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่อง

วิธีการทดสอบ

ได้ทำการทดสอบความสามารถในการดักจับสารแม่เหล็กจากแร่ ซึ่งเตรียมมาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแร่อิลเมไนต์ที่ใช้ทดสอบมีส่วนประกอบของ อิลเมไนต์ (Ilmenite) การ์เน็ต (Garnet) และทราย (SiO_2) และจากการศึกษาองค์ประกอบย่อยทั้ง 3 นี้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กดังนี้

- แบบที่ 1 เป็นสารไม่ติดแม่เหล็ก (Non-magnetic material) คือ ทราาย
- แบบที่ 2 เป็นสารที่มีความเป็นแม่เหล็กพารา ซึ่งตอบสนองกับสนามแม่เหล็กอย่างอ่อน คือ การ์เน็ต
- แบบที่ 3 เป็นสารที่มีความเป็นแม่เหล็กเฟอร์โร ซึ่งตอบสนองกับสนามแม่เหล็กอย่างแรง คือ อิลเมไนต์

ในการทดสอบเครื่องแยกแร่ที่ได้สร้างขึ้น ได้กำหนดวัสดุเริ่มต้นเป็นสารแร่ชนิดเดียวกัน และทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน ส่วนหนึ่งนำไปทดสอบกับเครื่องต้นแบบที่จุฬาฯ และอีกส่วนหนึ่งนำมาทดสอบกับเครื่องแยกแร่ที่พัฒนาขึ้น ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ในการทดสอบทั้งสองเครื่องพยายามควบคุมแปรทั้งหลายให้มีลักษณะเหมือนๆ กัน

ส่วนตัวแปรที่สนใจทำการศึกษาได้แก่สารทั้ง 3 ชนิด โดยคำนึงถึงการเก็บแร่ได้ทั้งหมด และประสิทธิภาพของเครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้น

เพื่อที่จะเห็นผลของประสิทธิภาพของเครื่องแยกแร่ที่ชัดเจน การทดลองนี้จะทำเปรียบเทียบกันระหว่าง เครื่องแยกแร่ที่

- 1) ภาควิชาเหมืองแร่ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ธรณีวิทยาศาสตร์ ลาดกระบัง

ขั้นที่ 1 นำแร่ที่ละเอียดอย่างเรียบร้อยแล้วมา 8 กิโลกรัม

ขั้นที่ 2 แบ่งแร่จากข้อ 1 เป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน คือ ส่วนละ 4 กิโลกรัม โดย

ส่วนที่ 1 นำมาทดสอบที่จุฬา

ส่วนที่ 2 นำมาทดสอบที่ ลาดกระบัง

ขั้นที่ 3 แร่ 4 กิโลกรัมจากการแบ่งข้อ 2 สำหรับเครื่องที่จุฬาทำดังนี้

แบ่งแร่ออกเป็น 2 ส่วนๆ ละ 2 กิโลกรัม โดย

ครั้งที่ 1 ทดสอบที่ช่องว่างระหว่าง gap เท่ากับ 3.5 mm.

ครั้งที่ 2 ทดสอบที่ช่องว่างระหว่าง gap เท่ากับ 2.0 mm.

โดยใช้ สนามแม่เหล็ก เท่ากับ 18,000 Gauss

แรงดัน เท่ากับ 113 โวลต์

กระแส เท่ากับ 2.95 แอมแปร์

จำนวนรอบการหมุนของ Roller เท่ากับ 88 รอบต่อนาที

ขั้นที่ 4 แร่ 4 กิโลกรัมที่เหลือนำมาทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้นโดยทำดังนี้

1) แบ่งแร่ออกเป็น 2 ส่วนๆ ละ 2 กิโลกรัม โดย

ครั้งที่ 1 ทดสอบที่จำนวนรอบการหมุนของ Roller เท่ากับ 113 รอบต่อนาที

ครั้งที่ 2 ทดสอบที่จำนวนรอบการหมุนของ Roller เท่ากับ 100 รอบต่อนาที

ช่องว่างระหว่าง gap	เท่ากับ	2.0 mm.
สนามแม่เหล็ก	เท่ากับ	19,000 Gauss
แรงดัน	เท่ากับ	180 โวลต์
กระแส	เท่ากับ	7.5 แอมแปร์

2) หลังจากทำการแยกจากครั้งที่ 1 แล้วนำร่วรวมกันใหม่เพื่อแยกที่จำนวนรอบการหมุนของ Roller ใหม่

ครั้งที่ 3 ทดสอบที่จำนวนรอบการหมุนของ Roller เท่ากับ 88 รอบต่อนาที โดยมีค่าการทำงานต่างๆ เท่ากับครั้งที่ 1 และ 2

ครั้งที่ 4 ทดสอบที่จำนวนรอบการหมุนของ Roller เท่ากับ 70 รอบต่อนาที โดยมีค่าการทำงานต่างๆ เท่ากับครั้งที่ 1 และ 2

หมายเหตุ 1-MAG-1 หมายถึง สารที่เป็นแม่เหล็กจากทดลองแยกครั้งที่ 1 จากลูกกลิ้งตัวบน
1-MAG-2 หมายถึง สารที่เป็นแม่เหล็กจากทดลองแยกครั้งที่ 1 จากลูกกลิ้งตัวล่าง
1-NON หมายถึง สารที่ไม่เป็นแม่เหล็กจากการทดลองแยกครั้งที่ 1

4-MAG-1 หมายถึง สารที่เป็นแม่เหล็กจากทดลองแยกครั้งที่ 4 จากลูกกลิ้งตัวบน
4-MAG-2 หมายถึง สารที่เป็นแม่เหล็กจากทดลองแยกครั้งที่ 4 จากลูกกลิ้งตัวล่าง
4-NON หมายถึง สารที่ไม่เป็นแม่เหล็กจากการทดลองแยกครั้งที่ 4

ขั้นที่ 5 หลังจากการแยกแต่ละครั้งจะบันทึกน้ำหนักที่แยกได้ในแต่ละส่วนทั้ง 3 ส่วนคือ

- 1) MAG-1 สารที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่ได้จากลูกกลิ้งตัวบน
- 2) MAG-2 สารที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่ได้จากลูกกลิ้งตัวล่าง
- 3) NON สารที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

สารที่ได้หลังจากการแยกด้วยเครื่องแยกแร่แล้วจะได้ร่วออกมาเป็น MAG-1, MAG-2 และ NON-MAG ซึ่งออกมาจากลูกกลิ้งตัวบน ตัวล่าง และสารที่ไม่เป็นแม่เหล็กตามลำดับได้แสดงดังรูปที่ 7.1

ขั้นที่ 6 นำสารที่แยกได้ในแต่ละส่วนมาทำการนับจำนวนเม็ดต่อ 100 เม็ด โดยนับดูผ่านกล้องจุลทรรศน์ พิจารณาว่าใน 100 เม็ดมีสารแต่ละอย่างกี่เม็ด การนับสารผ่านกล้องจุลทรรศน์สามารถคัดเล็สารได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 7.2 แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพจากการหาค่า recovery และ grade

โดยหาจาก

$$\text{recovery} = \frac{\text{สารแม่เหล็กที่พบใน MAG}}{\text{สารแม่เหล็กที่พบในวัสดุที่ป้อนเข้าเครื่อง}}$$

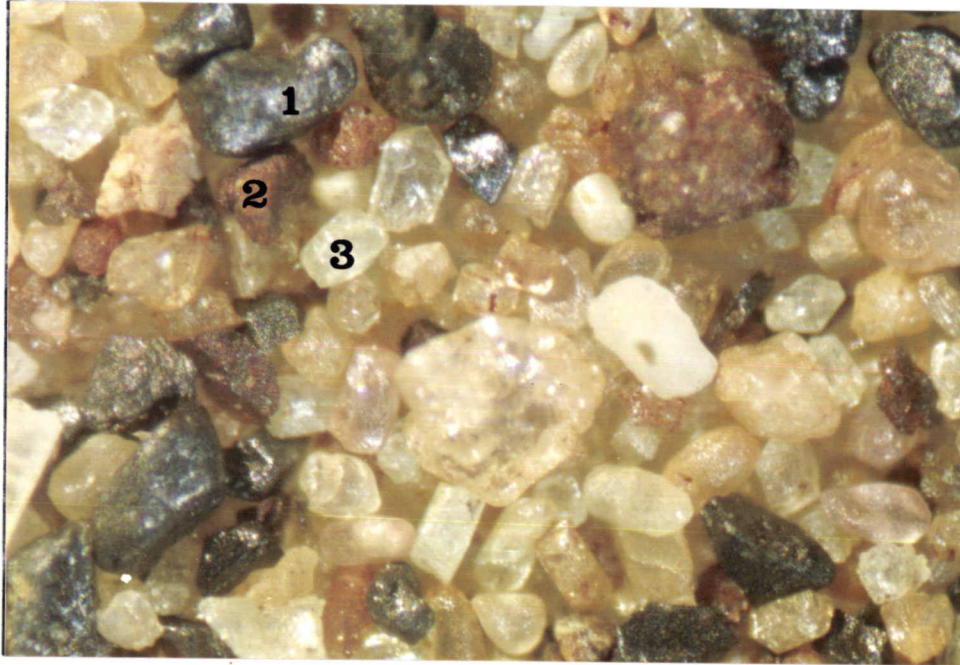
$$\text{grade} = \frac{\text{สารแม่เหล็กที่พบใน MAG}}{\text{ปริมาณ MAG ทั้งหมด}}$$



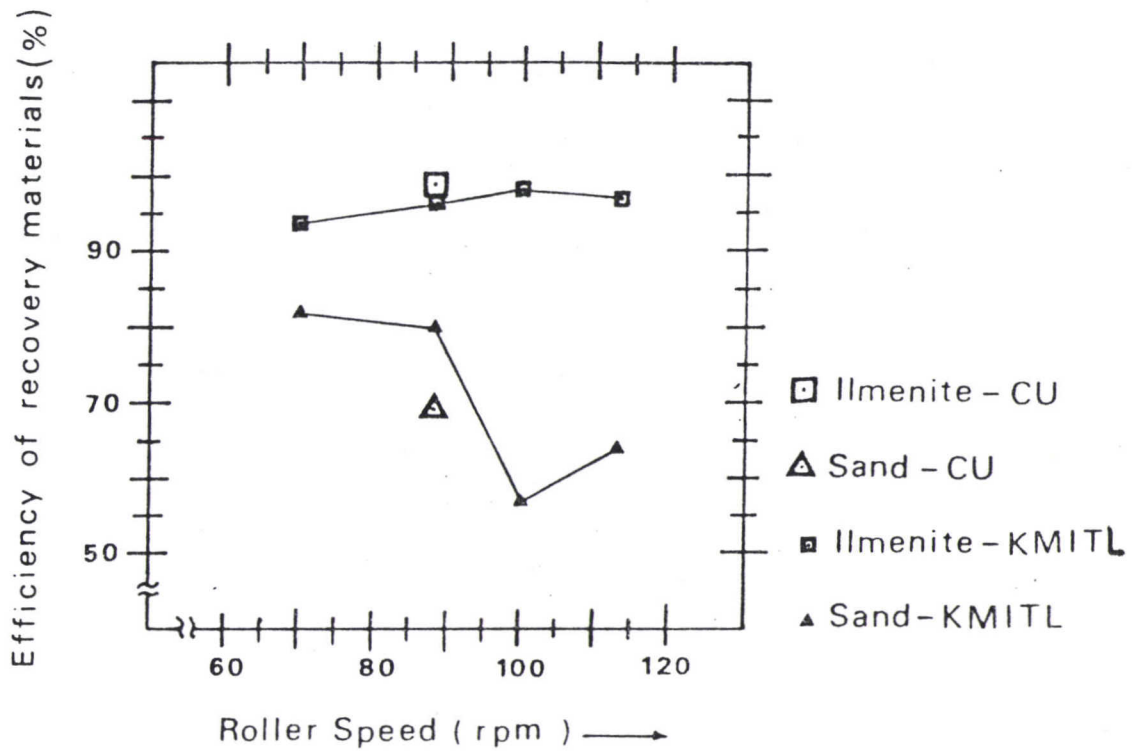
รูปที่ 7.1 แสดงแร่ที่ได้หลังจากการแยก

สรุปผลการทดลอง

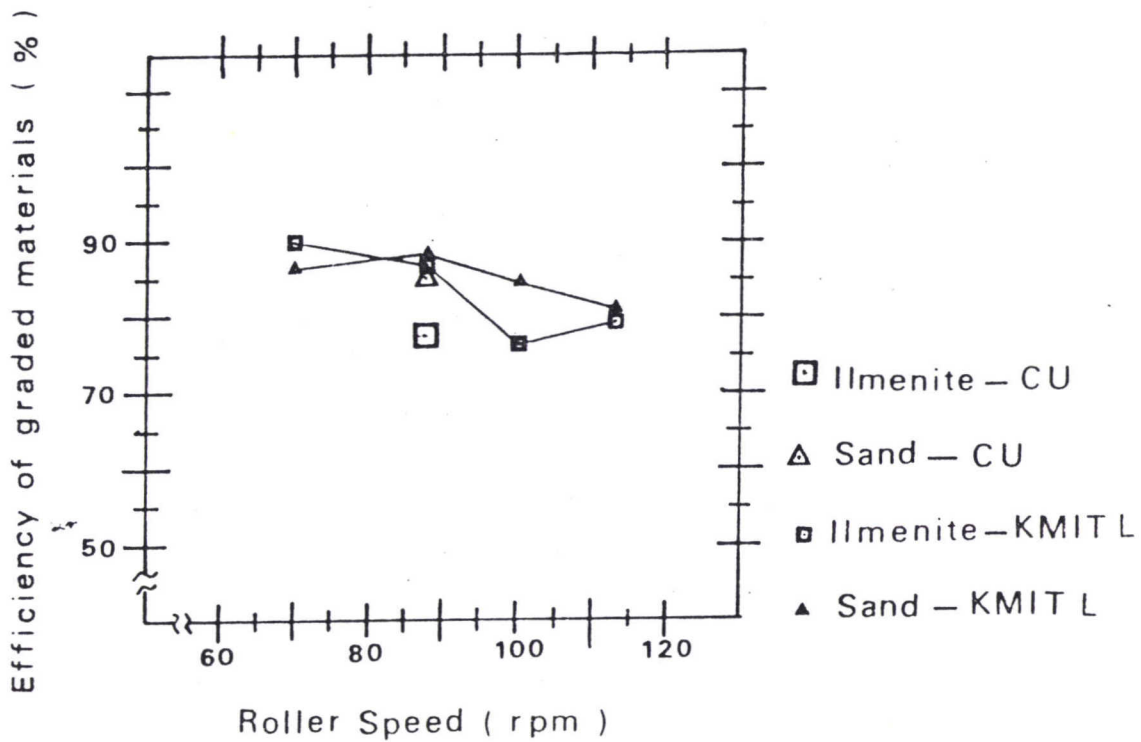
จากการทดลอง จะได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบและเครื่องที่พัฒนาขึ้นเพื่อพิจารณา ค่า recovery และ grade ได้สรุปดังกราฟที่ 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบของ Roller สูงกว่า 88 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพของการแยกจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบที่ความเร็วรอบ 88 รอบต่อนาที และระยะช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กและ Roller เท่ากับ 2.00 มม. พบว่าประสิทธิภาพของการแยกในการ recovery และ grade เครื่องที่พัฒนาขึ้นสูงกว่าเครื่องต้นแบบเล็กน้อย ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะเครื่องพัฒนาขึ้นมีสนามแม่เหล็กสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนข้อด้อยของเครื่องที่พัฒนาขึ้นคือ ต้องจ่ายกระแสที่สูงกว่าที่จะได้ค่าสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับเครื่องต้นแบบ เนื่องจากคุณภาพเหล็กที่ต่างกัน ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างและราคาของเครื่องต้นแบบต่างกันมาก เพราะจุดประสงค์ของการสร้างเครื่องนี้ข้อหนึ่ง คือ ต้องการใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศ และเรียนรู้เทคโนโลยีการสร้างซึ่งบรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ



รูปที่ 7.2 แสดงแร่แต่ละชนิด
1) อิลเมไนต์ 2) การ์เนต 3) ททราย



รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกชนิด recovery materials ที่ความเร็วรอบของ Roller ต่างๆ



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกของ graded materials ที่ความเร็วรอบของ Roller ต่างๆ

7.2 สรุปและวิจารณ์

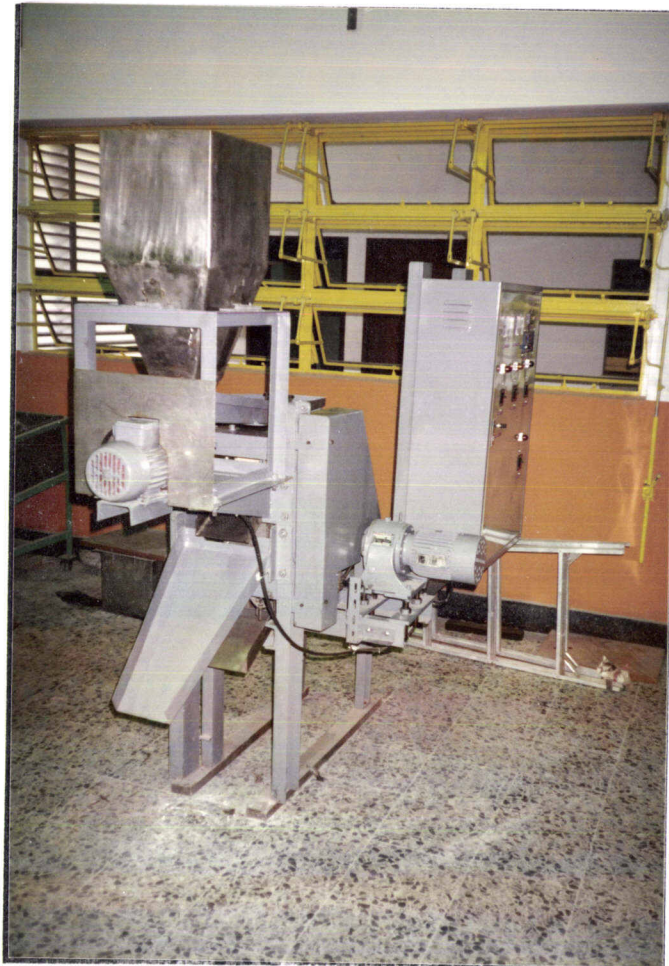
ขั้นตอนของงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาเครื่องต้นแบบที่ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขั้นที่ 2 คือการสร้างส่วนโครงสร้าง ขั้นต่อไปคือ การสร้างส่วนควบคุมการทำงาน และขั้นตอนสุดท้ายคือ การทดสอบการทำงานของเครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบ พอที่จะสรุปและวิจารณ์ผลแต่ละขั้นตอนได้ตามลำดับดังนี้

1) จากการศึกษาตัวเครื่องต้นแบบ จะเห็นว่ามีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดน้อย แต่มีประสิทธิภาพของเหล็กดีมากจึงสามารถให้สนามแม่เหล็กที่แรง สำหรับเครื่องที่สร้างจะพยายามใช้เหล็กที่หาได้ในประเทศ ซึ่งต้องใช้กระแสจ่ายให้กับขดลวดเป็นจำนวนมากกว่าประมาณ 2 เท่า เพื่อที่จะได้สนามแม่เหล็กค่าที่เท่ากัน

2) ชุดสั่นวัสดุป้อนเข้าเครื่อง (Vibrator) เพื่อที่ช่วยเร่งให้แร่เคลื่อนที่ไปยังลูกกลิ้งเหนียวนำไปเร็วขึ้น ในการทำงานประยุกต์การทำงานของมอเตอร์จึงได้ประสิทธิภาพของการสั่นไม่ดัดนัก

3) ประสิทธิภาพในการแยกแร่หลังจากที่ตรวจสอบแล้วจะเห็นว่าขึ้นกับ ความเร็วรอบของตัวลูกกลิ้งเหนียวนำ ถ้าใช้ความเร็วรอบสูงจะมีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักที่หายไปด้วย จึงต้องพิจารณาหาความเร็วที่เหมาะสมในการทำงาน

- 4) เครื่องแยกแร่ที่สร้างขึ้นจนสำเร็จดังรูปที่ 7.5 มีความจุสูงสุด 20 กก./ชม.
ส่วนเครื่องที่เป็นเครื่องต้นแบบที่จุฟ้าฯ มีความจุในการแยกสูงสุด 18 กก./ชม.



รูปที่ 7.5 เครื่องแยกแร่ด้วยสนามแม่เหล็กกำลังสูง
ชนิดลูกกลิ้งเทรียวน่า (แบบแห้ง) ที่พัฒนาขึ้น

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องแยกแร่ชนิดนี้ เป็นเครื่องแยกแร่ที่แยกได้ในแร่ที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก เพราะฉะนั้นในการใช้งาน ควรที่จะบด หรือทำให้แร่ให้เหมาะแก่การใช้งานของเครื่องเสียก่อน และถ้าสามารถหาเหล็กที่มีคุณภาพที่ดี ก็จะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่ำมากก็จะช่วยในการเทรียวน่า สนามแม่เหล็กสูงๆ โดยไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการจ่ายกระแสมากเกินไป

ในการทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครื่องแยกแร่ควรจะทำการศึกษาทดลองหลายๆ สาร ที่เงื่อนไขการทำงานต่างๆ เพิ่มเติม เพื่อดูความเหมาะสมในการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

1. J.Sroboda ,Dry magnetic separation. Magnetic methods for the Treatment of Minerals. Randburg ,South Africa ,1987 ,p.318-322
2. JOHN A. OBERTEUFFER ,Magnetic Separation,IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS ,Vol MAG-10 ,NO:2 ,June 1974 ,p.223-233
3. กรมทรัพยากรธรณี กองเศรษฐกิจและการเผยแพร่ , " อิลเมนิต์, โทเมน " ,แร่. พิมพ์ครั้งที่ 3 ,หน้า 88-89 ,180-182 ,2526
4. W.J. Brown ,Firing circuits for Silicon Controlled Rectifiers, ELECTRO-TECHNOLOGY ,July 1961 ,p. 79-83
5. บัญชา จิตติวรรณ , " สารแม่เหล็ก " ,ชุดทดสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารด้วยวิธี ดี.ซี. อีสเทอร์นิส ,ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,หน้า 3-12 ,2532
6. อุดมศักดิ์ ยั่งยืน , " การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง " ,POWER ELECTRONICS I ,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,หน้า 4-1 ถึง 4-52 ,2528

ภาคผนวก ก.
ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ภาคผนวก ข.
ผลการทดสอบการทำงาน

การทดลองที่ข่า : (เครื่องต้นแบบ)

ครั้งที่	GAP(mm.)	Roller speed (rpm)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)			
			MAG-1	MAG-2	NON-MAG	รวม
1	3.5	88	1.5430	0.0720	0.3780	1.9930
2	2.0	88	1.4790	0.1150	0.3860	1.9800

การทดลองที่ลาดกระบัง : (เครื่องที่พัฒนาขึ้น)

ครั้งที่	GAP(mm.)	Roller speed (rpm)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)			
			MAG-1	MAG-2	NON-MAG	รวม
1	2.0	113	1.0377	0.4549	0.4885	1.9781
2	2.0	100	1.2415	0.3555	0.3703	1.9673
3	2.0	88	0.7872	0.5729	0.6141	1.9742
4	2.0	70	0.9130	0.4155	0.6928	1.9813

ผลการวิเคราะห์นํ้าก่อนทำการแยก กรณีการทดลองเครื่องต้นแบบและเครื่องที่พัฒนาขึ้น ครั้งที่ 1 และ 2 เป็น

การทดลอง	% จากการนับต่อ 100 เม็ด		
	อิลเมไนต์	การ์เนต	ทราย
ครั้งที่ 1	77	7	16
ครั้งที่ 2	76	5	19
เฉลี่ย	76.5	6	17.5

ผลการวิเคราะห์แร่ก่อนทำการแยก กรณีการทดลองที่ลาดกระบังครั้งที่ 3 และ 4 เป็น

การทดลอง	% จากการนับต่อ 100 เม็ด		
	อิลเมไนต์	การ์เนต	ทราย
ครั้งที่ 1	61	7	32
ครั้งที่ 2	67	5	28
ครั้งที่ 3	77	5	18
ครั้งที่ 4	65	6	29
เฉลี่ย	67	6	27

แร่อิลเมไนต์

$$\begin{aligned}
 &\text{แร่ } 100 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ อิลเมไนต์ เป็น } 76.5 \text{ Kg} \\
 &\quad 2 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ อิลเมไนต์ เป็น } \frac{76.5 \times 2}{100} \text{ Kg} \\
 &= 1.53 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

แร่การ์เนต

$$\begin{aligned}
 &\text{แร่ } 100 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ การ์เนต เป็น } 6 \text{ Kg} \\
 &\quad 2 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ การ์เนต เป็น } \frac{6 \times 2}{100} \text{ Kg} \\
 &= 0.12 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

ทราย

$$\begin{aligned}
 &\text{แร่ } 100 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ ทราย เป็น } 17.5 \text{ Kg} \\
 &\quad 2 \text{ Kg} \text{ มีปริมาณ ทราย เป็น } \frac{2 \times 17.5}{100} \text{ Kg} \\
 &= 0.35 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

ในการทดลองหลังจากผ่านการชั่งน้ำหนักในปริมาณของแร่แต่ละส่วนแล้ว เราจะพิจารณาถึงองค์ประกอบแต่ละส่วนที่ทำการแยกได้

สำหรับเครื่องคัมแบท(จฬา)

การทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

ทำการนับต่อจำนวน 100 เม็ด 2 ครั้ง

โดยรวมส่วนที่เป็น MAG-1 และ MAG-2 เข้าด้วยกันเป็น MAG

การทดลองครั้งที่ 1

สารเริ่มต้น: อิลเมไนต์ = 1.303 กก., การ์เน็ต = 0.2192 กก., ทราาย = 0.4705 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด			น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมไนต์	79	81	80	1.2920
	การ์เน็ต	12	10	11	0.1776
	ทราาย	9	9	9	0.1454
					รวม = 1.6150
NON-MAG	อิลเมไนต์	3	3	3	0.0113
	การ์เน็ต	12	10	11	0.0416
	ทราาย	85	87	86	0.3251
					รวม = 0.3780
รวม					1.993

การทดลองครั้งที่ 2

สารเริ่มต้น: อิลเมนไนต์ = 1.2488 กก., การ์เน็ต = 0.2118 กก., ทราย = 0.5194 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด			น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมนไนต์	79	76	77.5	1.2353
	การ์เน็ต	9	12	10.5	0.1674
	ทราย	12	12	12	0.1913
					รวม = 1.5940
NON-MAG	อิลเมนไนต์	2	5	3.5	0.0135
	การ์เน็ต	15	8	11.5	0.0444
	ทราย	83	87	85	0.3281
					รวม = 0.3860
รวม					1.9800

ได้ประสิทธิภาพของการแยกดังนี้

การทดลองครั้งที่	แร่	ประสิทธิภาพของการแยก	
		recovery	grade
1 CU-3.5 มม.	อิลเมนไนต์	0.9913	0.8000
	ทราย	0.6909	0.8600
2 CU-2.0 มม.	อิลเมนไนต์	0.9891	0.7750
	ทราย	0.6317	0.8500

สำหรับภาคกระบึง

การทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

ทำการนับต่อจำนวน 100 เม็ด 2 ครั้ง

การทดลองครั้งที่ 1

สารเริ่มต้น อิลเมไนต์ = 1.2181 กก., การ์เนต = 0.1502 กก., ททราย = 0.6098 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด			น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมไนต์	79	80	79.5	1.1866
	การ์เนต	6	6	6	0.0895
	ททราย	15	14	14.5	0.2165
					รวม = 1.4926
NON-MAG	อิลเมไนต์	7	6	6.5	0.0315
	การ์เนต	15	10	12.5	0.0607
	ททราย	78	84	81	0.3933
					รวม = 0.4855
รวม					1.9781

การทดลองครั้งที่ 2

สารเริ่มต้น อิลเมไนต์ = 1.2384 กก., การ์เนต = 0.1844 กก., ททราย = 0.5445 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด			น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมไนต์	75	78	76.5	1.2217
	การ์เนต	10	8	9	0.1437
	ททราย	15	14	14.5	0.2316
					รวม = 1.5970
NON-MAG	อิลเมไนต์	7	2	4.5	0.0167
	การ์เนต	12	10	11	0.0407
	ททราย	81	88	84.5	0.3129
					รวม = 0.3703
รวม					1.9673

การทดลองครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4

ทำการนับต่อจำนวน 100 เม็ด 2 ครั้ง

การทดลองครั้งที่ 3

สารเริ่มต้น อิลเมไนต์ = 1.2263 กก., การ์เนต = 0.0715 กก., ททราย = 0.6764 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด				น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมไนต์	84	85	90	87	1.1833
	การ์เนต	4	3	3	3	0.0408
	ททราย	12	12	7	10	0.1360
						รวม = 1.3601
NON-MAG	อิลเมไนต์	8	6	7	7	0.0430
	การ์เนต	6	5	3	5	0.0307
	ททราย	84	89	90	88	0.5404
						รวม = 0.6141
รวม						1.9742

การทดลองครั้งที่ 4

สารเริ่มต้น อิลเมไนต์ = 1.2675 กก., การ์เนต = 0.0525 กก., ทราาย = 0.6613 กก.

	แร่	จำนวนเม็ด				น้ำหนัก (กก.)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
MAG	อิลเมไนต์	94	88	87	90	1.1957
	การ์เนต	0	2	0	1	0.0133
	ทราาย	6	10	13	9	0.1195
						รวม = 1.3285
NON-MAG	อิลเมไนต์	19	4	10	11	0.0718
	การ์เนต	7	7	5	6	0.0392
	ทราาย	74	89	85	83	0.5418
						รวม = 0.6290
รวม						1.9575

ได้ประสิทธิภาพของการแยกดังนี้

การทดลองครั้งที่	แร่	ประสิทธิภาพของการแยก	
		recovery	grade
1 (rpm=113)	อิลเมไนต์	0.9741	0.7950
	ทราย	0.6450	0.8100
2 (rpm=100)	อิลเมไนต์	0.9865	0.7650
	ทราย	0.5747	0.8450
3 (rpm=88)	อิลเมไนต์	0.9649	0.8700
	ทราย	0.7989	0.8800
4 (rpm=70)	อิลเมไนต์	0.9433	0.9000
	ทราย	0.8193	0.8300

ภาคผนวก ค.

คุณสมบัติ

อิลเมนไนต์ (Ilmenite)

อิลเมนไนต์ มาจากชื่อภูเขาอิลเมน (Ilmen) ในรัสเซีย ไทไตไลต์ $MgTiO_3$ มาจากชื่อของ Sir Archibald Geikie เป็นนักธรณีวิทยาอังกฤษ ไพโรไนต์ $MnTiO_3$ มาจากภาษากรีกว่า Pyro หมายถึง fire และ Phane หมายถึง appear เป็นแร่ที่ปรากฏเป็นสีแดงราวกับไฟ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ - รูปผลึกระบอบเฮกซะโกนาล ผลึกมักจะเป็นแผ่นหนาหรือเป็นแท่งผลึกมักจะได้ใกล้เคียงกับฮีมาไทต์ อาจพบเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนๆ กัน ปกติจะมีเนื้อสมานแน่นหรือเป็นมวลเมล็ดเท่าเม็ดทราย แข็ง 5.5-6 ถ.พ. 4.7 ความวาวคล้ายโลหะ หรือกึ่งโลหะ สีดำแบบเหล็ก สีมงละเอียดยิ่งขึ้นหรือแดงน้ำตาล อาจจะมีคุณสมบัติแม่เหล็กได้สูง โดยไม่ต้องเผาให้ร้อน เนื้ออ้อมแสง (Opaque)

คุณสมบัติทางเคมี - สูตรเคมี $FeTiO_3$ มี Fe 36.8 % Ti 31.6 % และ O 31.6% อัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมกับเหล็กแปรเปลี่ยนได้มาก ถ้ามีเหล็กออกไซด์มากไปอาจจะเป็นเพราะมีฮีมาไทต์เป็นมลทิน แมกนีเซียมและแมงกานีสอาจพบในอิลเมนไนต์ เนื่องจากสามารถแทนที่เหล็กในแร่นี้ได้

ลักษณะเด่นและวิธีตรวจ - มักพบเป็นผลึกแบนๆ มาก และบางครั้งอาจเห็นหกเหลี่ยมได้ อิลเมนไนต์ต่างจากฮีมาไทต์ตรงสีมงละเอียดยิ่ง และต่างจากแมกนีไทต์ตรงที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กอ่อนกว่าแต่ในกรณีที่มีแมกนีไทต์เกิดซ้อนอยู่ด้วย ก็จำเป็นต้องตรวจคุณสมบัติทางเคมี โดยละลายผงแร่ในกรดเกลือแล้วใส่ดิงก์จะได้ตะกอนสีม่วง อิลเมนไนต์ไม่หลอมตัวถ้าเผาจะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก

การกำเนิด - เกิดเป็นตัวเคลือบในลักษณะเป็นชั้นหรือรูปเลนส์ ในหินไนส์และหินแปรชนิดผลึกอื่นๆ ได้พบในสายแร่หรือมวลสารที่เป็นผลการแยกตัวของหินที่มี ส่วนสัมพันธ์กับแมกนีไทต์ และเป็นแร่ไม่สำคัญในหินอัคนี พบอยู่ในทรายร่วมกับแมกนีไทต์ รูไทล์ เซอร์คอนและโมนาไซต์ พบเสมอในแหล่งแร่ดีบุก

แหล่งกำเนิด - ในประเทศไทย ขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายพบในแหล่งดีบุกต่างๆ ไป เช่นที่ จ.กาญจนบุรี สีคล้ายดีบุกจนทำให้เข้าใจผิดกันมาก พวกทำเหมืองแร่ดีบุกมักเรียกว่าซีแร่ (อามัง) ชนิดที่เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนๆ กัน พบในแหล่งพลอยที่จันทบุรีและตราด

- ต่างประเทศพบมากที่ Kragero และแหล่งอื่นๆในนอร์เว ฟินแลนด์
ในลักษณะเป็นผลึกพบที่ Miask ในภูเขาอิลเมน รัสเซีย ในอินเดียและบราซิล มีการทำเหมือง
จากทรายชายฝั่งเป็นปริมาณมาก

ประโยชน์ - เป็นต้นกำเนิดให้ไทเทเนียม สารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ นำมาใช้
เป็นแม่สีเป็นจำนวนมากทุกแม่สีเก่า ซึ่งเป็นสารประกอบตะกั่ว เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษ
สามารถเป็นวัสดุในการสร้างเครื่องบินทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างและเครื่องยนต์ อิลเมไนต์ไม่
สามารถจะใช้เหมือนสีแร่เหล็กได้เพราะถลุงยาก แต่ของผสมอิลเมไนต์ แมกนีไทต์ และอิล-
เมไนต์-ฮีมาไทต์ นำมาแยกก็จะได้ทั้งไทเทเนียมและเหล็ก

การ์เนต (GARNET)

ชื่อแร่ - มาจากภาษาละตินว่า Grantus ซึ่งหมายถึงลักษณะที่เป็นเม็ด (grain)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ - รูปผลึกระบบไอโซเมทริก มักจะเกิดเป็นผลึกเดี่ยวๆเม็ดกลม ขนาดมีทั้งเล็กและใหญ่ แข็ง 6.5-7.5 ถ.พ. 3.5-4.2 ค่า ถ.พ. ขึ้นกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบสีโดยทั่วไปสีแดง เราเรียกว่า "โกเมน" อาจพบว่ามีสีอื่นๆ ได้ เช่น สีน้ำตาล เหลือง ขาว เขียว ดำ สีผงละเอียดสีขาว โปร่งใสกับโปร่งแสง

คุณสมบัติทางเคมี - การ์เนตมีหลายชนิดขึ้นกับว่าประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ได้แก่

1. ไพโรป (Pyrope) สูตรเคมี $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 3.51 สีแดงเข้มจนเกือบดำ โปร่งใสจึงใช้เป็นรัตนชาติได้ ซึ่งมาจากภาษากรีก หมายถึงมีสีแดงจืดคล้ายไฟเมื่อส่องดูกับแสง

โรโดไลต์ (Rhodolite) เป็นการ์เนตสีชมพูอ่อนหรือสีม่วง ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ระหว่างไพโรปกับแอลมันด์ไต์ (almandite)

2. แอลมันด์ไต์ (Almandite) สูตรเคมี $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 4.25 เป็นการ์เนตที่พบโดยทั่วไป ใช้เป็นรัตนชาติได้เนื่องจากโปร่งใสซึ่งมักจะมีสีแดงเข้ม ส่วนที่มีสีแดงน้ำตาล ไม่เป็นรัตนชาติ เนื่องจากโปร่งแสง ชื่อมาจากชื่อเมือง Alabanda ซึ่งในสมัยโบราณเป็นสถานที่เจียรไนการ์เนต

3. สเปสซาร์ไทต์ (Spessartite) เป็นการ์เนตชนิดแมงกานีส สูตรเคมี $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 4.18 สีน้ำตาลแดง

4. กรอสซูลาไรต์ (Grossularite) เป็นการ์เนตชนิดแคลเซียม สูตรเคมี $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 3.53 สีขาว เขียว เหลือง น้ำตาล ชมพู ชื่อมาจากภาษาทางพฤกษศาสตร์ ซึ่งเป็นชื่อผลไม้ชนิดหนึ่งซึ่งมีสีเขียวอ่อนเหมือนสีของกรอสซูลาไรต์ที่พบครั้งแรก

5. แอนดราดไต์ (Andradite) สูตรเคมี $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 3.75 สีเขียว เหลือง น้ำตาลถึงดำ ชื่อมาจากชื่อนักเล่นแร่แปรชาวโปรตุเกส-แอนดราดา (d' Andrada)

6. อวารอไวต์ (Uvarovite) เป็นการ์เนตชนิดโครเมียม สูตรเคมี $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$ ถ.พ. 3.77 สีเขียวมรกต ชื่อมาจากชื่อของท่านเคาน์อวารอฟ (Uvarov)

ลักษณะเด่นและวิธีตรวจ - ดูจากรูปผลึกไอโซเมทริก เป็นลูกเต๋ากร้อ ความแข็ง 7 การหักเห และดัชนีหักเหของแสงของแร่นี้จะสามารถบอกชนิด หรือส่วนประกอบของธาตุ ของการ์เนตแต่ละตัวได้ด้วย

การกำเนิด - พบโดยทั่วไปในหินแปรและหินอัคนี พบมากในหินแปรจำพวกไมกาชีสต์-ฮอร์นเบลนด์ชีสต์และไนส์ และพบในหินงาเปกมาไทต์มากกว่าในหินแกรนิต กรอซซูลาไรต์พบมากในหินปูนที่ถูกแปรสภาพ แอลมันไดต์พบในไมกาชีสต์ ไพโรปพบในหินเพริโดไทต์และเซอร์เพนทีน สเปสซาร์ไทต์พบในหินภูเขาไฟจำพวกไรโอไลต์ แอนดราไดต์พบในหินอัคนี และอิวาโรไวต์พบในหินเซอร์เพนทีนที่มีโครไมต์ปนอยู่ นอกจากนี้ยังพบการเนตที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ตามลำธารและริมฝั่งทะเล หินที่มีโกเมทหรือการเนตมากๆ มักเรียกเป็นชื่อหินไปเลย เช่น การเนตชีสต์ การเนตไนส์

แหล่ง - ในประเทศไทยมีที่ จันทบุรี ตราด ปรากฏว่าเป็นโกเมทที่มีเนื้อสะอาด ไม่ค่อยมีรอยร้าวรอยแตก จึงใช้เป็นรัตนชาติ ส่วนที่เกิดอยู่กับหินแปรชนิดหินไนส์ หินชีสต์หรือในหินแกรนิตพบเกือบทุกจังหวัด จึงนับเป็นแร่ค่าชนิดหนึ่ง ภาคเหนือพบที่ จ. เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง เชียงราย ตาก กำแพงเพชร นครสวรรค์ อุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ลงไปทางใต้พบทุกจังหวัด ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะเข้ งเทรา ชลบุรี ระยอง

- ต่างประเทศ ชนิดที่เป็นรัตนชาติมีมากที่ลังกา ออสเตรเลีย อูราล บราซิล ที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้จากสหรัฐอเมริกา

ประโยชน์ - เป็นรัตนชาติที่มีราคาไม่สูงนัก แอนดราไดต์สีเขียวซึ่งเรียกว่าดีมันทอยด์ (Demantoid) มาจากภูเขาอูราล ในรัสเซีย เป็นรัตนชาติที่สวยงามมาก เรียกว่ามรกตอูราล (Uralian emerald) ประโยชน์อย่างอื่นของการเนตคือ ใช้ทำเป็นหินขัด และกระดามทราย เพราะเหตุที่มีความแข็งสูง

ภาคผนวก ง.
คู่มือการใช้อินเวอร์เตอร์



บริษัท สยามอินเวอร์เตอร์ จำกัด

SIAM INVERTER CO., LTD.

48/66 บ้านพานถม พระนคร กรุงเทพฯ 10200

48/66 BANPHANTHOM PHRANAKORN BANGKOK 10200 THAILAND.

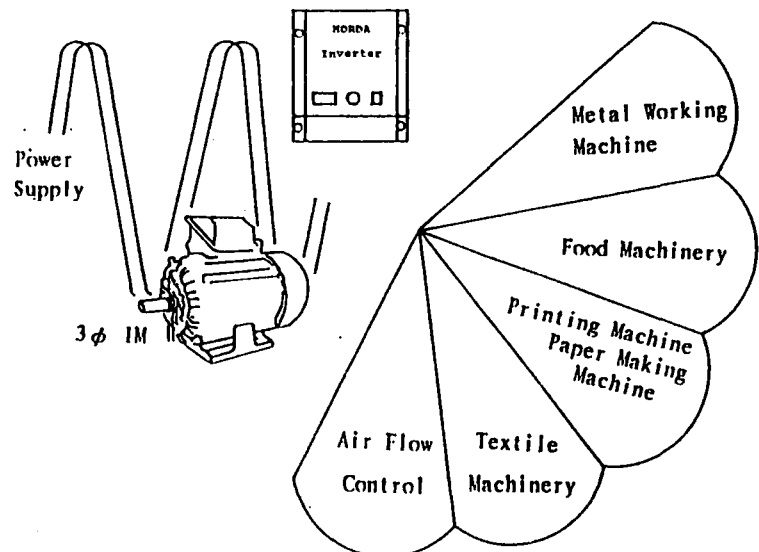
TEL. 281-7532, 282-0448 FAX. 281-1195

FEATURES

- ⊙ Display by seven segment LED (3 figures)
- ⊙ High stability frequency control
- ⊙ High performance DC brake (option to dynamic brake)
- ⊙ Complete protective functions
- ⊙ Sub-frequency setting and jogging operation
- ⊙ Single (up to 5 HP) or three phase input
- ⊙ Motor control center compatibility
- ⊙ Maximum frequency up to 120 HZ
- ⊙ Maintenance free with the use of the induction motor
- ⊙ Isolated control circuitry
- ⊙ Two separately terminated references
- ⊙ Easy to interface with P.C and P.L.C
- ⊙ Lower current and high torque with soft start
- ⊙ Adjustable acceleration/deceleration
- ⊙ Wide assortment of options is available in software form for installation

APPLICATION:

- ⊙ Metal working machine
- ⊙ Food machinery
- ⊙ Printing machine
- ⊙ Paper making machine
- ⊙ Textile machinery
- ⊙ Air flow control

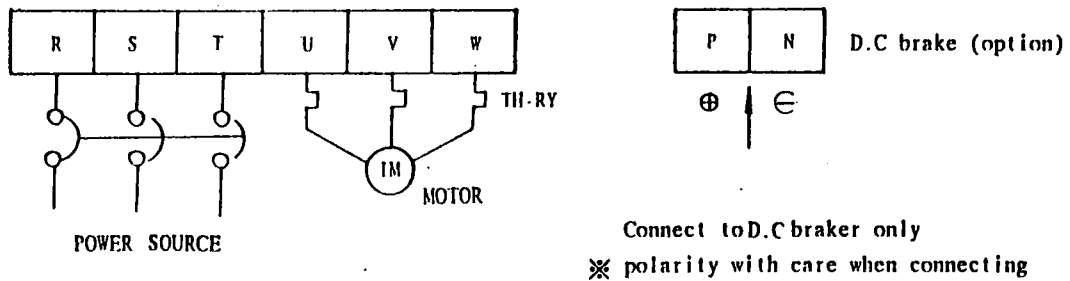


TERMINALS

The following figures and descriptions are given to help the user decide what inputs and control circuit to incorporate into the overall system and identify the appropriate connecting points of terminals.

6.1 Main circuit and Control circuit (Function of connecting points of terminals refer to table 1)

(1) Main circuit : Refer to figure 3



(2) Control circuit : Refer to figure 4

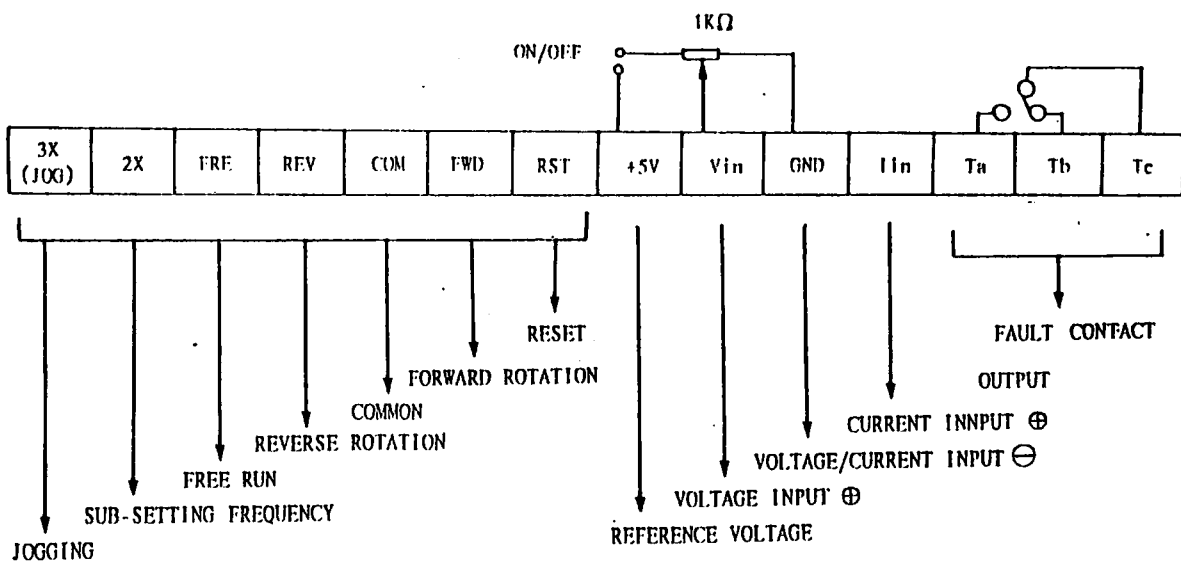


TABLE 1 DESCRIPTION OF MAIN CIRCUIT AND CONTROL CIRCUIT

	MARK	FUNCTION	DESCRIPTION
MAIN CIRCUIT	R.S.T	Power Source	3 Phase power source (1 Phase Power Supply Connect to R.S.UP to 5HP)
	P.N.	D.C. brake Terminal	dynamic brake (option)
	3X(JOG)	Jogging	3x-COM connected, setting frequency is kept at 5/6 Hz
CONTROL CIRCUIT	2X	Sub-setting Frequency	2x-COM connected, sub-frequency is setted by VR4
	FRE	Free Run	FRE-COM connected, free run operation
	REV	Reverse Rotation	REV-COM connected, reverse rotation
	COM	Common	WHEN DELIVERY FWD-COM has connected
	FWD	Forward Rotation	FWD-COM connected, forward rotation
	RST	RESET	RST-COM connected, INVERTER reset
	+5V	Reference Voltage	Reference voltage +5V Max. output current 10 mA
	Vin	Voltage Input +	Analog frequency setting signal DC 0 ~ 5V or DC 0 ~ 10V
	GND	Voltage / Current Input -	Ground
	Iin	Current Input +	Iin-GND DC 4 ~ 20 mA
	Ta-Tb-Tc	Fault Contact Output	Normal running Tb-Tc:close Ta-Tc:open Fault operation Tb-Tc:open Ta-Tc:close Contact Capacity AC 120V 5A

NOTE : ANALOG CONTROL SIGNAL PRIVILEGE : FRE > 3X > 2X > Vin or Iin

FIGURE 5 SYSTEM WIRING DIAGRAM

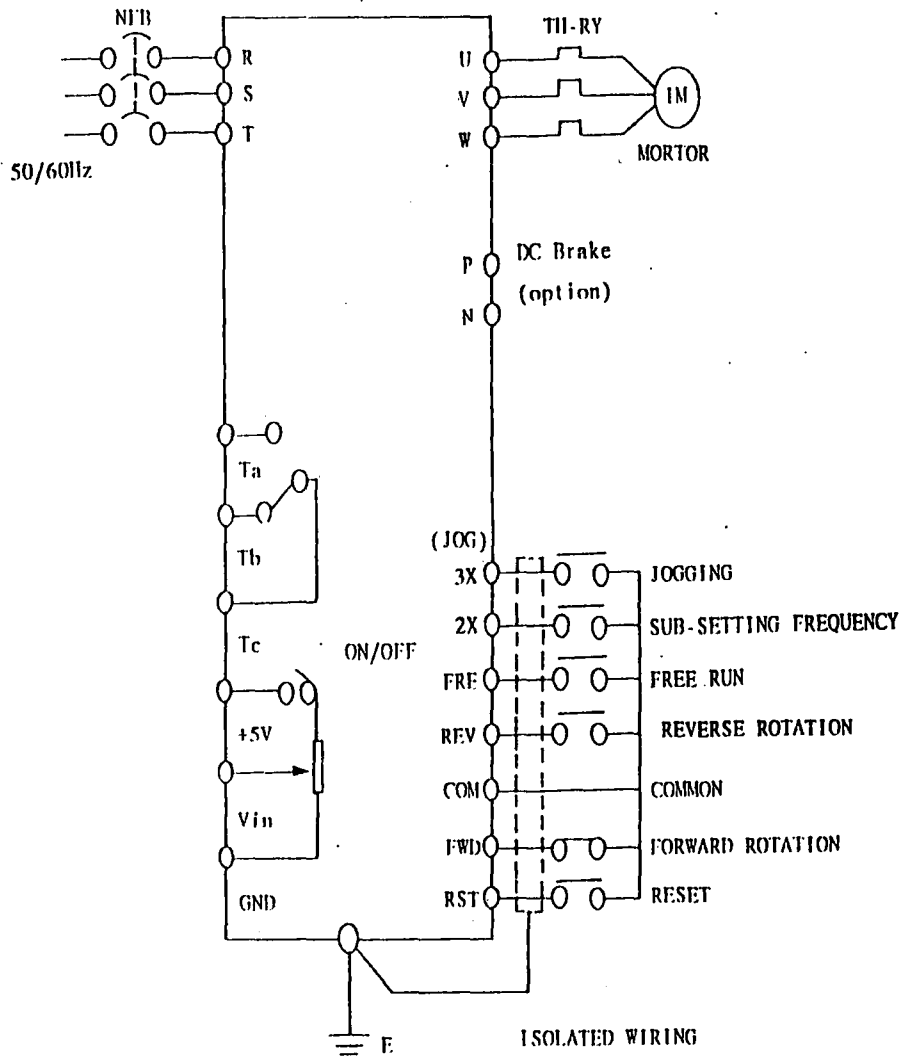
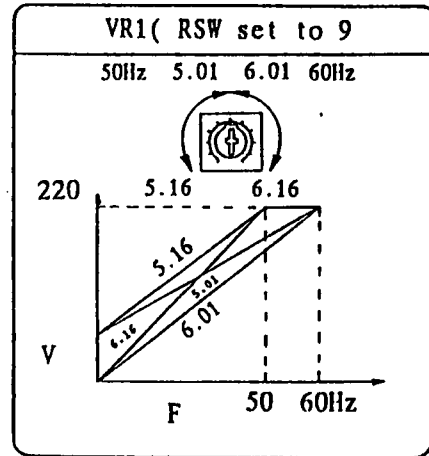
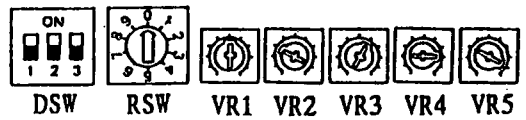


TABLE 2 RECOMMENDED WIRING SIZE

(HP)	RM2 220V SERIES (mm ²)			RM2 380/440V SERIES (mm ²)		
	MAIN CIRCUIT	CONTROL CIRCUIT	GROUNDING WIRE	MAIN CIRCUIT	CONTROL CIRCUIT	GROUNDING WIRE
1	2	0.75	3.5	2	0.75	3.5
2	2			2		
3	2			2		
5	3.5			3.5		
7.5	5.5			3.5		
10	8			5.5		
15	14			8		
20	22			8		
25	30			14		
30	38			22		
40	60			30		
50	80			30		
60	100			38		
75	100			60		

ADJUSTMENT

DSW	Setting	Function
ON 1 2 3	Input Signal	0 - 5V DC
ON 1 2 3		0 - 10V DC
ON 1 2 3		4 - 20mA DC
ON 1 2 3	Output Signal	1 - 60Hz
ON 1 2 3		1 - 120Hz



RSW	Display Function
0	Output frequency : 0 - 60/120(Hz)
1	Accel. time 0.2(0.6/120Hz) - 150(sec)
2	Decel. time : 0.2(0.6/120Hz) - 150(sec)
3	Sub-setting frequency : 0-60/120(Hz)
4	Accel./Decel.time for sub-setting frequency : 0.2(0.6/120Hz) - 150(sec)
5	Rotation of 4-poles motor: 0-180/360(x1/10 rpm)
6	Rotation of 6-poles motor: 0-120/240(x1/10 rpm)
7	Rotation of 2-poles motor: 0-360/720(x1/10 rpm)
8	Input signal level: 1.(DSW2 OFF) 0-5.0(V) 2.(DSW2 ON) 0-20.0(mA)
9	V/F Mode 5.01-5.16 6.01-6.16

Accel. time	VR2
Decel. time	VR3
Sub-setting frequency	VR4
Accel./Decel.time for sub-setting frequency	VR5
50Hz 5.01 6.01 60Hz	VR1

9.0 INDICATING CONDITIONS/DISPLAY

INDICATING CONDITIONS			DISPLAY	ADJ	CONTENT
RSW	D S W	FWD COM REV			
0		CLOSE	0 - 60/120	--	FREQUENCY
			0 - 50/60		
		OPEN	----	--	NO COMMAND FOR FWD/REV ROTATION
	2→ON	OPEN	IE	--	POWER SOURCE UNDER VOLTAGE
			cu0	--	LESS THAN 2mA OF CURRENT INPUT
1			0.2 - 150	VR2	ACCELERATION TIME
2			0.2 - 150	VR3	DECELERATION TIME
3			0 - 60/120	VR4	SUB-SETTING FREQUENCY
4			0.2 - 150	VR5	ACCELERATION/DECELERATION TIME SUB-SETTING FREQUENCY
5		CLOSE	0 - 180/360	--	ROTATION OF 4-POLES MOTOR
		OPEN	4P.O.		NO COMMAND FOR FWD/REV ROTATION
			4P		POWER SOURCE UNDER VOLTAGE
	2→ON	CLOSE	cu0		LESS THAN 2mA OF CURRENT INPUT
6		CLOSE	0 - 120/240	--	ROTATION OF 6-POLES MOTOR
		OPEN	6P.O.		NO COMMAND FOR FWD/REV ROTATION
			6P		POWER SOURCE UNDER VOLTAGE
	2→ON	CLOSE	cu0		LESS THAN 2mA OF CURRENT INPUT
7		CLOSE	0 - 360/720	--	ROTATION OF 2-POLES MOTOR
		OPEN	2P.O.		NO COMMAND FOR FWD/REV ROTATION
			2P		POWER SOURCE UNDER VOLTAGE
	2→ON	CLOSE	cu0		LESS THAN 2mA OF CURRENT INPUT
8	2→OFF	--	0 - 5.0	--	VOLTAGE SIGNAL INPUT LEVEL
	2→ON	--	0 - 20.0		CURRENT SIGNAL INPUT LEVEL
9			5.01-6.16	VR1	V/F MODE
F A U L T D I S P L A Y					PROTECTIVE FUNCTIONS
O.C.1,O.C.2,O.C.3					OVER CURRENT
O.E.1,O.E.2,O.E.3					OVER VOLATAGE
O.L O.L.1					OVERLOAD
O.H					INVERTER HEATSINK OVERHEATING
FR					FREE RUN
IE					POWER SOURCE UNDER VOLTAGE
HE					POWER SOURCE OVER VOLTAGE
C.P.U					MICROPROCESSOR ERROR
cu0					ANALOG FREQUENCY SETTING SIGNAL ERROR
----					FORWARD/REVERSE OPERATION ERROR
P.O					MOMENTARY POWER FAILURE OVER 15ms

NOTE : Display value multiplied by two equals real voltage level when DSW-1 0

FAULT DISPLAY AND TROUBLE SHOOTING

MORDA inverter - RM2 series equips with the complete protective functions.

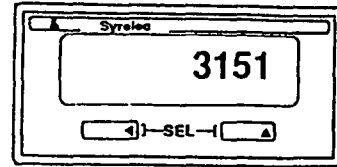
If fault display is actuated, inherent device functions are missed by trouble occurrence.

Correctly comprehend the probable cause by referring the below listed checking methods, and then apply appropriate countermeasures.

DISPLAY OR PROTECTION	CONDITIONS	PROBABLE CAUSES AND TROUBLE SHOOTING
(1) O.C.1 (2) O.C.2 (3) O.C.3	OVER CURRENT	1. Inverter capacity does not match the motor rating. 2. Accel. or decel. time is too short. 3. Inverter fault. (accel. and decel. time is adjusted by VR3 and VR4 respectively.)
	(1) ACCEL.	
	(2) CONST. SPEED (3) DECEL.	
(1) O.E.1 (2) O.E.2 (3) O.E.3	OVER VOLTAGE	1. Power supply voltage is too high. 2. Decelerating time is too short. Decelerating time is adjusted by VR3. 3. Installing dynamic brake.
	(1) ACCEL.	
	(2) CONST. SPEED (3) DECEL.	
(1) O.L. (2) O.L.1	OVERLOAD	Overload capacity is approximately 150% load of current for 1 minute. 1. Adjust boost(V/F) to match your motor if trip at low speed. 2. Check the current of motor, change a bigger capacity inverter if over rated current.
	(1) MOTOR. (2) INVERTER	
O.H.	INVERTER HEAT SINK OVERHEATING	1. Cleaning the heat sink. 2. Check cooling fan is still working. 3. Change a cool place to operate, if the ambient temperature is too high.
LE	POWER SOURCE UNDER VOLATAGE	Power supply voltage is insufficient. Check the input voltage, if over the rated voltage.
HE	POWER SOURCE OVER VOLATAGE	Power supply voltage is too high. Check the input voltage, if over the rated voltage.
C.P.U.	MICROPROCESSOR ERROR	RESET the inverter, or check grounding
---	FORWARD/REVERSE OPERATION ERROR	Correct the setting
cu0		Analog frequency setting signal error. Less than 2mA of current input.
P.O.	MOMENTARY POWER FAILURE OVER 15 ms	Then check and correct the power supply RESET the inverter.

ภาคผนวก จ.

คู่มือการให้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบ



Usine et siège social : BOURGUEBUS
 N° Tel. : (33) 31-85-80-00
 Direction Commercial et Service Exp.
 BP 144
 77315 MARNE LA VALLEE
 Cedex 02
 N° Tél. : (33) 60-17-53-53

SPECIFICATIONS :

Power supply Un 3 VDC lithium battery - interchangeable - 5 years life depending on the applications.
 Display 5 digits - liquid crystal - height : 10 mm
 Inputs 1 slow counting input (terminals 1 and 2) with voltage free contact
 Minimum time for closed contact : 10 ms
 Minimum time for open contact : 20 ms
 Frequency 20 Hz maximum with de-bounce
 1 high speed counting input (terminals 1 and 3)
 by NPN transistor 10KHz maximum or
 by PNP transistor 1.2 KHz maximum.
 Note : If scale factor > 1, max. frequency = $\frac{10\text{KHz}}{\text{coeff.}}$
 high level : from 1 to 15VDC
 low level : from 0 to 0,7VDC
 Input impedance Slow counting : 100 K Ω / + 3VDC
 High speed counting : 27 K Ω / + 3VDC
 Measurement Type $\frac{1}{\text{Tau}}$
 Sample time : 0,7s
 Limit time of measure : 10s
 Scale factor 0,001 to 9999.
 Decimal point 4 programmable positions
 Rate x1 or x10
 Time base Crystal controlled

Note : A power supply must be provided for a sensor

PRESENTATION AND ENVIRONMENT :

Material CYCOLAC X 17
 Protection class Nema 4 x
 Mounting Clips with screw
 Connection 5 screw terminals on back side
 Operating temperature 0°C + 55°C
 Storage temperature 0°C to + 70°C

PROGRAM MODE :

To enter the program mode, a connection must be made between terminals 1 and 5.

To select the programming :

- press and hold the key,
- press the key to select the steps (scale factor, decimal point, rate x1 or x10).

Rate scale factor programming

NOTE : the scale factor must be different from 0.

Rate scale factor calculating

$$\text{Coef.} = \frac{\text{Rpx} \times \text{Dec.}}{n}$$

Rpx : multiplier

Rpx = 1 → items/second

Rpx = 60 → items/minute

Dec. : decimal point factor determined by the desired decimal point position.

Decimal point position	Value
XXXX	1
XXX.X	10
XX.XX	100
X.XXX	1000

n : is the number of pulses per item from the sensor.

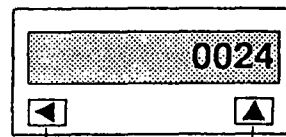
Example

Pulley rotation in rev. / min.

A sensor gives 250 pulses by revolution

$$\text{Coef.} = \frac{60 \times 1}{250} = 0,24$$

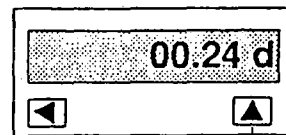
Scale factor programming



Digit selection

Digit increment

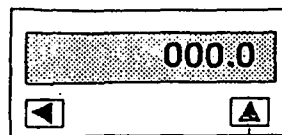
After incrementating the selected digits still press till the apparition of "d" on the right of the display, then press to select the position of the decimal point.



Decimal point movement

- press the key, and then the key to reach next screen.

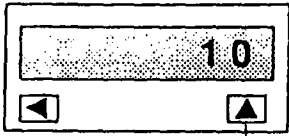
Programming of decimal point assigned to display



Decimal point movement

- press the key, and then the key to reach next screen.

Rate x1 or rate x10



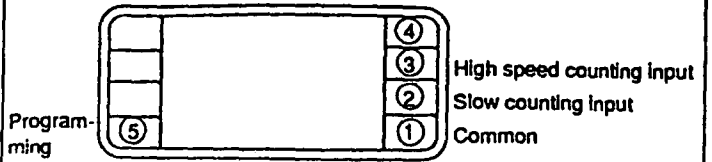
Selection x1 or x10

Selecting x10 will add a zero on the far right of the display and does not change the decimal point position.

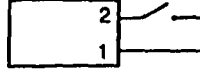
Program validation

To exit the program mode, open the connection between terminals 1 and 5. Display of "R" on the left.

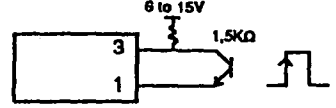
CONNECTION DRAWINGS :



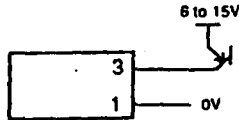
Slow counting free contact closure



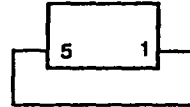
High speed counting NPN transistor or voltage level



High speed counting PNP transistor



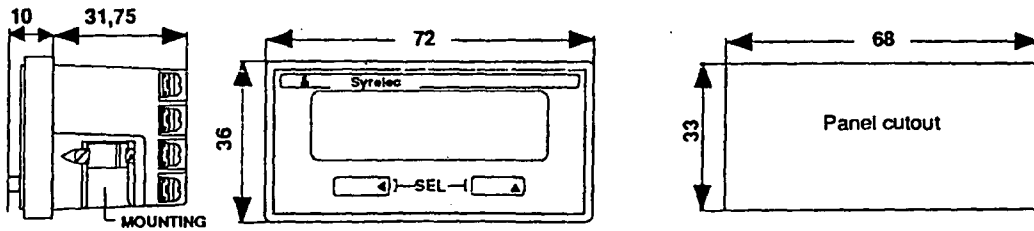
Front reset enable



USER PRECAUTIONS :

To improve the battery life we recommend to use a high input voltage level in the limits indicated

DIMENSIONS :



ประวัติผู้เขียน

นาย จักรกฤษณ์ ชูเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎ์ ฉะเชิงเทรา เมื่อปี พ.ศ. 2532 และเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533

นาย วัชรพงษ์ ปถมพานิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2515 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า เมื่อปี พ.ศ. 2532 และเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533

นาย อรรถพร กุลธรรมโยธิน เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2515 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนทวีธาภิเศก เมื่อปี พ.ศ. 2532 และเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533