

การพัฒนาเครื่องบดสาร

DEVELOPMENT OF BALL MILLING APPARATUS

นางสาวสุนิตย์ ทิมบุญ

นางสาวอภัสรา วันทอง

โครงการงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

DEVELOPMENT OF BALL MILLING APPARATUS

SUNIT THIMPUY

APUSSARA WANTHONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาเครื่องบดสาร
 DEVELOPMENT OF BALL MILLING APPARATUS
 ชื่อนักศึกษา นางสาวสุนิตย์ ทิมปุย รหัสนักศึกษา 54050623
 นางสาวอาภัสรา วันทอง รหัสนักศึกษา 54050641
 ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2557
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์
 ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ดร.พิชชานันท์ อีเศรษฐ์โสภณ	พิชชานันท์ อี.
อ.ธนภรณ์ สีสาววัฒนานนท์	อ.ธนภรณ์
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	วิชาญ

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาเครื่องบดสาร
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุนิตย์ ทิมบุญ รหัสนักศึกษา 54050623 นางสาวอาภัสรา วันทอง รหัสนักศึกษา 54050641
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้พัฒนาเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิม ซึ่งเหมาะกับการบดสารปริมาณมากให้สามารถบดสารได้ในแนวนอนและเหมาะสมกับปริมาณสารจำนวนน้อยๆได้ แทนบดที่ได้ออกแบบเพิ่มเติมโดยใช้โปรแกรม Solid Works นั้น ประกอบด้วยแกนหมุนที่ติดกับแกนมอเตอร์ผ่านสายพานและแกนหมุนอิสระประกบทั้งสองข้าง ซึ่งแกนหมุนดังกล่าวจะหล่อย่างหนา 5 มิลลิเมตร ยาว 334 มิลลิเมตร จึงเหมาะสำหรับขูดบดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และยาว 9 เซนติเมตร โดยจะสามารถบดได้สูงสุดครั้งละ 6 ขวด พร้อมๆกัน จากการทดสอบบดผงอลูมินาที่ใช้ความเร็วรอบแตกต่างกันและใช้เวลาในการบดเป็น 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าสามารถลดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาให้เล็กลงได้ จากขนาดเริ่มต้น 8000 นาโนเมตร ให้มีขนาดเล็กที่สุด 318.5 นาโนเมตร

คำสำคัญ : เครื่องบดสาร, ลูกบด, อลูมินา

Title	DEVELOPMENT OF BALL MILLING APPARATUS		
Student	Miss Sunit	Thimpuy	Student ID 54050623
	Miss Apussara	Wanthong	Student ID 54050641
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics		
Department	Physics		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof. Wicharn Techitdheera		

Abstract

This senior project was successfully developed the old vertical ball milling apparatus that normally use for large amount of powder, to operate in horizontal milling and suitable for small amount of sample powder. The bed rails were designed by Solid Works with the main rolling cylinder attached to the axis of motor with a belt and sandwich by the two pieces of free rolling cylinders. All three cylinders wrap with 5 mm thick with 334 mm lengths. The suitable milling bottle should be diameter 6 cm and 9 cm length. It can operate with maximum 6 bottles simultaneously. After the milling test by alumina sample with various time periods, i.e. 12, 18, 24 and 30 hours. We found that the alumina samples can decrease sizes from 8000 nm to the smallest one 318.5 nm.

Key Words: Milling Apparatus, Milling Balls, Alumina

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จของโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่าน รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัย การช่วยเหลือแก้ไขในส่วนที่ไม่เข้าใจและคอยผลักดันให้งานดำเนินต่อไปจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวัดขนาดอนุภาคของอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว และขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวัดและสถานที่ในการดำเนินการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เป็นกรรมการ คอยให้ความรู้และแนะนำข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อที่จะนำไปแก้ไขให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคุณแม่ คุณแม่ และเพื่อนๆ ที่ร่วมทำให้งานนี้สำเร็จ รวมทั้งอีกหลายคน หลายกำลังใจที่มีส่วนทำให้งานนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ที่ข้าพเจ้าใช้เป็นเอกสารอ้างอิง และทำการศึกษา จนทำให้เกิดความสนใจและเข้าใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับการสนับสนุนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดา ที่รักและเคารพอย่างยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

นางสาวสุนิตย์ ทิมปู้ย

นางสาวอภัสรา วันทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การบดละเอียด (Grinding or Milling)	4
2.2 Ball mill หรือ pebble mills	5
2.3 หลักการทำงานของ Ball Mills	6
2.4 กลไกการแตกหักของวัสดุ	7
2.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบด	7
2.5.1 ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด	7
2.5.2 ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด	8
2.5.3 ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่ใช้เติมลงในหม้อบด	11
2.5.4 ปริมาณของวัสดุดิบที่เติม และปริมาณของ Medium ที่เติม	12
2.5.5 ความเร็วรอบของหม้อบด	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 การคำนวณหาค่าความเร็ววิกฤต (Critical speed)	14
2.7 ทฤษฎีแม่เหล็ก	16
2.7.1 แม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.8 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	26
2.8.1 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ	29
2.8.2 กฎมือขวาของเฟลมมิง (Flemming Right Hand Rule)	29
2.8.3 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)	29
2.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	30
2.9.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์	30
2.9.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	36
2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	41
2.10.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ	42
2.10.2 หลักการทำงานของอินดักชันมอเตอร์	47
2.11 อินเวอร์เตอร์	53
2.11.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์	54
2.11.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	55
2.11.3 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์	57
2.11.4 ผลที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์	57
2.12 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)	58
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	61
3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	61
3.1.1 ทฤษฎี Ball Milling	61
3.1.2 มอเตอร์	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 อินเวอร์เตอร์	61
3.1.4 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	61
3.2 การออกแบบเครื่องบดสารประเภท Ball Milling	61
3.2.1 โปรแกรม Solid Works	61
3.2.2 เครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง	62
3.2.3 เครื่องบดสารชนิดแนวนอน	64
3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน	66
3.3.1 คำนวณหาค่าความเร็ววิกฤตของหม้อบด	66
3.3.2 คำนวณหาค่าความเร็วรอบของหม้อบด	67
3.3.3 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์	67
3.3.4 ทดสอบการบด โดยใช้เครื่องบดสารชนิดแนวนอน	67
3.4 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน	69
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	70
4.1 ผลการออกแบบเครื่องบดสารชนิดแนวนอน	71
4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน	72
4.2.1 ผลการคำนวณหาค่าความเร็ววิกฤตของหม้อบด	72
4.2.2 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วรอบของหม้อบด	72
4.2.3 ผลการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์	73
4.2.4 ผลการทดสอบการบด โดยใช้เครื่องบดสารชนิดแนวนอน	74
4.3 ผลการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
2.1 คุณสมบัติของลูกบดชนิดต่าง ๆ	9
2.2 แสดงความเร็รรอบของมอเตอร์	54
3.1 บันทึกค่าการทดสอบจำนวนรอบของสายพานจากการปรับค่าที่อินเวอร์เตอร์	67
4.1 ค่าความเร็รรอบของหม้อบดที่ได้จากการคำนวณ	72
4.2 ผลการทดลองการหาความเร็รรอบของสายพานจากการปรับค่าที่อินเวอร์เตอร์	73
4.3 เลขอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการกำหนดความเร็รรอบของหม้อบด	74
4.4 ผลการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแฉนวน	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพโดยรวมของงานวิจัย	1
2.1 ลักษณะของอุปกรณ์บดย่อยวัสดุแบบ Ball Mills	5
2.2 กลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในหม้อบด	6
2.3 ผลของความเร็วดต่อการเคลื่อนที่ของลูกบด	7
2.4 ระดับของลูกบดในหม้อบด Ball Mill ที่เหมาะสม	8
2.5 Pebble Stone	10
2.6 รูปร่างของลูกบดเนื้ออลูมิน่า	11
2.7 ลูกบดเนื้อเซอร์โคเนีย (ZrO_2)	11
2.8 ระดับของลูกบดและวัตถุบดในหม้อบด	13
2.9 แรงที่กระทำต่อลูกบดขณะเกิด Critical speed	14
2.10 การจับกลุ่มของโมเลกุล	16
2.11 โมเลกุลที่เรียงตัวกัน	16
2.12 แม่เหล็กธรรมชาติ	17
2.13 แม่เหล็กโบราณ	17
2.14 อานาจจากแท่งเหล็กและจากแท่งเหล็กเจือ	18
2.15 เส้นแรงแม่เหล็ก	18
2.16 วิธีสาธิตแม่เหล็กด้วยผงเหล็ก	19
2.17 การผลักและดูดของแม่เหล็ก	19
2.18 การปรับลักษณะทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก	20
2.19 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วต่างกันดูดกัน	20
2.20 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันผลักกัน	21
2.21 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน	21
2.22 การทดลองของเออสเตต	23
2.23 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก	24
2.25 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ	24
2.26 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดในขดลวด	25
2.27 ทิศทางการไหลของกระแส	25
2.28 การเกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ	27
2.29 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก	28
2.30 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง	29
2.31 การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าโดยใช้กฎเกณฑ์ของเลนซ์	30
2.32 เปลือกหรือโครง	31
2.33 ขั้วแม่เหล็ก	31
2.34 ขดลวดสนามแม่เหล็ก	32
2.35 การตรวจสอบการต่อขดลวดฟิลด์คอยล์	33
2.36 แปร่งถ่านและช่องถ่าน	33
2.37 แกนเหล็กอาร์เมเจอร์	34
2.38 ขดลวดอาร์เมเจอร์	34
2.39 ลักษณะของคอมมิวเตเตอร์	35
2.40 รูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง	35
2.41 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกลไฟฟ้า	36
2.42 กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง	36
2.43 ปฏิกริยาระหว่างสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กที่ขดลวดตัวนำ	37
2.44 วงจรเทียบเคียงของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ	38
2.45 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย	39
2.46 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์	40
2.47 ส่วนประกอบเบื้องต้นของมอเตอร์	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.48 โครงมอเตอร์ชนิดมีครีบ	42
2.49 แผ่นเหล็กลามิเนท	43
2.50 แกนขดลวดและขดลวดสเตเตอร์	43
2.51 ลักษณะของขดลวดมอเตอร์	43
2.52 ลักษณะแผ่นลามิเนทของแกนโรเตอร์	44
2.53 แกนโรเตอร์ที่มีตัวนำแท่งอะลูมิเนียมอัดอยู่ในสลีทและแหวนอะลูมิเนียมพร้อมครีบบีบอัดติด	44
2.54 ลักษณะแผ่นลามิเนทของแกนโรเตอร์	45
2.55 ตัวนำของโรเตอร์ที่ต่อกันเหมือนกับกรงกระรอก	45
2.56 ลักษณะของโรเตอร์แบบวาวด์ที่มีโรเตอร์ ใบพัด สลิปริง และเพลลา	46
2.57 แท่งแม่เหล็กรูปตัวยูวางคว่ำเข้าหาแกนตัวนำ	48
2.58 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กจมรอบตัวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N	48
2.59 ตัวนำทรงกระบอกเคลื่อนที่ได้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	48
2.60 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สองเฟสชนิดสองโพล	49
2.61 ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สองเฟสชนิด 4 โพล	51
2.62 ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สามเฟส	51
2.63 อินเวอร์เตอร์	53
2.64 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์	55
2.65 วงจรอินเวอร์เตอร์	56
2.66 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์	57
2.67 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	58
2.68 การเลี้ยวเบนของเลเซอร์	59
3.1 หน้าต่างของโปรแกรม Solid Works ที่ใช้ในการออกแบบ	62
3.2 โครงสร้างของเครื่องบดสารแบบหม้อบดในมุมมองวัตถุต่าง ๆ	62
3.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดสารประเภทหม้อบด	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 โครงสร้างของเครื่องบดสารแบบ Ball Milling ในมุมมองวัตถุต่าง ๆ	64
3.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดสารประเภท Ball Milling	65
3.6 ผงอลูมิน่า	67
3.7 ลูกบด	68
3.8 ขวดแก้ว	68
3.9 เครื่องบดสารประเภท Ball Milling	68
3.10 เตาอบ	68
3.11 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)	70
4.1 เครื่องบดสารชนิดแนวนอนที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Works และ เครื่องบดสารชนิดแนวนอนที่สร้างขึ้น	71
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขอินเวอร์เตอร์และความเร็วของสายพาน (รอบ/นาที)	73

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ		ความหมาย
ϕ_c	fractional of critical speed	ความเร็วรอบของหม้ออบที่เหมาะสม
n		ความเร็วรอบของหม้ออบ
n_c		ความเร็ววิกฤต
m		มวลของลูกบด
P		จุดที่แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ แรงหนีศูนย์กลาง
g		ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
R		รัศมีของหม้ออบ
r		รัศมีของลูกบด
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิกอนไดออกไซด์
Al ₂ O ₃	Alumina	อลูมิน่า
MgO	Magnesium Oxide	แมกนีเซียมออกไซด์
ZrO ₂	Zirconia	เซอร์โคเนีย
F	Force	แรง
I	Current	กระแส
B	Magnetic field	สนามแม่เหล็ก
D.C. Motor	Direct Current Motor	มอเตอร์กระแสตรง
A.C. Motor	Alternative Current Motor	มอเตอร์กระแสสลับ
AC		ไฟฟ้ากระแสสลับ
V _{AC}		แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
nm	nanometer	นาโนเมตร
θ		มุมของการเลี้ยวเบน
λ		ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

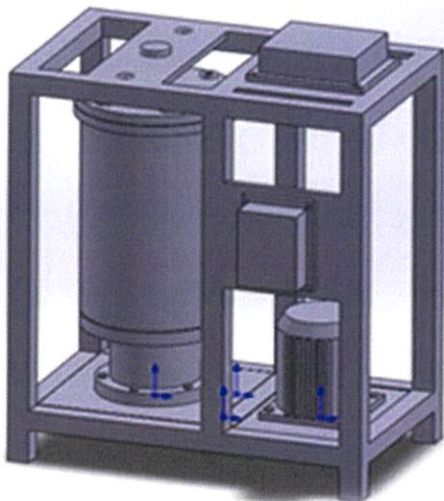
บทที่ 1

บทนำ

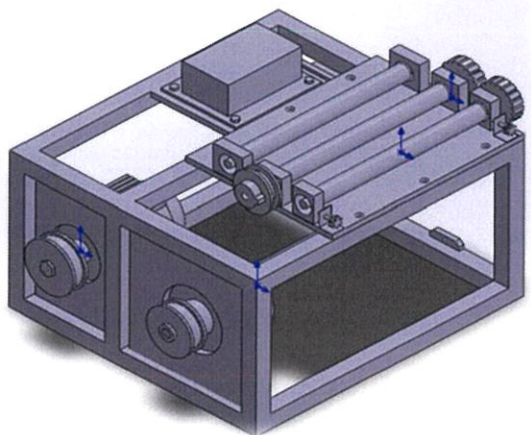
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สารเคมีบางชนิดเมื่อทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง โดยคุณสมบัติทางเคมีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีขึ้น เร็วขึ้น และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งทำให้ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่จากสารเคมีเหล่านั้นดีขึ้นอีกด้วย จึงทำให้การบดสารเคมีหรือวัตถุดิบต่างๆให้มีขนาดเล็กลงนั้น เป็นเรื่องที่สำคัญอย่างมากสำหรับงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการบดละเอียดและการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน เพื่อใช้สำหรับการบดสารเคมีในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะพัฒนาเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิมมาประยุกต์ใช้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น เนื่องจากเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิมนั้นต้องใช้ปริมาณสารเคมีและจำนวนลูกบดในการบดค่อนข้างมาก ซึ่งจะเหมาะสมกับงานทางด้านอุตสาหกรรมมากกว่าด้านวิทยาศาสตร์ ดังนั้นจึงออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่อยู่ ให้สามารถทำงานในรูปแบบเครื่องบดสารชนิดแนวนอน ซึ่งจะใช้บดสารในปริมาณน้อยๆได้ ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังคงทำงานได้ทั้งสองแบบคือ เครื่องบดสารชนิดแนวตั้งและเครื่องบดสารชนิดแนวนอน โดยสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของงานวิจัยต่างๆ ซึ่งภาพโดยรวมของงานวิจัยนี้ แสดงดังรูป 1.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 ภาพโดยรวมของงานวิจัย

(ก) เครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง (ข) เครื่องบดสารชนิดแนวนอน

นอกจากนั้นจะตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียดโดยเครื่องบดสารชนิดแนวอนที่สร้างขึ้น ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size analyzer) เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวอนอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการลดขนาดอนุภาค โดยใช้อุปกรณ์บดย่อยวัสดุประเภท Ball Milling
- 2) สามารถออกแบบและสร้างส่วนประกอบเพิ่มเติมมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิมได้
- 3) เครื่องบดสารชนิดแนวอนที่สร้างขึ้นสามารถบดสารให้มีขนาดเล็กลงได้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างส่วนประกอบเพิ่มเติมมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่ โดยสามารถใช้เป็นเครื่องบดสารชนิดแนวอนได้
- 2) เครื่องบดสารชนิดแนวอน สามารถควบคุมการทำงานด้วยการตั้งเวลาและความเร็วรอบในการบดได้
- 3) ตรวจวัดขนาดอนุภาคของสารเคมีที่ผ่านการบดละเอียดมาแล้ว

1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัยและวางแผนการทำงาน
- 2) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องบดสาร อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และศึกษาการออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Works
- 3) ออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อใช้เป็นเครื่องบดสารชนิดแนวอน ด้วยโปรแกรม Solid Works
- 4) สั่งทำชิ้นส่วนประกอบเพิ่มเติม เพื่อนำมาประกอบกับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง และแก้ไขชิ้นงาน
- 5) ทดสอบการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแนวอนที่สร้างขึ้นโดยการบดผงอลูมินาที่ใช้ความเร็วรอบและเวลาในการบดแตกต่างกัน
- 6) นำผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดมาแล้ว ไปตรวจวัดขนาดของอนุภาค
- 7) วิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
ขั้นตอนที่ 1	■												
ขั้นตอนที่ 2	■	■	■										
ขั้นตอนที่ 3			■	■									
ขั้นตอนที่ 4					■	■	■	■	■	■			
ขั้นตอนที่ 5											■		
ขั้นตอนที่ 6											■	■	
ขั้นตอนที่ 7												■	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้เครื่องบดสารได้ทั้งสองประเภทคือ เครื่องบดสารชนิดแนวตั้งและเครื่องบดสารชนิดแนวนอน รวมทั้งสามารถบดสารเคมีให้มีขนาดเล็กกลงได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การลดขนาดของอนุภาค (Size reduction) หมายถึง การที่ทำให้ขนาดของของแข็งลดโดยวิธีทางกลซึ่งจะไม่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลง วัตถุประสงค์ของการลดขนาดทั่วไปคือ ให้ได้ขนาดของผลผลิตตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ เป็นต้น

2.1 การบดละเอียด (Grinding or Milling)

เป็นการบดวัตถุดิบที่ผ่านการบดหยาบมาแล้ว ให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลงจนถึงขั้นละเอียดมาก (Pulverization) โดยใช้การกระทบ, กระทบ และการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบ กับตัวลูกบด (Grinding Media) การบดละเอียดนั้นมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมเซรามิก เนื่องจากจำเป็นต้องบดอนุภาคให้มีขนาดละเอียดมาก (ต่ำกว่า 60 ไมครอนลงไป) เพื่อที่จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผาของวัตถุดิบต่างๆที่อยู่ในสูตรของผลิตภัณฑ์เซรามิกเร็วขึ้น และเพื่อให้ได้คุณสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงหลังการเผา, เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ, ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน, ปริมาณเนื้อแก้ว (glassy phase) ได้ตามที่เรต้องการ สำหรับด้านวิทยาศาสตร์นั้นการบดละเอียดก็จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาทางเคมีของสารต่างๆโดยคุณสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้นอีกด้วย

วิธีการบดละเอียดสามารถแบ่งได้ตามอุปกรณ์และหลักการในการบด (Milling) ได้ดังนี้

2.2.1 Ball Mill เป็นการบดวัตถุดิบโดยใช้หลักการหมุนของหม้อบด โดยมีลูกบดอยู่ภายใน สามารถแบ่งการบดวัตถุดิบได้เป็นแบบเปียก (Wet Milling) และแบบแห้ง (Dry Milling)

2.2.2 Attrition Mill เป็นการบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดมาก และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่ำ โดยอนุภาคที่ได้จากการบดโดยใช้ Attrition Mill นั้นจะมีขนาดต่ำกว่า $1\mu\text{m}$ (ขึ้นกับขนาดของวัตถุดิบตั้งต้น, ความแข็งของวัตถุดิบ, ชนิดและปริมาณของลูกบด, เวลาในการบด)

2.2.3 Jet Mill เป็นการบดโดยไม่ใช้ลูกบดแต่อาศัยการบดกันเองของวัตถุดิบที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก

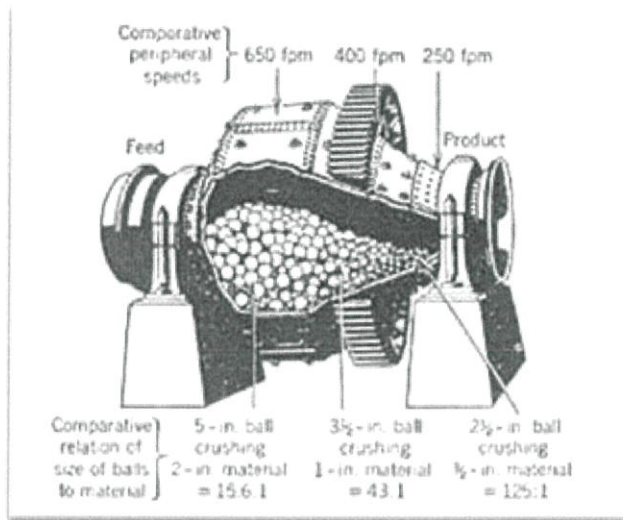
2.2.4 Vibro mill or Vibration Mill เป็นเครื่องมือบดที่อาศัยการสั่นให้แท่งเหล็กที่ไขบดกระทบเข้ากับวัตถุดิบ รวมทั้งการกระทบกันเองของวัตถุดิบเองด้วย

2.2.5 Pendula Mill เป็นเครื่องบดวัตถุดิบแบบแห้ง โดยมีหัวค้อนตีในแนวนอนขนาดเท่ากับพื้นโลก และใช้การคัดขนาดด้วยลม

2.2.6 Edge Runner, Muller Mill เป็นเครื่องบดที่ใช้ล้อเหล็กหรือล้อหินขนาดใหญ่หมุนไปในถาดขนาดใหญ่ ซึ่งน้ำหนักของล้อจะเป็นตัวกดเพื่อให้วัตถุดิบย่อยเป็นขนาดเล็ก

2.2 Ball mills หรือ pebble mills

Ball Mills เป็นอุปกรณ์บดย่อยชนิดหนึ่งซึ่งสร้างง่าย ประสิทธิภาพดี มีการบำรุงรักษาได้ง่าย ต้องการพลังงานของการบดย่อยต่อตันของผลิตภัณฑ์ต่ำ เมื่อเทียบกับอุปกรณ์บดย่อยแบบอื่นของ Grinder

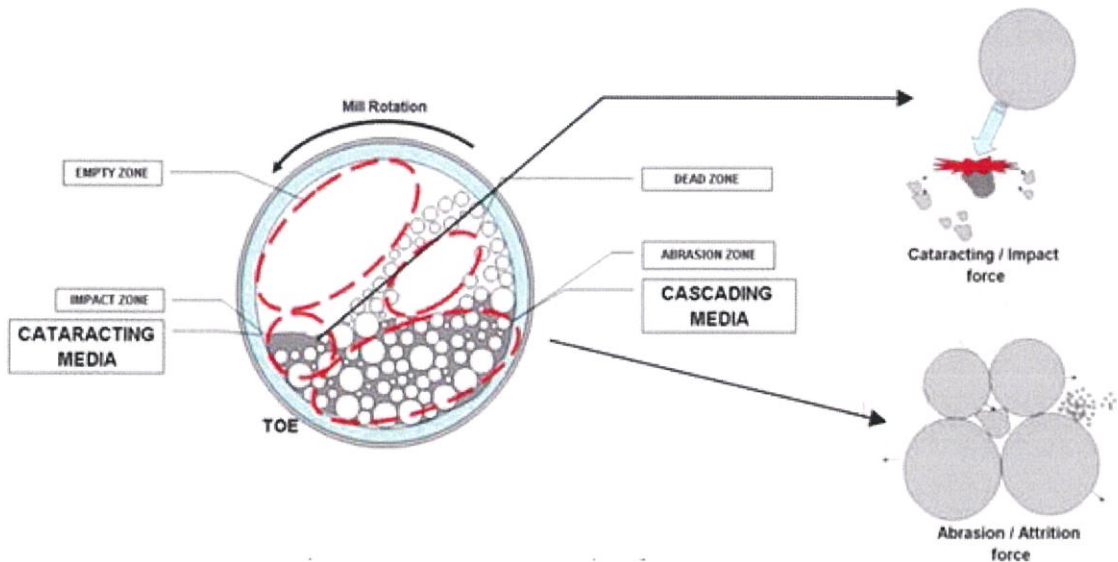


รูปที่ 2.1 ลักษณะของอุปกรณ์บดย่อยวัสดุแบบ Ball Mills (McCabe, 1993)

Ball Mills ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกที่หมุนในแนวนอนอย่างช้า ๆ และภายในนั้นจะบรรจุด้วยตัวกลางที่ใช้ในการบด (grinding medium) ประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรทั้งหมด วัสดุที่บดที่ต้องการลดขนาดจะถูกป้อนเข้าไปภายในทรงกระบอก และการลดขนาดจะเกิดจากการกระทบของตัวกลางที่ใช้ในการบดในขณะที่หมุน ท่อทรงกระบอกมักจะทำจากเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (high carbon steel plate) หรืออาจใช้วัสดุอื่น ๆ ได้เช่น พอร์ซเลน (porcelain) หินทราย (silica rock) หรือยาง

ตัวกลางที่ใช้ในการบด Ball Mills จะเป็นลูกบดที่ทำจากวัสดุแข็ง เช่น พวงเหล็กกล้าไร้สนิม หรืออาจทำจากวัสดุทางเซรามิก โดยจะใส่ลูกบดประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจะมีค่าสัดส่วนของช่องว่าง (void fraction) ระหว่างลูกบดเมื่ออยู่หนึ่งประมาณ 0.40 การบดสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ บดแบบแห้งและบดในสภาพที่เป็นของเหลว การบดโดยที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และกำลังการผลิตของหม้อบด ซึ่งค่ากำลังการผลิตของ Ball mills จะขึ้นอยู่กับขนาดของลูกบดที่ใช้และขนาดของอนุภาคที่ต้องการบด รวมถึงจำนวนรอบที่หมุน ลักษณะของการบด ปริมาตรของลูกบดที่มีอยู่ในหม้อบด และความเร็วรอบในการบดด้วย แต่การบดในสภาพที่เป็นของเหลวยังต้องคำนึงถึงช่องเปิดตรงทางออกต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถควบคุมระดับของของเหลวในหม้อบดอีกด้วย

2.3 หลักการทำงานของ Ball Mills



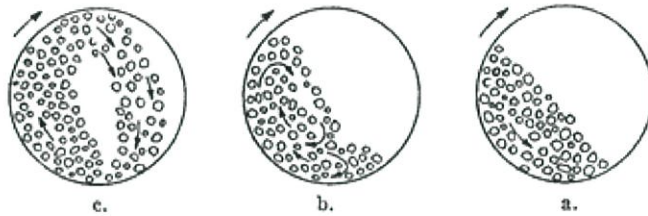
รูปที่ 2.2 กลไกการทำงานที่เกิดขึ้นภายในหม้อบด

เมื่อหม้อบดหมุนจนได้รอบตามที่กำหนดไว้ จะสามารถอธิบายกลไกภายในหม้อบดได้ดังนี้ กระบวนการบดที่เกิดขึ้นภายในประกอบด้วย 2 แรงกระทำคือ

1. การบดที่เกิดจากการตกกระทบของกับวัตถุบริเวณ Impact Zone
2. การบดที่เกิดจากแรงขัดสีของลูกบดกับวัตถุบริเวณ Abrasion Zone

นอกจากนี้ในการบดครั้งหนึ่ง ๆ จะมีส่วนที่เป็นช่องว่างหรือ Dead Zone ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เกิดการบดใด ๆ โดยอัตโนมัติ และในส่วนของ Empty Zone จะเกิดขึ้นเอง (เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 60 - 80% ของความเร็ววิกฤต) จะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของหม้อบด ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบดในอุปกรณ์การบดย่อยแบบ ball mill จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ ลูกบดจะมีการเคลื่อนที่แบบ cascading คือ เมื่อการหมุนของหม้อบดเข้าลูกบดจะยังมีลักษณะติดกันอยู่ เมื่อลูกบดหมุนขึ้นไปตามผนังของหม้อบดถึงตำแหน่งหนึ่ง ก็จะตกลงมารวมกับลูกบดในหม้อบด ในขณะที่ลูกบดตกลงมากกระทบกับลูกบดในหม้อบดจะเป็นช่วงเวลาที่สำคัญ ที่ทำให้วัสดุภายในหม้อบดเกิดการแตกหัก เมื่อเพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้น ลูกบดจะเริ่มไม่ยึดติดกันและเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ไปจนถึงตำแหน่งสูงสุดของหม้อบดแล้วตกลงมา ลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้เรียก cataract พบว่าอัตราการแตกหักของวัสดุจะมีค่าสูงสุด เมื่อลูกบดมีการเคลื่อนที่แบบ cascading ที่ความเร็วประมาณ 65 - 80 % ของความเร็ววิกฤต ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับภาวะของหม้อบดและชนิดของ lifter ยิ่งหม้อบดหมุนเร็วขึ้น ลูกบดก็จะยกสูงขึ้นและกำลังงานที่ใช้ก็จะมากขึ้นด้วย แต่กำลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ เพราะว่ายิ่งลูกบดถูกยก

ได้สูงมากขึ้น การตกลงมากระแทกย่อมได้แรงกระแทกมากขึ้น ทำให้กำลังการผลิตของหม้อบดสูงขึ้นด้วย แต่ถ้าเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้นไปจนกระทั่งทำให้ลูกบดถูกเหวี่ยงติดไปกับผนังตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการบดหรือเกิดน้อยมากจะเรียกสภาพของหม้อบดในขณะนี้ว่า Centrifuging ความเร็วที่ทำให้เกิด Centrifuging นี้เรียกว่า ความเร็ววิกฤต (Critical speed) ดังนั้นการทำงานของหม้อบดควรกระทำที่ความเร็วรอบต่ำกว่าจุดวิกฤต



รูปที่ 2.3 ผลของความเร็วต่อการเคลื่อนที่ของลูกบด (Cullen, 1947)

a. ที่ความเร็วต่ำ b. ที่ความเร็วปานกลาง c. ที่ความเร็วสูง

2.4 กลไกการแตกหักของวัสดุ

วัสดุที่มีการแตกหักด้วยอุปกรณ์การลดขนาดแบบ Ball mill สามารถแบ่งกลไกการแตกหักของวัสดุได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1. Fracture อนุภาคเกิดจากการแตกหักรุนแรง เนื่องจากแรงกระแทกโดยตรงระหว่างลูกบด
2. Chipping เกิดฝุ่นหรืออนุภาคเล็กๆ เนื่องจากการขัดสีระหว่างลูกบดกับอนุภาคของวัสดุ
3. Abrasion อนุภาควัสดุที่ถูกขัดสีกับลูกบด จะมีขนาดที่ละเอียดยิ่งขึ้น

ทั้ง Chipping และ Abrasion เป็นผลกระทบซึ่งกันและกัน คือ chipping ทำให้ได้อนุภาคขนาดเล็กผิวหยาบที่หลุดจากผิวอนุภาคเดิม ขณะเดียวกัน Abrasion จะทำให้ผิวเดิมของอนุภาคมีความละเอียดยิ่งขึ้น ทั้งสองกรณีอาจเรียกรวมกันว่า Attrition

2.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราบด

ในการบดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีปัจจัยที่จะต้องควบคุมดังต่อไปนี้

2.5.1 ปริมาณของลูกบดที่ใช้ในหม้อบด

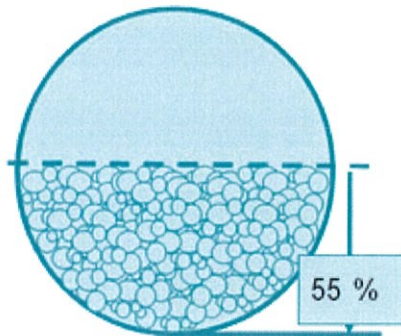
เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุดนั้น การเติมลูกบดลงในหม้อบด (Ball Mill) นั้น จะเติมอยู่ประมาณ 50-55% ของปริมาตรภายในทั้งหมดของหม้อบด ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ช่วงของการเติมลูกบดในช่วงนี้จะช่วยให้เวลาในการบดน้อยที่สุด และค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) จะดีที่สุด

การคำนวณปริมาตรของหม้อบด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรหม้อบด (V)} &= \text{พื้นที่หน้าตัด (A)} \times \text{ความยาวของหม้อบด (L)} \\ &= \pi r^2 L \\ &= \frac{\pi D^2 L}{4} \end{aligned}$$

โดยที่ L = ความยาวภายในของหม้อบด

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหม้อบด



รูปที่ 2.4 ระดับของลูกบดในหม้อบด Ball Mill ที่เหมาะสม

เมื่อเราเติมลูกบดลงไป 55% ของปริมาตรหม้อบดแล้วนั้น การจัดเรียงตัวของลูกบดในแต่ละขนาดจะยังทำให้เกิดช่องว่างภายในระหว่างลูกบดอยู่ ถึงแม้ว่าเราจะเติมลูกบดหลายๆขนาดลงไป เพื่อให้การ pack ตัวของลูกบดดีที่สุด ปริมาตรของลูกบดที่หักช่องว่าง (Void) ต่างๆออกไปแล้ว จะอยู่ที่ประมาณ 60% ของปริมาตรรวมทั้งหมด (ที่ 55% ของ Mill Volume) จึงทำให้สามารถหาปริมาตรของลูกบดที่อยู่ในหม้อบดได้จาก $55\% \times 60\%$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 33% ของปริมาตรหม้อบด ดังนั้นในหม้อบดจะเหลือช่องว่างที่สามารถเติมวัตถุดิบและน้ำลงไปได้อีกประมาณ 67%

2.5.2 ชนิดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบด

การเลือกใช้ลูกบดชนิดต่าง ๆ นั้น ควรคำนึงถึงสิ่งที่เราต้องการจะบด ถ้าเป็นเนื้อดินของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเน้นเรื่องความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์มากนัก เช่น เนื้อของกระเบื้องปูพื้น บุผนัง เนื้อดินสโตนแวร์ เนื้อดินกระเบื้องหลังคา เราอาจเลือกใช้ลูกบดที่มีมลทิน (Impurities) ปนอยู่ในเนื้อของลูกบด ราคาของลูกบดก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึง รวมทั้งประสิทธิภาพในการบดของลูกบดแต่ละชนิดด้วย แต่ถ้าได้มีการคำนวณเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการบดของลูกบดที่มีค่าความหนาแน่นสูง เช่น ลูกบดเนื้ออลูมินาแล้ว เราอาจจะลดงบประมาณการลงทุนลงไปได้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบดที่สูงขึ้นทำให้ลดชั่วโมงการบดลงไปได้มาก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของลูกบดชนิดต่าง ๆ

ชนิดของลูกบด	ส่วนประกอบ	ความถี่จำเพาะ	ประสิทธิภาพในการบด	ราคา	% การสึกหรอ
Flint/Pebble Stone	SiO ₂	2.5 - 2.6	ปานกลางถึงต่ำ	ถูก	สูง
Porcelain	Al ₂ O ₃ , SiO ₂	2.3 - 2.6	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
Steatite	SiO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃	2.6 - 2.8	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
Alumina	Al ₂ O ₃	3.5 - 3.7	สูง	สูง	น้อย
Zirconia	ZrO ₂	5.8 - 6.0	สูงมาก	สูงมาก	ต่ำ

1) ลูกบดชนิด Flint หรือ Pebble Stone

โดยปกติแล้วลูกบดชนิด Flint หรือ Pebble Stone ซึ่งเป็นหินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติตามชายหาด แม่น้ำ จะใช้สำหรับการบดเนื้อดินที่ไม่ต้องการความขรุขระมากนัก เพราะลูกบดที่เป็น Pebble จะมีมลทินของเหล็กอยู่เป็นจำนวนมากพอสมควร ราคาของลูกบดชนิดนี้จะไม่แพงมากนักเมื่อเทียบกับลูกบดชนิดอื่น ๆ เมื่อบดไปเรื่อย ๆ ลูกบดก็จะสึกกร่อนไป ซึ่งสิ่งที่สึกออกมาก็คือตัว SiO₂ ซึ่งก็สามารถปนไปกับเนื้อดินได้เลย ไม่ถือว่าเป็นมลทิน หรือสิ่งแปลกปลอมอื่นใด เรียกการบดโดยใช้ลูกบดที่มีเนื้อเดียวกันกับผลิตภัณฑ์ที่เราจะบดว่า Autogenous Milling

2) ลูกบดชนิด Porcelain

ลูกบดชนิดเนื้อ Porcelain จะมีราคาสูงกว่า Pebble Stone แต่ถ้าเทียบกับลูกบดอลูมิน่าแล้ว ก็ยังมีราคาต่ำกว่าอยู่มาก ลูกบด Porcelain มีประสิทธิภาพในการบดที่ดีกว่า Pebble Stone และมีมลทินปนลงไปในตัวลูกบดต่ำกว่าด้วย การสึกหรอของลูกบดแบบ Porcelain ยังสูงกว่าลูกบดอลูมิน่า



รูปที่ 2.5 Pebble Stone

3) ลูกบดชนิด Steatite

สำหรับลูกบดเนื้อ Steatite นั้นจะมีราคาสูงกว่าเนื้อ Porcelain แต่ประสิทธิภาพในการบดจะดีกว่าเล็กน้อย การสึกหรอจะต่ำกว่าเนื้อ Porcelain เนื่องจากกระบวนการผลิตที่เผาที่อุณหภูมิสูง (Porcelain เผาที่ 1250-1300 °C Steatite เผาที่ 1350 °C) เนื้อของลูกบดจะมีความแข็งแรงกว่า มีความหนาแน่นสูงกว่า มีรูปร่างทรงกลมที่แน่นอน เนื่องจากใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดด้วยแรงดันสูง ข้อดีอีกอย่างของการใช้ลูกบดเนื้อ Steatite คือในการบดจะมีอุณหภูมิของน้ำสลิปต่ำกว่า Alumina ในระหว่างการบด

4) ลูกบดชนิด Alumina

ลูกบดชนิดเนื้ออลูมิน่าจะมีราคาสูงกว่า เนื้อ Porcelain และเนื้อ Steatite แต่ประสิทธิภาพในการบดจะดีกว่ามาก เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า ลูกบด Porcelain และ Steatite รวมทั้งการสึกหรอก็จะน้อยกว่าด้วย ซึ่งถ้าคำนวณถึงต้นทุนค่าไฟฟ้าที่สามารถลดได้เนื่องจากสามารถลดชั่วโมงบดลงได้ ค่ารวม % การสึกหรอของลูกบดที่ลดลง ต้นทุนของการใช้ลูกบดแบบอลูมิน่าจะถูกลงกว่า การใช้ลูกบดแบบ Pebble Stone และลูกบดเนื้อ Porcelain ในระยะยาว เพียงแต่ตอนลงทุนครั้งแรกนั้นอาจจะต้องลงทุนสูงกว่า

สำหรับโรงงานที่คิดจะสร้างโรงงานใหม่หรือขยายกำลังการผลิต การใช้ลูกบดแบบอลูมิน่านั้นเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะจะทำให้เราสามารถเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นได้โดยไม่ต้องลงทุนเครื่องจักรในการบด เพียงแต่เราเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อบดให้สูงขึ้นโดยใช้ลูกบดอลูมิน่า ซึ่งโดยปกติแล้วการใช้ลูกบดอลูมิน่าจะสามารถบดโดยใช้ชั่วโมงบดเป็นครึ่งหนึ่งของลูกบดแบบ Pebble Stone หรือเราอาจเติมลูกบดอลูมิน่าปนลงไปกับลูกบดแบบ Pebble Stone เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบดของหม้อบดได้



รูปที่ 2.6 รูปร่างของลูกบดเนื้ออลูมินา

5) ลูกบดชนิด Zirconia

สำหรับลูกบดเนื้อเซอร์โคเนียนั้นจะใช้สำหรับการบดในหม้อบดที่เป็น High speed mill เช่น Attrition mill, Vibro mill เป็นต้น ซึ่งจะทำให้อนุภาคที่ต้องการบดนั้นมีขนาดเล็กมาก โดยสามารถบดได้โดยมีขนาดต่ำกว่า $1\ \mu\text{m}$ และมีการกระจายตัวของอนุภาคแคบ ลูกบดเซอร์โคเนียนี้จะมีราคาแพงกว่าลูกบดเนื้ออื่น ๆ แต่มีการสึกหรอต่ำมาก มีประสิทธิภาพในการบดสูงเนื่องจากมีความหนาแน่นสูงกว่าลูกบดเนื้ออื่น ๆ และมีความแข็งสูงกว่าลูกบดเนื้ออื่น



รูปที่ 2.7 ลูกบดเนื้อเซอร์โคเนีย (ZrO_2)

2.5.3 ขนาดของลูกบดและสัดส่วนในแต่ละขนาดที่ใช้เติมลงในหม้อบด

ขนาดของลูกบดที่ใช้เติมในหม้อบดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อบดที่เราใช้งาน ขนาดของวัตถุดิบที่เติมลงไปและในหม้อบด และความละเอียดของน้ำสลิปที่ต้องการบด โดยลูกบดขนาดใหญ่จะทำให้

หน้าที่บดย่อยวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงและลูกบดขนาดเล็กจะเป็นตัวทำให้วัตถุดิบเล็กลงได้ ตามที่เราต้องการ ลูกบดขนาดเล็กนั้นจะบดวัตถุดิบให้มีขนาดการกระจายตัวของอนุภาคได้แคบกว่า ลูกบดขนาดใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า การเติมลูกบดที่มีขนาดแตกต่างกันลงไปในห้องบดนั้น จะช่วยให้การเรียงตัวของลูกบดดีขึ้น นั่นคือมีช่องว่างลดลง ทำให้เราสามารถเติมวัตถุดิบลงไปในห้องบดได้มากขึ้น นอกจากนี้การเติมลูกบดหลายๆขนาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบดให้ดีขึ้น ด้วย ตัวอย่างการเลือกใช้น้ำหนักของลูกบดและสัดส่วนการเติม สำหรับห้องบดขนาด 25 ตัน

กรณีที่ลูกบดเป็น Pebble Stone

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 - 50 mm. ในสัดส่วน 25 % ของการเติมลูกบดทั้งหมด
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 - 60 mm. ในสัดส่วน 50 %ของการเติมลูกบดทั้งหมด
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 - 100 mm. ในสัดส่วน 25 %ของการเติมลูกบดทั้งหมด

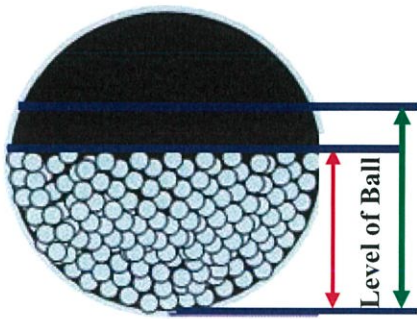
กรณีที่ลูกบดเนื้ออลูมินาหรือ Steatite

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ในสัดส่วน 25 %ของการเติมลูกบดทั้งหมด
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. ในสัดส่วน 50 %ของการเติมลูกบดทั้งหมด
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. ในสัดส่วน 25 %ของการเติมลูกบดทั้งหมด

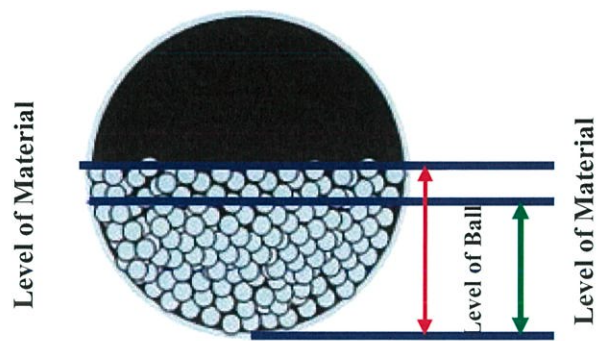
2.5.4 ปริมาณของวัตถุดิบที่เติม และปริมาณของ Medium ที่เติม

จากการคำนวณปริมาตรที่เหลือของห้องบด หลังจากเติมลูกบดลงไปแล้วนั้น เราจะเหลือปริมาตรหรือช่องว่างอยู่อีก 67% ของปริมาตรห้องบด การคำนวณปริมาตรวัตถุดิบและMedium ที่เติมลงไปนั้นต้องเว้นช่องว่างของปริมาตรห้องบดเอาไว้อีก 25% ด้วยเหตุผลที่ว่าจะต้องเหลือช่องว่างที่ให้โอกาสวัตถุดิบและลูกบดมีการเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงของการตกกระทบซึ่งกันและกัน อีกเหตุผลที่สำคัญก็คือ ในการเติมวัตถุดิบลงไปในห้องบดนั้น วัตถุดิบทั้งหมดไม่ว่าจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กจะไม่สามารถแทรกผ่านไปตามช่องว่างระหว่างลูกบดที่มีอยู่ในห้องบดได้ ดังนั้น 22% ที่เป็นช่องว่างของลูกบดจะแทบไม่มีวัตถุดิบแทรกเข้าไปได้เลย จนกว่าเราจะเริ่มหมุนห้องบดให้มีการเคลื่อนตัวของลูกบดและวัตถุดิบ จนกระทั่งวัตถุดิบและ Medium สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างของลูกบดได้

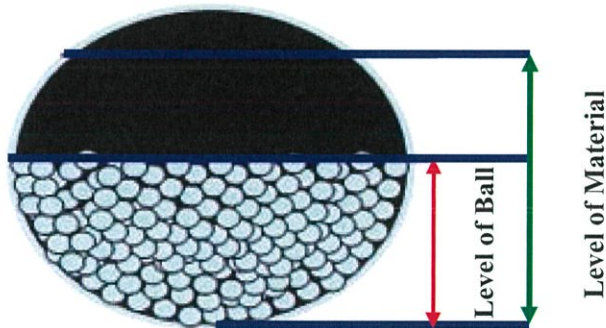
ดังนั้นปริมาตรที่เป็นช่องว่างของห้องบดที่ใช้ในการบดอย่างมีประสิทธิภาพ จะเท่ากับ 22% ของช่องว่างระหว่างลูกบดรวมกับ 20% ของช่องว่างห้องบดที่เหลือจะเท่ากับ 42% ของปริมาตรห้องบด



ระดับการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม



ระดับของวัตถุดิบน้อยเกินไปทำให้ลูกบดลัดหรือเร็ว



ระดับของวัตถุดิบมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการบดต่ำลง

รูปที่ 2.8 ระดับของลูกบดและวัตถุดิบในหม้อบด

2.5.5 ความเร็วรอบของหม้อบด (rotational speed, n)

ความเร็วรอบของหม้อบดที่เหมาะสมสำหรับการบดย่อย สามารถระบุได้ในเทอมของ Fractional of critical speed (ϕ_c)

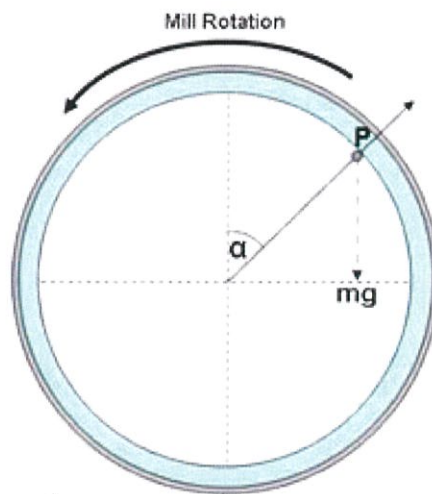
$$\phi_c = \frac{n}{n_c}$$

โดยที่ n = ความเร็วรอบของหม้อบด

n_c = ความเร็ววิกฤต เป็นค่าความเร็วรอบสูงสุดที่ทำให้ลูกบดเกาะติดกับผนังหม้อบดไม่หล่นลงมา

2.6 การคำนวณหาค่าความเร็ววิกฤต (Critical speed)

การบดใน Ball mill จะเกิดขึ้นเมื่อหม้อบดหมุน ลูกบดจะถูกเหวี่ยงขึ้นไปตามผนังของหม้อบดและเมื่อขึ้นไปถึงจุดสูงสุดก็จะตกลงสู่ด้านล่าง แล้วลูกบดจะถูกเหวี่ยงขึ้นไปใหม่ ดังนั้นการบดจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ ในขณะที่ลูกบดถูกเหวี่ยงขึ้นไปตามผนัง การบดจะเกิดการเลื่อน (slip) และการรีด (Roll) แต่การบดส่วนใหญ่แล้ว จะเกิดขึ้นในขณะที่ลูกบดตกอย่างอิสระแล้วมากระแทกวัตถุที่ต้องการลดขนาดในหม้อบด ดังนั้นยิ่งหม้อบดหมุนเร็วขึ้น ลูกบดจะถูกเหวี่ยงให้สูงและตกลงมากระแทกด้านล่างมากขึ้น ถ้าความเร็วสูงมากกว่าระดับความเร็วหนีศูนย์กลางจะทำให้ลูกบดติดอยู่ที่ผนังหม้อบดตลอดเวลา ทำให้ไม่เกิดการกระแทก เราเรียกความเร็วที่จุดเริ่มทำให้ลูกบดติดผนังว่าความเร็ววิกฤต จากการวิจัยของนักวิจัยทั่วไป พบว่าความเร็วรอบในการหมุนควรอยู่ระหว่าง 65-80% ของความเร็ววิกฤต



รูปที่ 2.9 แรงที่กระทำต่อลูกบดขณะเกิด Critical speed

เมื่อกำหนดให้

m คือ มวลของลูกบด

P คือ จุดที่แรงกระทำจากแรงโน้มถ่วง เท่ากับแรงหนีศูนย์กลาง

R คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหม้อบด

N คือ จำนวนรอบในการหมุน

ในการบดนั้นจะอยู่ภายใต้แรงสามชนิด ที่ต้องมีความสัมพันธ์กัน สอดคล้องกัน เพื่อส่งเสริมให้การบดมีประสิทธิภาพสูงสุด แรงทั้งสามชนิดคือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง

• แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ; $P = mg$ ----- (1)

• แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ; $F_c = mV^2 / R$ ----- (2)

• แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง ; $f_c = mg \cos \alpha$ ----- (3)

ถ้าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่าน้อยกว่าแรงเข้าสู่ศูนย์กลางแล้ว ลูกบดจะตกลงมาบดของที่ต้องการแต่ถ้าแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแล้ว ลูกบดจะติดผนังตลอดทำให้ไม่เกิดการบด

$$\begin{aligned} \text{แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง} &= \text{แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง} \\ mg \cos(\alpha) &= mv^2/R \end{aligned} \quad \text{----- (4)}$$

$$\cos(\alpha) = v^2/gR \quad \text{----- (5)}$$

$$v = 2\pi RN/60 \quad (\text{m/sec}) \quad \text{----- (6)}$$

โดยที่ $N =$ ความเร็วรอบของหม้อบด

แทนค่าสมการที่ (6) ลงในสมการที่ (5) จะได้ความสัมพันธ์

$$\cos(\alpha) = 4\pi^2 N^2 R / 60^2 g \quad \text{----- (7)}$$

จากสมการที่ (7) สามารถหาค่าคงที่ได้;

$$\cos(\alpha) = 0.0011 N^2 R \quad \text{----- (8)}$$

แต่เนื่องจากลูกบดก็มีรัศมีด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องนำรัศมีของลูกบดมาคิดด้วย และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงคิดค่า R จากเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ $R = D/2$ แทนค่า

$$\cos(\alpha) = 0.0011 N^2 (D-d) / 2 \quad \text{----- (9)}$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหม้อบด

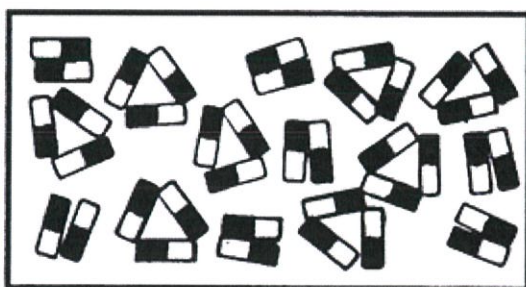
d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบด

ที่จุดความเร็ววิกฤต คือ ความเร็วที่ทำให้ลูกบดติดผนังไปตลอดนั้นคือมุม $\alpha = 0$ หรือ $\cos \alpha = 1$ และ $N = N_c$ ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (9) จะได้สมการความเร็ววิกฤต ดังนี้

$$\phi_c = \frac{n}{n_c} \quad \text{ซึ่งควรจะน้อยกว่า 1}$$

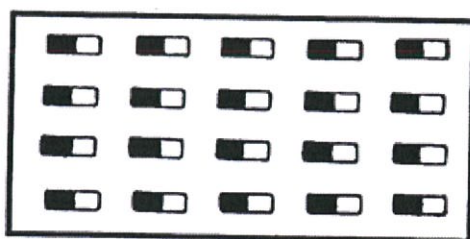
2.7 ทฤษฎีแม่เหล็ก

ทฤษฎีแม่เหล็กถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1852 โดยชาวเยอรมันชื่อเวเบอร์ (Weber) และต่อจากนั้นมาได้มีการพัฒนาทฤษฎีแม่เหล็กขึ้นในปี ค.ศ. 1890 โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่ออีวิงก์ (Ewing) สรุปเป็นทฤษฎีได้ดังนี้คือ โมเลกุลของสารทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กภายในตัวมันเองอยู่แล้ว โมเลกุลในแต่ละโมเลกุลนั้นมีขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) ถ้าสารใดไม่มีอำนาจแม่เหล็กนั้นเป็นเพราะว่าโมเลกุลเล็ก ๆ ในสารนั้น ๆ วางตัวกันอยู่ไม่เป็นระเบียบและระเกะระกะ หรือก็เนื่องมาจากโมเลกุลเหล่านี้วางตัวกันจนเป็นวงเหมือนวงแหวน ดังนั้นอำนาจแม่เหล็กจึงไม่แสดงออกมาภายนอกเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจับกลุ่มของโมเลกุล

เมื่อนำแท่งเหล็กหรือสารเหล่านี้ไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก โมเลกุลต่าง ๆ ก็จะจัดตัวเองเป็นแถวขนานกันตามทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก แต่ถ้านำแท่งเหล็กนี้ออกจากสนามแม่เหล็กแล้ว โมเลกุลอาจจะกลับไปอยู่สภาพเดิมหรือเรียงตัวกันอยู่ตลอดไป แท่งเหล็กนั้นจะแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กถาวรถึงแม้ว่าแท่งเหล็กนั้นไม่ได้วางในสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม เมื่อแท่งเหล็กแสดงอำนาจแม่เหล็กปลายข้างหนึ่งจะเป็นขั้วเหนือ ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งจะเป็นขั้วใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การปรับเรียงตัวกันของโมเลกุลนั้นจะทำให้โมเลกุลเกิดการเสียดสีกัน เป็นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียชั้นเรียกว่าการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 2.11 โมเลกุลที่เรียงตัวกัน

ทฤษฎีโมเลกุลของเวเบอร์ไม่ได้กล่าวถึงว่า

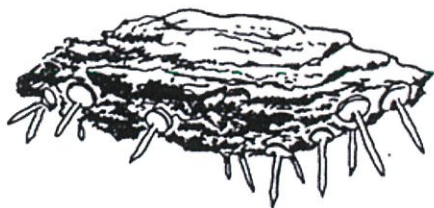
ประการแรกทำไมโมเลกุลของวัตถุใด ๆ จึงมีอำนาจเป็นแม่เหล็กในตัวมันเองได้

ประการที่สองคือทำไมจึงไม่สามารถทำให้ ไม้ อากาศและวัตถุอื่น ๆ อีกหลายชนิดเป็นแม่เหล็กได้

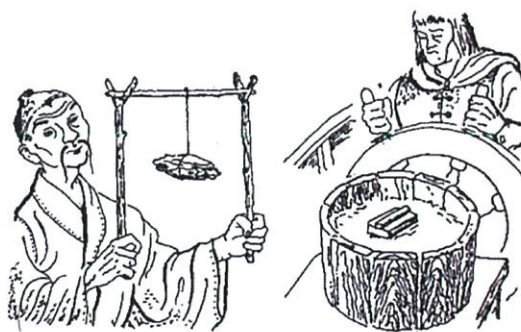
แต่นักวิทยาศาสตร์ชื่อแอมแปร์ (Ampere) ได้กล่าวถึงปัญหาว่าทำไมโมเลกุลของวัตถุใด ๆ จึงมีอำนาจเป็นแม่เหล็กในตัวมันเอง คือมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบ ๆ อะตอมของโมเลกุลอยู่ตลอดเวลา และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลและเป็นผลทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในโมเลกุลนั้นได้

ในสมัยโบราณนั้นชนชาติกรีกได้รู้จักก้อนหินชนิดหนึ่ง ซึ่งพบใกล้เมืองแมกนีเซียในตะวันออกกลาง ก้อนหินชนิดนี้มีพลังดูดเหล็กชิ้นเล็ก ๆ ให้ติดก้อนหินได้ ในปัจจุบันเราเรียกก้อนหินชนิดนี้ว่าแร่เหล็ก “แมกนีไตต์” และอำนาจที่ดูดเหล็กได้ก็คือ “อำนาจแม่เหล็ก” หินที่เกิดตามธรรมชาติที่มีอำนาจแม่เหล็กเราเรียกง่าย ๆ ว่าเป็นแม่เหล็กธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 2.12

ต่อมาได้มีผู้ค้นพบอีกว่าถ้าแขวนก้อนแมกนีไตต์นี้ตั้งในรูปที่ 2.13 และสามารถหมุนได้คล่องจะปรากฏว่าด้านหนึ่งของก้อนแมกนีไตต์จะชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ ก้อนแมกนีไตต์ที่ผู้แขวนไว้ด้วยเชือกนี้จะใช้บอกทิศ ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นโลดสโตน (Lodestone) ซึ่งแปลว่าหินชี้ทิศ โดยสมัยโบราณนั้นจะนิยมใช้หินชี้ทิศนี้บอกทิศทางของการเดินทาง มักจะนำไปใช้กับนักเดินเรือ และการที่ก้อนแมกนีไตต์นี้ชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ ก็เพราะว่าที่ขั้วโลกเหนือของโลกมีขั้วแม่เหล็กโลกคอยดึงดูดอยู่นั่นเอง



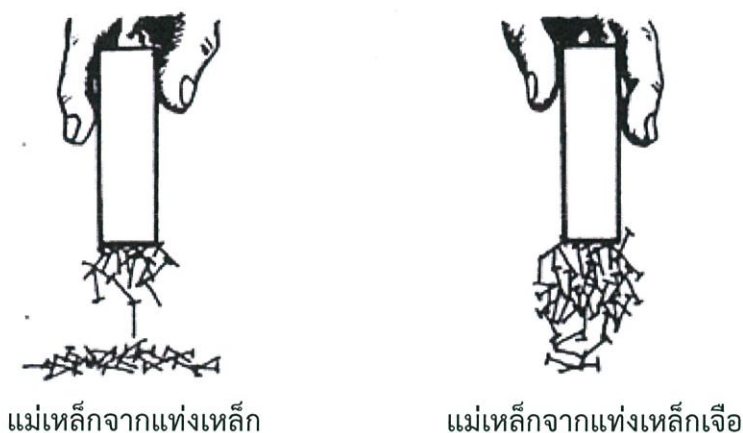
รูปที่ 2.12 แม่เหล็กธรรมชาติ



รูปที่ 2.13 แม่เหล็กโบราณ

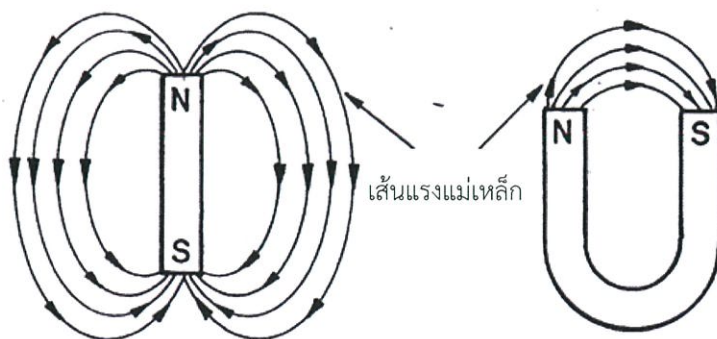
แม่เหล็กธรรมชาตินั้นสามารถนำไปผลิตแม่เหล็กประดิษฐ์ได้ด้วยวิธีง่าย ๆ คือนำก้อนแมกนีไตต์นั้นไปถูเข้ากับแท่งเหล็ก 3-4 ครั้ง แท่งก็จะกลายเป็นแม่เหล็กประดิษฐ์ ส่วนวิธีอื่นที่จะทำเป็นแม่เหล็กอีกวิธีหนึ่งคือการใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจนเป็นแม่เหล็ก วัสดุแม่เหล็กนั้นยังมีโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก แต่สามารถทำให้เป็นแม่เหล็กมีอำนาจแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กแท้ ๆ วัสดุที่มีอำนาจแม่เหล็ก

มาก ๆ นั้นมาจากเหล็กที่ผสมนิกเกิลและโคบอลต์ เรียกแม่เหล็กนี้ว่าแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กเจือ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แท่งเหล็กที่สามารถทำเป็นแม่เหล็กได้ง่ายคือเหล็กอ่อน แต่ก็สูญเสียอำนาจแม่เหล็กได้เร็ว แม่เหล็กที่ทำมาจากเหล็กอ่อนเรียกว่าแม่เหล็กชั่วคราว และแม่เหล็กที่ทำมาจากโลหะผสมของเหล็กจะมีอำนาจได้ยาวนานกว่าเหล็กอ่อนมากเรียกว่าแม่เหล็กถาวร โดยอำนาจแม่เหล็กจะมีความเข้มข้น ณ จุดสองจุดคือที่ปลายแท่งแม่เหล็กเราเรียกว่าขั้วแม่เหล็กโดยปลายด้านหนึ่งเป็นขั้วเหนือส่วนขั้วใต้จะอยู่ตรงข้ามกันกับขั้วเหนือ แม่เหล็กจะมีรูปร่างลักษณะขนาดและพลังที่แตกต่างกันแม่เหล็กถาวรมักจะทำจากแท่งเหล็กตรงหรือแท่งโค้งรูปเกือกม้า



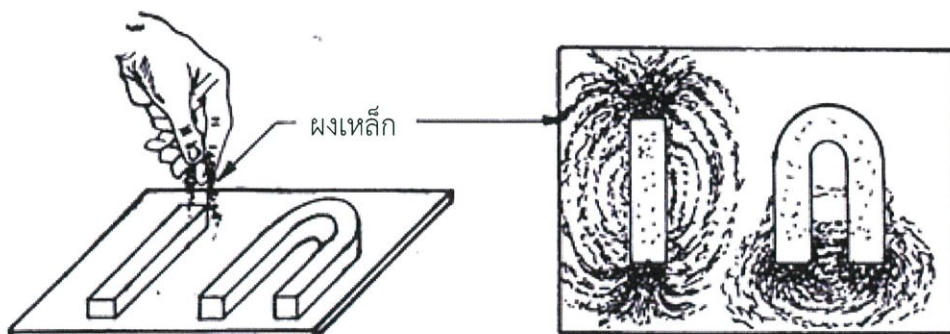
รูปที่ 2.14 อำนาจจากแท่งเหล็กและจากแท่งเหล็กเจือ

อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาซึ่งเปรียบเทียบกับกระแสลมถึงแม้จะมีอนุภาพมากแต่ก็ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา อำนาจแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเรามองไม่เห็น แต่ก็สามารถรู้ได้ด้วยความรู้สึกอำนาจแม่เหล็กจะวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เรียกว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux line) ดังแสดงในรูปที่ 2.15

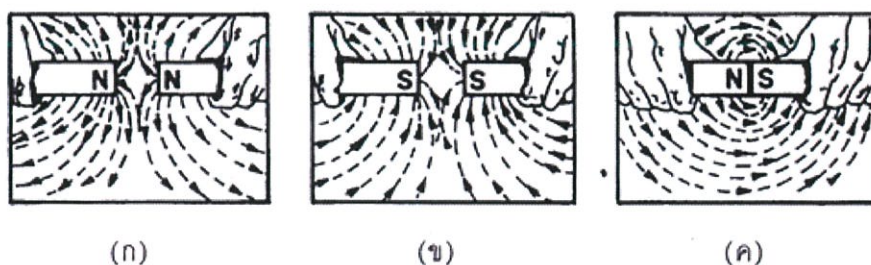


รูปที่ 2.15 เส้นแรงแม่เหล็ก

วิธีที่จะแสดงให้เห็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กรอบแม่เหล็กนั้น สามารถทำได้โดยการวางแม่เหล็กแท่งและแม่เหล็กเกือกม้าบนแผ่นพลาสติกแล้วค่อย ๆ โรยผงเหล็ก(ผงตะไบเหล็ก) ลงรอบ ๆ แม่เหล็กบนแผ่นพลาสติกนั้น และทำการเคาะเบา ๆ จะเห็นว่าผงเหล็กเหล่านั้นเรียงกันเป็นเส้นอยู่รอบ ๆ ขั้วแม่เหล็กแสดงให้เห็นถึงแนวของเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กนั้นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



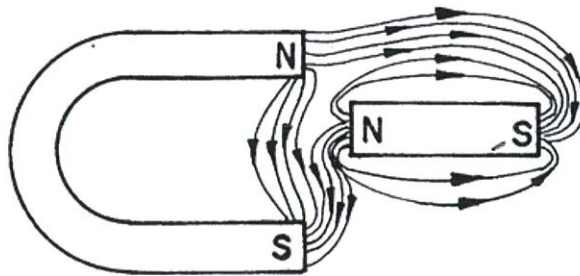
รูปที่ 2.16 วิธีสาธิตแม่เหล็กด้วยผงเหล็ก



รูปที่ 2.17 การผลักและดูดของแม่เหล็ก

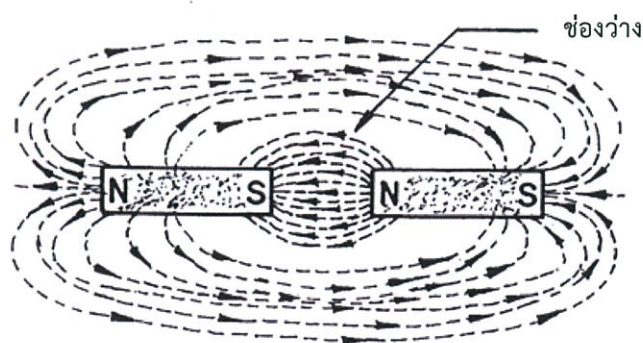
เมื่อนำขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือของแม่เหล็ก 2 แท่งหันเข้าหากันจะเกิดการผลักกันดังรูปที่ 2.17(ก) ซึ่งสามารถรู้สึกได้และในทำนองเดียวกันถ้านำขั้วใต้หันเข้าหากันบ้างก็จะมีแรงผลักรอกจากกันอีกดังรูปที่ 2.17(ข) แต่ถ้าหากนำขั้วเหนือและขั้วใต้หันเข้าหากันขั้วแม่เหล็กทั้งสองจะดูดกันดังรูปที่ 2.17(ค) ซึ่งเหมือนกันกับไฟฟ้าสถิต คือประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะผลักกันและประจุไฟฟ้าต่างกันจะดูดกันอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากการดูดและผลักกันของแท่งแม่เหล็กนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็กนั้นโดยเส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ส่วนภายในแท่งแม่เหล็กเองเส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วใต้ไปยังขั้วเหนือ คุณสมบัติอีกอันหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นนั้นจะผลักกัน จะไม่มีเส้นแรงแดดกัน หรือรวมกันเป็นเส้นเดียว ถ้าวางแท่งแม่เหล็กสองแท่ง

ไว้ใกล้กันดังแสดงในรูปที่ 2.18 เส้นแรงแม่เหล็กจะปรับลักษณะทางเดินใหม่ และไม่มีคววนใดในโลกที่จะกั้นเส้นแรงแม่เหล็กได้ เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิดซึ่งจะแตกต่างกันก็ตรงที่วัตถุบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยาก และบางชนิดเส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ง่าย ซึ่งวัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อยหรือมีความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ต่อเส้นแรงแม่เหล็ก โดยความต้านทานแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กก็เหมือนกันกับความต้านทานในวงจรไฟฟ้านั่นเอง เส้นแรงแม่เหล็กจะเดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำและเนื่องจากอากาศมีความต้านทานแม่เหล็กสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินผ่านเหล็กได้ง่ายกว่าอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเข้มขอสนามแม่เหล็กในวงจรใดก็ตามให้เพิ่มเหล็กเข้าไปในวงจรนั้น

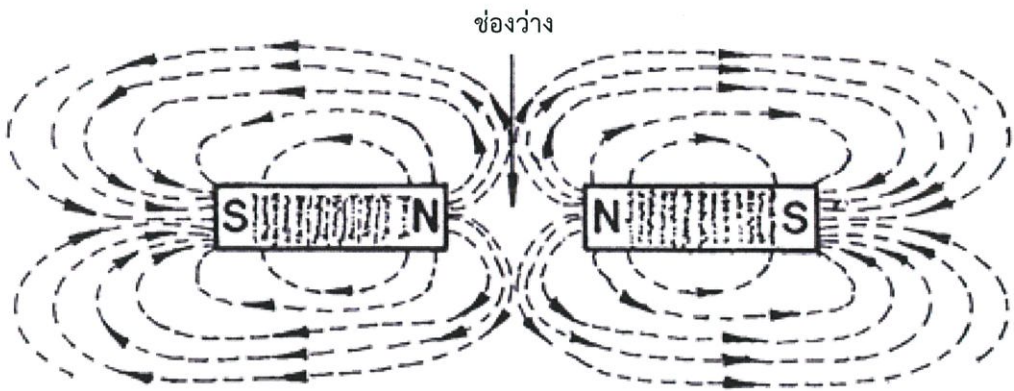


รูปที่ 2.18 การปรับลักษณะทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะมีลักษณะประหนึ่งที่ยึดติดดังแสดงในรูปที่ 2.19 สังเกตที่ช่องว่างระหว่าง ขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจะโค้งออกเล็กน้อยจากขั้วเหนือสู่ขั้วใต้ สาเหตุที่เส้นแรงแม่เหล็กต้องโค้งออกเพราะว่าเส้นแรงแแต่ละเส้นมีแรงผลักรัน ตัวเส้นแรงแม่เหล็กเองจะพยายามยึดรักษาความคงเส้นของตัวไว้ด้วยแรงดึง (tension) ในตัวเอง จึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กโค้งออกเล็กน้อย

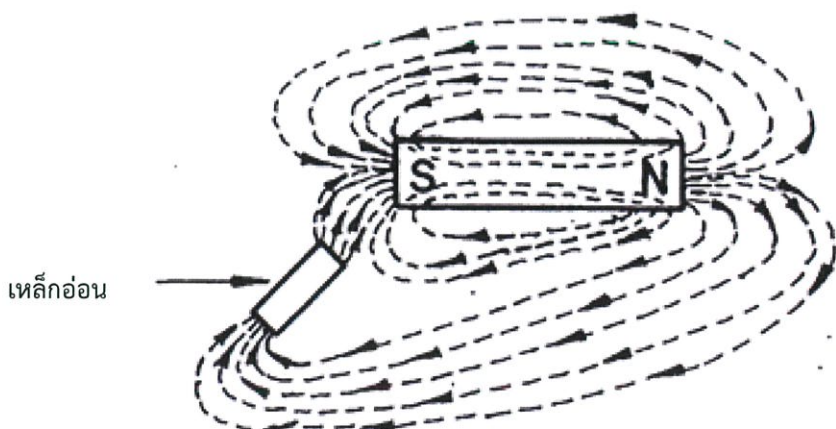


รูปที่ 2.19 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วต่างกันติดกัน



รูปที่ 2.20 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันผลักกัน

ถ้าวางแท่งแม่เหล็ก 2 แท่งที่มีขั้วเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.20 คือขั้วเหนือหันเข้าหากัน เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วเหนือของแม่เหล็กทั้งสองจะมีเส้นแรงแวงออกมาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับจะสวนทางกัน แต่เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ตัดกัน เส้นแรงแม่เหล็กจึงพยายามเบี่ยงเบนหรือเลี้ยวออกจากกัน โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะเลี้ยวออกไปทางด้านข้างของขั้วแม่เหล็กและจะขนานกันออกไป แรงผลักระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองจะรู้สึกได้ว่าเป็นแรงผลักระหว่างแม่เหล็ก



รูปที่ 2.21 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน

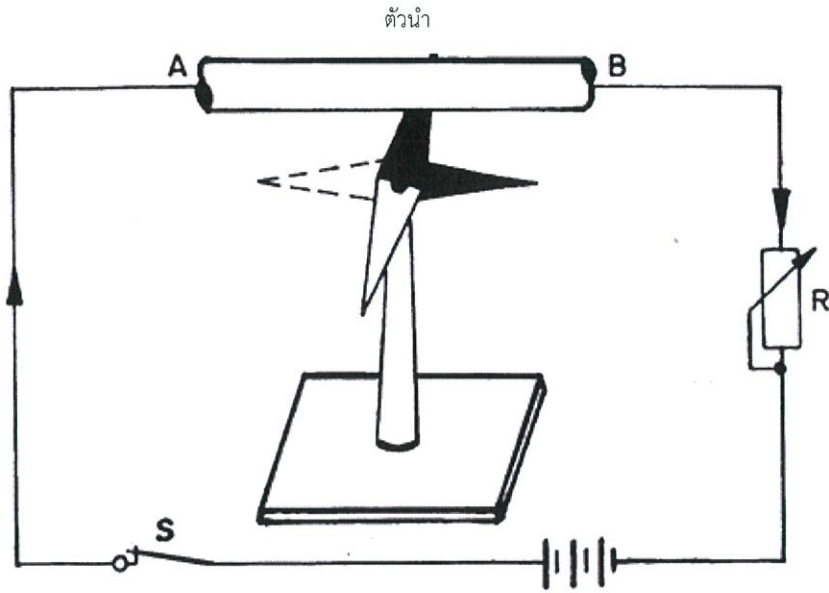
จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอยู่ในพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตร เรียกว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นทางการที่เส้นแรงแม่เหล็กใช้เป็นทางเดินหรือเป็นจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออก ก็คือขั้วแม่เหล็ก ทางเดินนี้เรียกว่าวงจรแม่เหล็ก (magnetic circuit) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านก้อนวัตถุใด ๆ จะมีค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น ๆ เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเท่าค่าสูงสุด วิ่งผ่านวัตถุใดเรียกว่าวัตถุนั้นถึงจุดอิ่มตัวต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (saturation) และอำนาจแม่เหล็กนั้น อาจทำให้เกิดขึ้นได้ในสารที่ยังมิได้เป็นแม่เหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ คือถ้าเราวางแท่งแม่เหล็กอ่อน แท่งหนึ่งลงในสนามแม่เหล็กถาวร ในระยะเวลาที่ไม่นานนักเหล็กอ่อนนั้นจะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น เพราะถูกเหนี่ยวนำ สาเหตุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นในขณะนี้ เป็นเพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ใน อากาศจะพยายามเบนวิ่งเข้าหาแท่งเหล็กอ่อนดังแสดงในรูปที่ 2.21 เหล็กอ่อนนั้นมีความต้านทาน แม่เหล็กน้อยกว่าอากาศขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านเหล็กอ่อนโมเลกุลของเหล็กอ่อนจะเรียงตัวกัน ใหม่ให้ขนานกับแนวเส้นแรงแรงนั้นด้วย ในขณะนี้เองแท่งเหล็กอ่อนซึ่งถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็ก และเกิดขั้วเหนือขั้วใต้ดังแสดงใน รูปที่ 2.21

ต่อมาถ้ายกแท่งเหล็กถาวรออก แท่งเหล็กอ่อนจะสูญเสียพลังอำนาจแม่เหล็กลงไปมาก แต่ก็ไม่ถึงกับเป็นศูนย์เพราะจะมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างอยู่บ้าง อำนาจแม่เหล็กนี้เรียกว่าอำนาจแม่เหล็ก ตกค้าง (Residual flux หรือ residual magnetism)

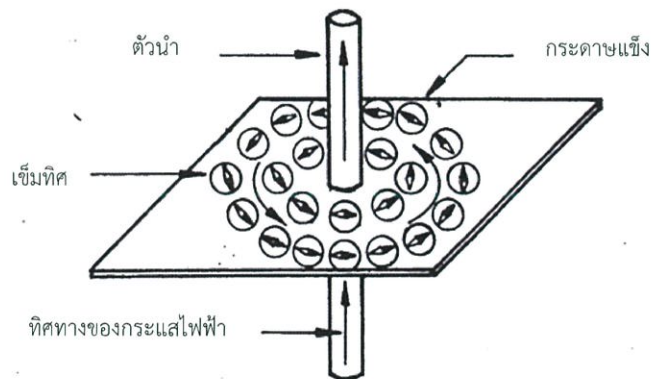
2.7.1 แม่เหล็กไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ ชาวเดนมาร์ก ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิด สนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ การทดลองของเออร์สเตดนั้นแสดงในรูปที่ 2.22 โดนกการนำเอาลวดตัวนำไฟฟ้า AB ต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น เมื่อจ่าย กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะ ตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทางเข็มทิศจะเบนกลับทางไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่ง ทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศา กับเข็มทิศแล้ว เข็ม ทิศจะไม่เบี่ยงเบนไปในทิศทางใดๆเลย

เออร์สเตดยังได้ค้นพบอีกว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ประกอบไปด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำกระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้นโดย ตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนี้ถ้ายังอยู่ห่าง อำนาจแม่เหล็กยิ่งน้อยการเกิดสนามแม่เหล็กนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.23 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหล ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตาม ตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางของเข็มทิศจะหันเหเรียงตามกันไป เป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนด้วยขั้วเหนือ และสีขาวแทนด้วยขั้วใต้หรืออาจใช้ผงเหล็กโรย โดยจะสังเกตเห็นว่า ผงเหล็กจะจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม

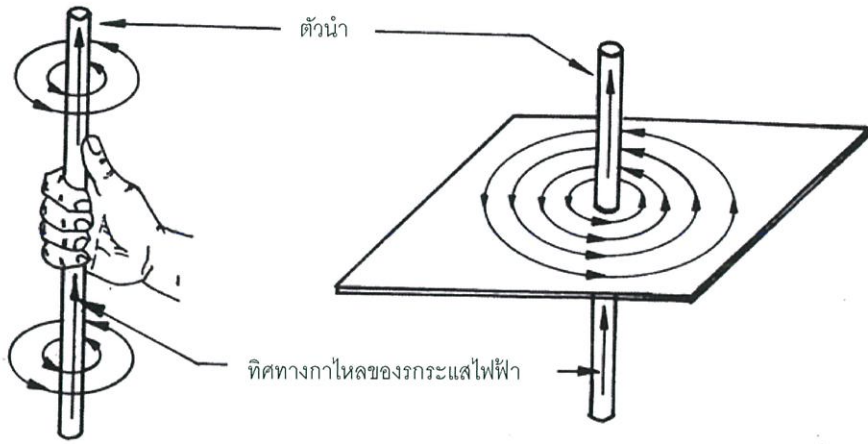


รูปที่ 2.22 การทดลองของเออสเตด



รูปที่ 2.23 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

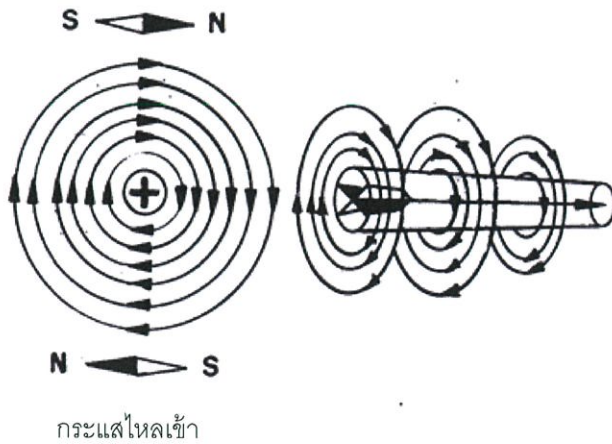
ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำดังแสดงในรูป 2.24



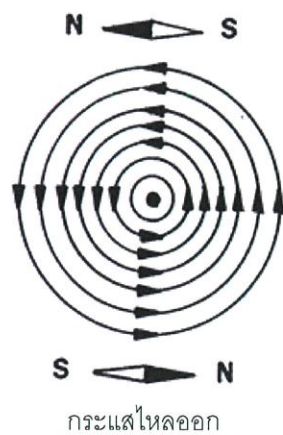
รูปที่ 2.24 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

ลูกศรที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าจะใช้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้า โดยจะกำหนดให้ด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าซึ่งเห็นกันลูกศรนั้นแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไหลออก ซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรแทนด้วยเครื่องหมายจุด (.) และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.25 และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในเส้นลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.26

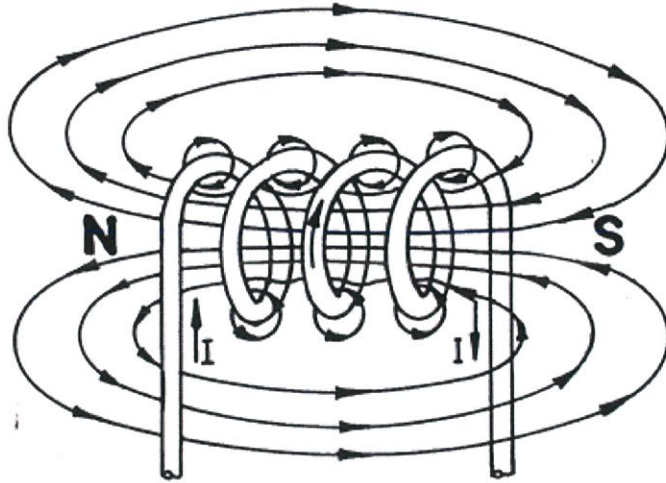
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา



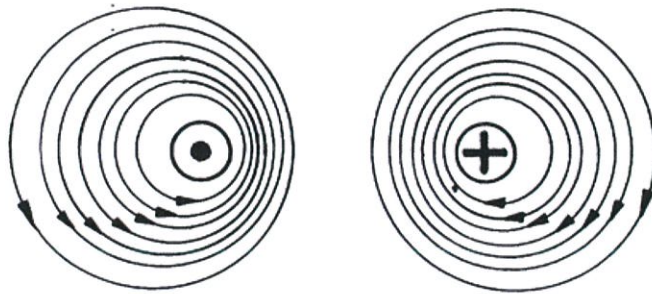
เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



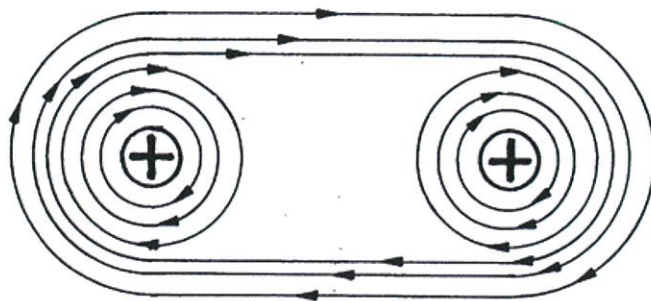
รูปที่ 2.25 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ



รูปที่ 2.26 เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดในขดลวด



(ก) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางตรงข้ามกันในตัวนำที่วางขนานกัน



(ข) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน

รูปที่ 2.27 ทิศทางการไหลของกระแส

เมื่อนำตัวนำสองตัวมาวางขนานกันและมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ ตัวนำทั้งสองสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้า

ไหลออกแสดงด้วยจุด คือตัวนำด้านซ้ายมือ และตัวนำด้านขวาให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำทางด้านซ้ายมือ จะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนตัวนำทางด้านขวามือที่กระแสไหลเข้า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำทั้งสอง นั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักรันกันขึ้นระหว่างตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้น

แต่ถ้านำตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้นกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกัน โดยสมมติให้กระแสไหลเข้าดังรูปที่ 2.27(ข) ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทางด้านซ้ายจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทางด้านขวาก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน จึงทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดแรงดึงดูดกันขึ้น ตัวนำทั้งสองถูกดึงเข้ามาใกล้กัน

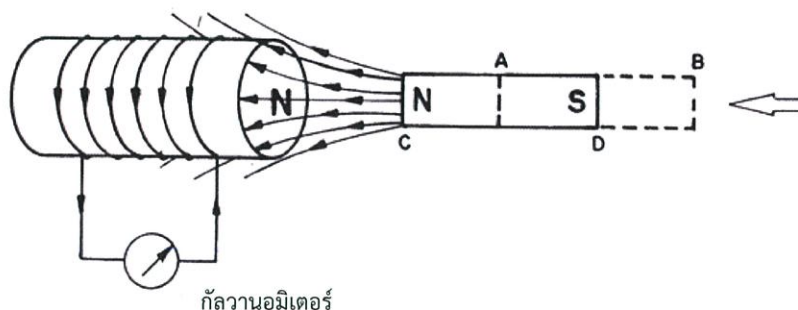
2.8 การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

นับตั้งแต่ที่แฮนดริคคริสเตียน เออสเตดนักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กได้พบว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น และต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายคนได้เริ่มทำการค้นคว้าเพื่อที่จะได้หลักการ และปรากฏการณ์กลับกันกับเออสเตด จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1821 ได้มีนักวิทยาศาสตร์ คือไมเคิลฟาราเดย์ (Michael Faraday) ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์และเคมีชาวอังกฤษ ได้ทำการทดลองและค้นพบเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของแม่เหล็กไฟฟ้า และฟาราเดย์ได้ตั้งกฎเกณฑ์ เกี่ยวกับไฟฟ้าและแม่เหล็กตลอดจนไฟฟ้าสถิตไว้หลายอย่าง

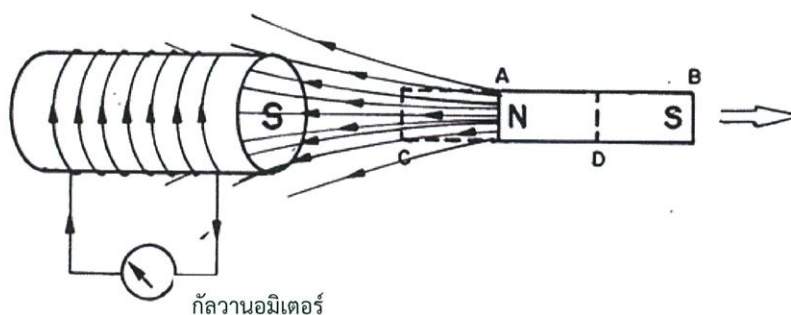
การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในลวดตัวนำนั้นสามารถทดลองได้ดังนี้

นำขดลวดตัวนำที่พันไว้บนฉนวนทรงกระบอก โดยปลายทั้งสองของขดลวดต่อเข้ากับมิลลิโวลต์มิเตอร์ หรือกัลวานอมิเตอร์ชนิดที่ตำแหน่งศูนย์อยู่กึ่งกลาง และนำไปวางไว้ด้านหน้าของแท่งแม่เหล็กถาวรตำแหน่ง AB ตามรูปเส้นประดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) จะเห็นว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนส่งไปยังขดลวด ขณะนี้เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนแต่อย่างใด แต่ถ้าเราผลักแท่งแม่เหล็กถาวรนั้นเข้าไปหาขดลวด คือเคลื่อนที่จากตำแหน่ง AB ไปยัง CD ในขณะที่เรากำลังผลักแท่งแม่เหล็กเข้าไปขดลวดนั้น จะทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์เกิดการเบี่ยงเบนไปในทิศทางหนึ่ง ซึ่งหลังจากนั้นเข็มกัลวานอมิเตอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ดังเดิม ในขณะที่แท่งแม่เหล็กวางอยู่เฉย ๆ ที่ตำแหน่ง CD

การทดลองในครั้งต่อไปถ้าเราดึงแท่งแม่เหล็กกลับจากตำแหน่ง CD มาอยู่ที่ตำแหน่ง AB ที่เดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ข) จะสังเกตเห็นว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะเกิดการเบี่ยงเบนอีกครั้งหนึ่งแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับครั้งแรก และเมื่อเราหยุดการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กไว้ที่ตำแหน่ง AB จากนั้นเข็มของกัลวานอมิเตอร์ก็จะกลับไปชี้ที่ตำแหน่งศูนย์อีกเช่นเดิม



(ก)



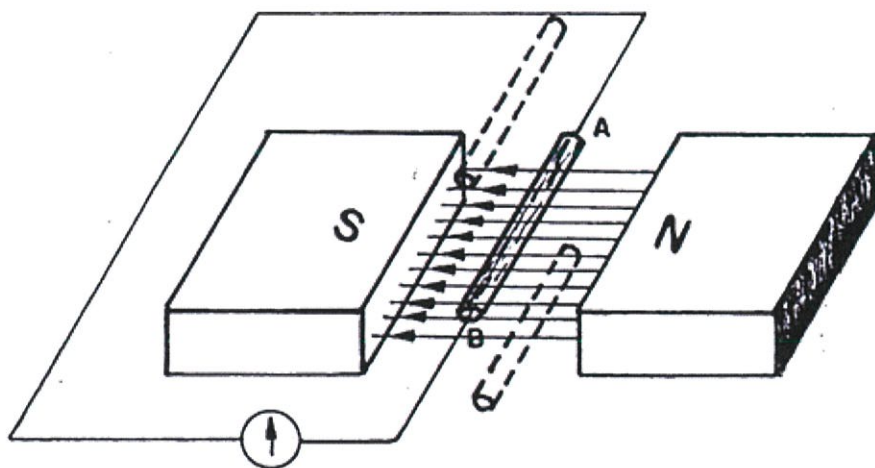
(ข)

รูปที่ 2.28 การเกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ

จากการทดลองทั้งสองครั้ง จะเห็นว่าการเบี่ยงเบนของเข็มกัลป์วานอมิเตอร์แสดงถึงการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตัวนำ และการเหนี่ยวนำนี้การขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำกับขดลวด การเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นอยู่นานเท่าที่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเท่านั้น ถึงแม้ว่าแม่เหล็กถาวรนั้นจะมีเส้นแรงแม่เหล็กมากเท่าใดก็ตาม แต่ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กก็จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าในขดลวดนั้น แต่ถ้าเราเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดให้มากขึ้น เข็มของกัลป์วานอมิเตอร์จะเกิดการเบี่ยงเบนมากขึ้น แสดงว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากขึ้น ถ้าเราเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็ก หรือถ้าเพิ่มแท่งแม่เหล็กให้ใหญ่ขึ้นก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าในกรณีนี้สามารถสรุปได้คือ

- (1) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
- (2) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กหรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- (3) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดกับตัวนำ

การทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตัวนำอาจจะทำได้อีกวิธีหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.29 โดยการนำขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กคือนำขดลวดตัวนำ AB ต่อเข้ากับกัลวานอมิเตอร์และวางไว้ในสนามแม่เหล็กต่อนั้นทำการเคลื่อนขดลวดตัวนำนั้นขึ้นข้างบน ในขณะที่กำลังเคลื่อนตัวนำอยู่นั้น จะสังเกตเห็นว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะเกิดการเบี่ยงเบนไปในทิศทางหนึ่ง แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นและมีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ แต่ถ้าเราหยุดการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกลับไปชี้ที่ตำแหน่งศูนย์ตามเดิม แสดงว่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้นสิ้นสุดลง แต่ถ้าต่อไปเคลื่อนที่ขดลวดตัวนำผ่านเส้นแรงแม่เหล็กลงด้านล่างบ้าง จะสังเกตเห็นว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะเกิดการเบี่ยงเบนอีกครั้ง แต่มีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก นั้นแสดงว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นใหม่อีก และมีทิศทางตรงกันข้าม และถ้าเราเคลื่อนที่ขดลวดตัวนำให้เร็วกว่าเดิมก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้น หรือถ้าเราเปลี่ยนแท่งแม่เหล็กให้มีความเข้มมากขึ้นและเคลื่อนที่ตัวนำด้วยความเร็วเท่าเดิม ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้นด้วย และถ้าเราสามารถเพิ่มความยาวของตัวนำในส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กให้ยาวขึ้นก็จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นเพิ่มมากขึ้นด้วย แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ตัวนำขนานไปกับเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.29 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก

ดังนั้นสรุปได้ว่าการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะขึ้นอยู่กับดังต่อไปนี้คือ

- (1) ความยาวของขดลวดตัวนำในส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก
- (2) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- (3) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ

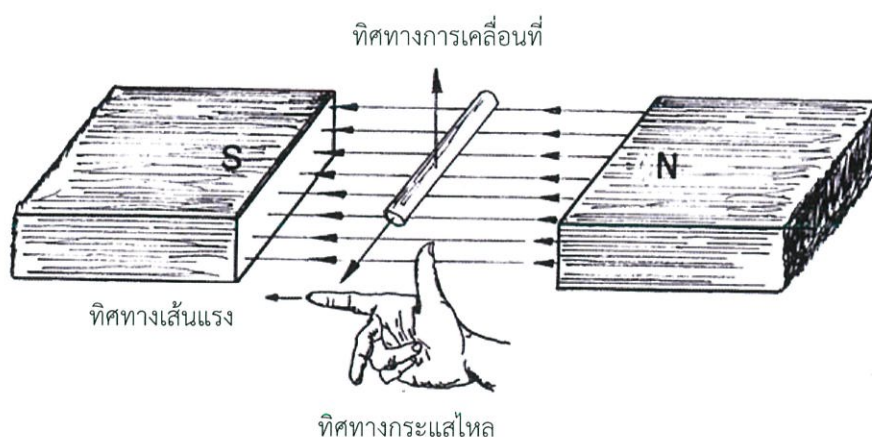
2.8.1 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ

ฟาราเดย์ได้สรุปผลจากการทดลอง เป็นกฎของการเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้สองข้อคือ

- (1) เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงต่อตัวนำย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำนั้นหรือตัวนำตัดกับสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เช่นกัน
- (2) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

2.8.2 กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง (Fleming's Right Hand Rule)

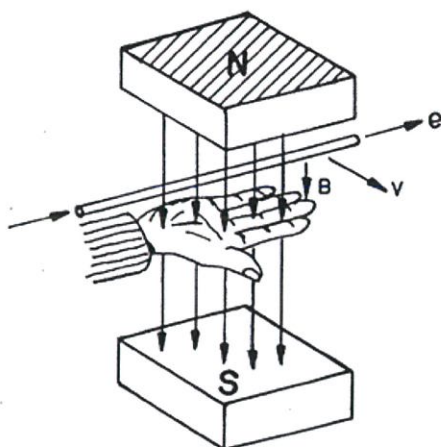
ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง แสดงได้ในรูปที่ 2.30 ทำได้โดยกางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้และนิ้วกลางของมือขวาให้ตั้งฉากกัน โดยนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทาง การเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้ชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ส่วนนิ้วกลาง จะชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำนั้น



รูปที่ 2.30 การใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง

2.8.3 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านอกจากจะหาโดยอาศัยกฎมือขวาของเฟลมมิ่งแล้ว เรายังสามารถใช้กฎของเลนซ์หาได้อีกด้วย ทำได้โดยการแบ่มือขวาดังแสดงในรูปที่ 2.31 ให้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งเข้าหาด้านหลังหน้าของฝ่ามือ นิ้วทั้งสี่ชี้ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนนิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ กฎของเลนซ์นี้ค้นพบในปี ค.ศ. 1835



รูปที่ 2.31 การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าโดยใช้กฎเกณฑ์ของเลนซ์

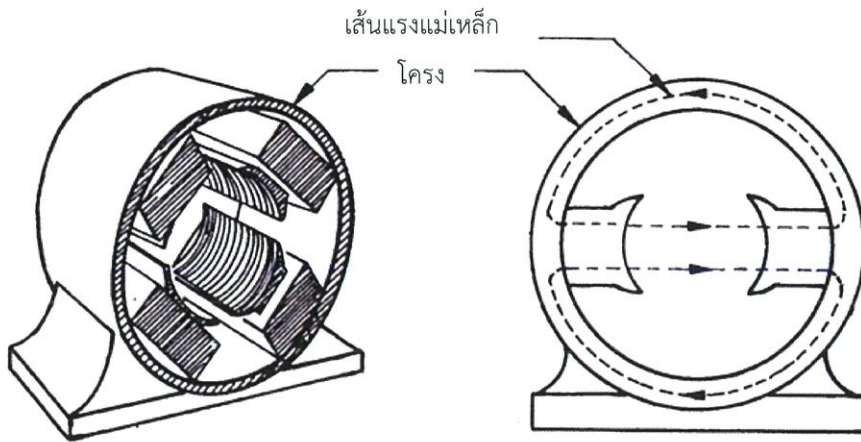
นอกจากนี้ยังคงค้นพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้า ย่อมไหลสวนทางกับกระแสที่ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กนั้น ถ้าเราพิจารณาจากรูปที่ 2.28 (ก) ในขณะที่เราผลักขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเข้าไปในขดลวด ในเวลาเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด เนื่องจากเหนี่ยวนำ ก็จะสร้างขั้วเหนือขึ้นในทิศทางที่เราพยายามผลักเข้าไป นั่นแสดงว่าเราพยายามผลักขั้วเหนือเข้าไปในขดลวดยาวมาก ส่วนรูปที่ 2.28 (ข) นั้น ขณะที่เราดึงขั้วเหนือออกจากขดลวด กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำในขดลวดก็จะสร้างขั้วใต้ขึ้นในทิศทางที่เราดึงขั้วเหนือ ออกมาว่าเราพยายามผลักก็ไม่เข้า หรือพยายามดึงก็ไม่ออก จากผลการทดลองนี้เนื่องจากพลังงานกล ที่เราป้อนเข้าไปเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นกฎของเลนซ์จึงเปรียบเทียบเสมือนกฎของการเปลี่ยน พลังงาน และพลังงานนี้ก็มีทิศทางกันเสมอ หรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้า ไหลนั้นจะมีทิศทางต้านกันเสมอ หรือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าไหลนั้นจะมี ทิศทางต้านกับพลังงานที่พยายามกระทำให้เกิดกระแสนั้นๆ และค่าของพลังงานที่เกิดขึ้น ย่อมเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามกฎเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของนิวตัน คือกิริยาเท่ากับปฏิกิริยา (action = reaction)

2.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.9.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์

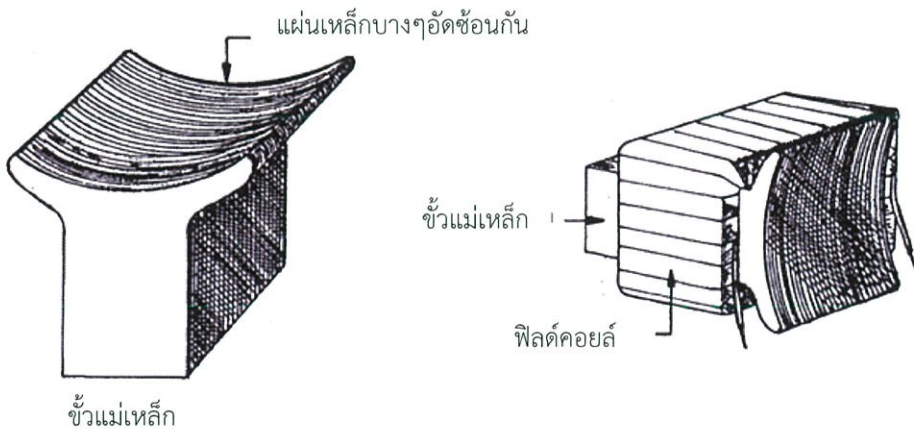
ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator Part) ประกอบด้วย

- 1 เปลือกหรือโครง (Frame or yoke) ทำมาจากเหล็กหล่อ หรือสารแม่เหล็ก ทำหน้าที่คือ
 - (1) ยึดขั้วแม่เหล็ก และส่วนประกอบทั้งหมด
 - (2) เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.32 เปลือกหรือโครง

2. ขั้วแม่เหล็ก (Pole shoes) ทำมาจากแผ่นเหล็กบาง ๆ อัดเข้าด้วยกัน โดยแต่ละแผ่นจะเคลือบไว้ด้วยฉนวน ขั้วแม่เหล็กนี้จะยื่นออกมาจากโครง โดยขั้วแม่เหล็กนี้จะถูกยึดเข้ากับโครงด้วยสกรู ลักษณะของขั้วแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.33

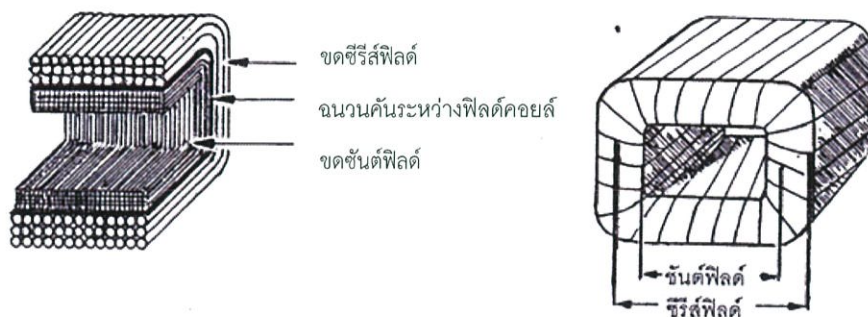


รูปที่ 2.33 ขั้วแม่เหล็ก

3. ขดลวดสนามแม่เหล็ก หรือเรียกว่าขดลวดฟิลต์คอยล์เป็นลวดตัวนำที่พันไว้รอบขั้วแม่เหล็ก ขดลวดสนามแม่เหล็กจะพันจากภายนอก แล้วสวมเข้ากับขั้วแม่เหล็ก ซึ่งขั้วแม่เหล็กนั้นสามารถถอดได้ ขดลวดสนามแม่เหล็กนี้ต้องมีขนาดที่พอดี คือไม่แน่นหรือหลวมจนเกินไป เพราะถ้าแน่นจนเกินไปขณะประกอบอาจทำให้ขดลวดเกิดการร้าวลงดินได้ และในขณะเดียวกันถ้าหลวมจนเกินไปก็อาจทำให้เกิดอาการสั่นของขดลวดในขณะใช้งาน และจะทำให้ปิดฝาครอบหัวท้ายไม่ได้อีกด้วย ขดลวดสนามแม่เหล็กทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ขดลวดฟิลต์คอยล์มี 2 ชนิด คือ

- (1) ขดลวดชั้นฟิลต์ ขดลวดนี้จะพันด้วยลวดเหล็กเส้นเล็กดังนั้นความต้านทานจะสูง
- (2) ขดลวดซีรีส์ฟิลต์ ขดลวดนี้จะพันด้วยลวดเส้นใหญ่ดังนั้นความต้านทานจะต่ำ

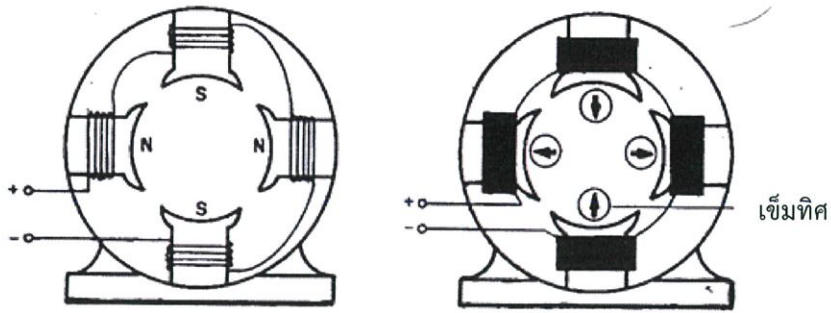
ขดลวดทั้งสองชุดนี้พันอยู่บนแกนขั้วแม่เหล็กอันเดียวกันโดยขดลวดชั้นฟิลต์จะพันอยู่ด้านในสุด ส่วนขดลวดซีรีส์ฟิลต์จะพันไว้ด้านนอกสุดและมีจำนวนรอบเพียงเล็กน้อย จะต้องมีความถี่ระหว่างขดลวดชั้นฟิลต์กับขดลวดซีรีส์ฟิลต์ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.34 ขดลวดทั้งสองชุดจะต้องพันไปในทิศทางเดียวกันและขดลวดในแต่ละชุดนั้นจะต้องต่ออนุกรมเข้าด้วยกันระหว่างขั้วแม่เหล็กให้ถูกต้องด้วย เพราะจะทำให้ขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.35



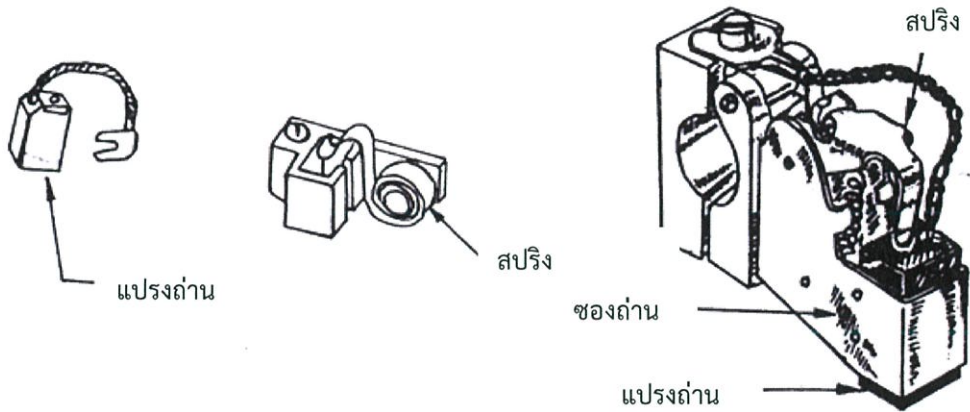
รูปที่ 2.34 ขดลวดสนามแม่เหล็ก

การตรวจสอบการต่อว่าถูกต้องหรือไม่นั้นเราสามารถตรวจสอบได้ด้วยการใช้เข็มทิศ หรือใช้แท่งแม่เหล็กถาวรตรวจสอบ โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฟิลต์คอยล์ และใช้เข็มทิศหรือแท่งแม่เหล็กถาวรสอดเข้าไปที่ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้ว ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะต้องสลับกันไปเมื่อทำการตรวจสอบขดชั้นฟิลต์แล้ว ก็ทำให้การตรวจสอบขดซีรีส์ฟิลต์ในทำนองเดียวกัน และขั้วแม่เหล็กที่แสดงออกเนื่องจากซีรีส์ฟิลต์นั้น จะต้องเหมือนกันกับขั้วแม่เหล็กที่ได้ขดชั้นฟิลต์

4. แปรรงถ่านและแบรีง แปรรงถ่านทำหน้าที่เป็นสะพานไฟคอมมิวเตเตอร์ไปยังวงจรรภายนอก แปรรงถ่านทำมาจากคาร์บอนอัดแน่นจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าบรรจุอยู่ในช่องถ่าน โดยที่แปรรงถ่านนี้จะมีลวดทองแดงถักติดอยู่ด้วยเพื่อต่อไฟออกไปใช้งานและถูกกดด้วยสปริงให้สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ตลอดเวลา และช่องถ่านจะถูกยึดติดอยู่กับฝาครอบ ส่วนแบรีงหรือตัลลึงป็นนั้นจะเป็นตัวรับน้ำหนักทั้งหมดที่ได้จากตัวหมุน และช่วยลดแรงเสียดทานของเพลอาขณะทีอาร์เมเจอร์หมุนปกติ แบรีงจะยึดติดอยู่กับฝาครอบทั้งสองด้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแปรรงถ่านและช่องถ่านดังแสดงในรูปที่ 2.36 ในเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะต้องมีแปรรงถ่านอย่างน้อยสองแปรง และแปรรงถ่านทั้งสองต้องสามารถหมุนปรับตำแหน่งได้พร้อมกัน ดังนั้นช่องถ่านทั้งสองจะต้องอยู่บนตัวปรับอันเดียวกันด้วย



รูปที่ 2.35 การตรวจสอบการต่อขดลวดฟิลต์คอยล์

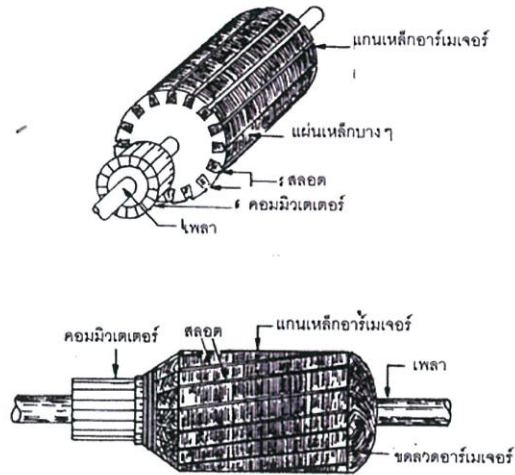


รูปที่ 2.36 แปรงถ่านและช่องถ่าน

5. ฝาปิดหัวท้ายหรือฝาครอบ ทำมาจากเหล็กหล่อชนิดเดียวกับโครงทำหน้าที่รองรับเพลลาของส่วนหมุน และยึดช่องแปรงถ่าน

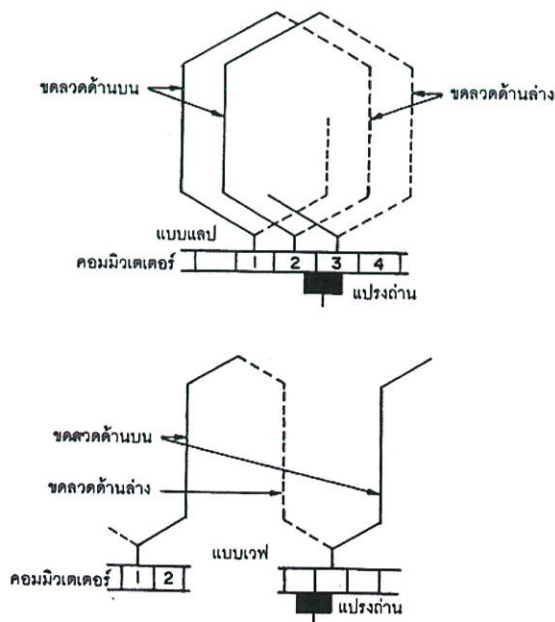
ส่วนที่เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

1. แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ทำมาจากแผ่นเหล็กบาง ๆ ที่ด้านหนึ่งฉาบด้วยฉนวนอัดซ้อนเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์ซิส และกระแสไหลวนในแกนเหล็ก แกนเหล็กอาร์เมเจอร์นี้ทำเป็นช่องสอดไว้ดังรูปที่ 2.37 แกนเหล็กอาร์เมเจอร์เป็นที่ยอมรับบรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ และที่แกนเหล็กอาร์เมเจอร์นี้จะเจาะรูไว้ด้วย เพื่อช่วยระบายความร้อนที่สูญเสียไป



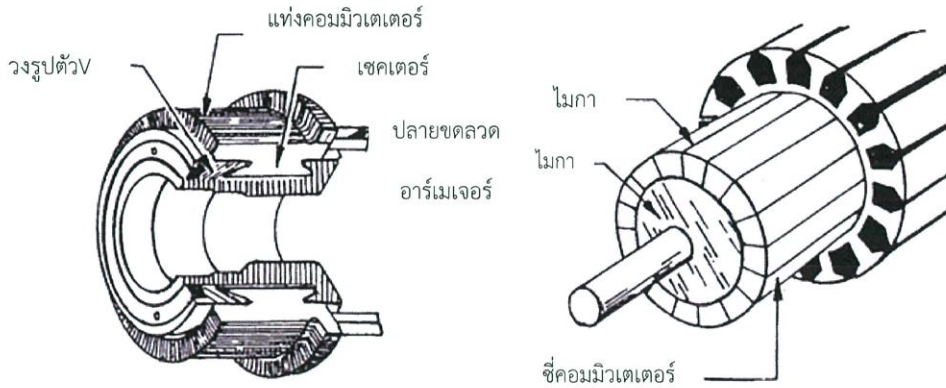
รูปที่ 2.37 แกนเหล็กอาร์เมเจอร์

2. ขดลวดอาร์เมเจอร์ คือขดลวดที่บรรจุลงในช่องสลอตของแกนเหล็กอาร์เมเจอร์โดยขดลวดนั้นทำมาจากลวดทองแดงอาบฉนวน ขดลวดอาร์เมเจอร์จะนิยมพันจากแบบภายนอกแล้วจึงนำไปบรรจุลงในสลอต เพราะจะทำให้ขดลวดแต่ละขดมีความยาวและมีน้ำหนักสมดุลไม่เกิดการแกว่งขณะหมุน ขดลวดอาร์เมเจอร์มีการพันเป็นแบบแลป หรือแบบเวฟ ปลายของขดลวดจะถูกนำมาต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.38

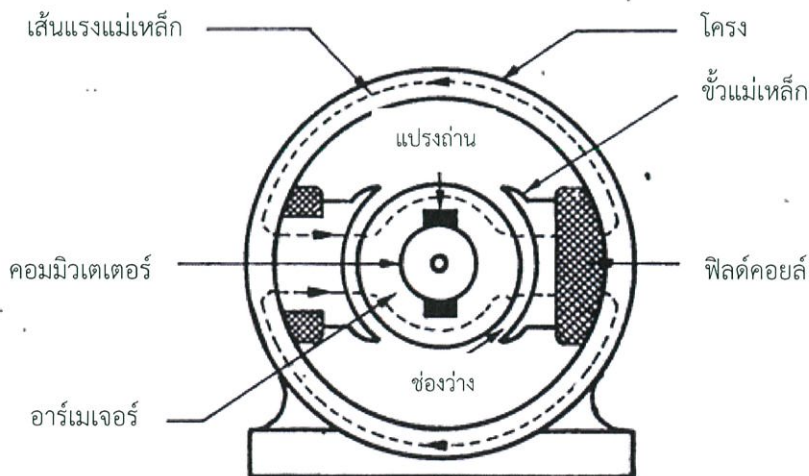


รูปที่ 2.38 ขดลวดอาร์เมเจอร์

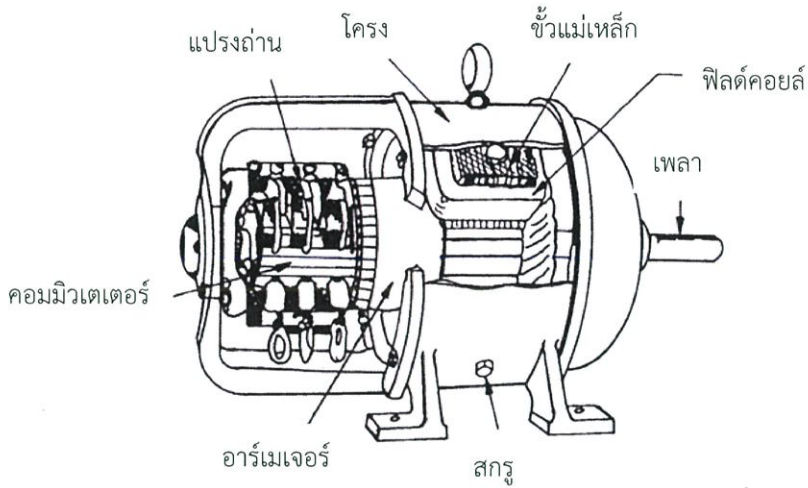
3. คอมมิวเตเตอร์ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงที่มีลักษณะคล้ายลิ้มเพื่อให้สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก คอมมิวเตเตอร์แต่ละอันเรียกว่าซี่และในระหว่างซี่ทองแดงแต่ละซี่จะคั่นไว้ด้วยฉนวนหนาที่แข็งแรง และคอมมิวเตเตอร์นี้จะยึดติดไว้บนเพลลาอันเดียวกับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.39 จากโครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมดดังกล่าวมาแล้วสามารถแสดงส่วนต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.40 และรูปที่ 2.41



รูป 2.39 ลักษณะของคอมมิวเตเตอร์



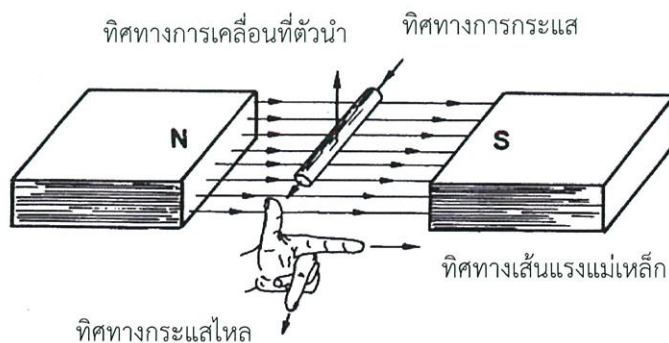
รูปที่ 2.40 รูปตัดของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.41 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกลไฟฟ้า

2.9.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

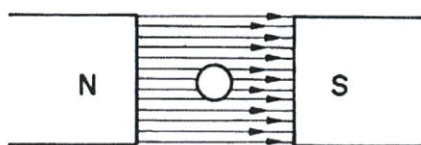
ในอดีตมีนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่าน คือ นายไฮน์ริช เลงซ์ ชาวเยอรมัน และเซอร์จอห์น อัมโบรส เพลมมิง ชาวอังกฤษ ได้ทดลองและพบหลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ เมื่อมีลวดตัวนำหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในลวดตัวนำนั้น และทิศทางการไหลของกระแสในลวดตัวนำจะไหลในทิศทางที่ต้านการหมุนของขดลวดตัวนำนั้น ซึ่งกฎในเรื่องทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่ากฎของเลนซ์ เซอร์เพลมมิงได้ค้นพบวิธีพิจารณาว่าการหมุนของมอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางใดนั้น ถ้าทราบทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ก็จะพบความสัมพันธ์ดังนี้คือ ถ้าทราบทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ทิศทางการไหลของกระแสในตัวนำ จะทำให้ทราบทิศทางการหมุนของขดลวดตัวนำ ได้ การค้นพบนี้เรียกว่ากฎมือซ้ายของเพลมมิง ความสัมพันธ์สามารถหาได้โดยการใช้มือซ้าย กางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ให้นิ้วหัวแม่มือชี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้ชี้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กและนิ้วชี้กลางชี้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 กฎมือซ้ายของเพลมมิง

ถ้าวัดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ลวดตัวนำนั้น ดังนั้นถ้าวัดตัวนำนี้วางอยู่ในสนามแม่เหล็กอื่น สนามแม่เหล็กทั้งสองจะทำปฏิกิริยากันทันที โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กนั้นจะไม่ตัดกัน ดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นเกิดผลึกกันเป็นเหตุให้ที่ด้านหนึ่งจะมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมาก ที่ด้านหนึ่งเส้นแรงแม่เหล็กหนีห่างออกไปจากกัน ผลก็คือจะมีสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากที่ด้านหนึ่งและจะมีความหนาแน่นน้อยอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.43 (ค) และ (ง)

เส้นแรงแม่เหล็กนั้นมีความพยายามที่จะผลักตนเองออกห่างจากเส้นแรงแม่เหล็กอื่นเสมอ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจากตัวนำแสดงในรูปที่ 2.43 (ก) และ (ข) นี้จะพยายามผลักเส้นแรงแม่เหล็กอื่นให้หนีห่างออกไป จะทำให้ผลลวดตัวนำเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน และถ้ากระแสที่ไหลในตัวนำเปลี่ยนทิศทางจากเดิมคือกระแสไหลออกดังแสดงในรูป 2.43 (ค) เปลี่ยนเป็นกระแสไหลเข้าดังแสดงในรูปที่ 2.43 (ง) เส้นแรงแม่เหล็กก็จะพยายามผลักตัวนำให้เคลื่อนที่ลงด้านล่าง



(ก) เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก



(ข) เส้นแรงแม่เหล็กรอบๆตัวนำที่มีกระแสไหล



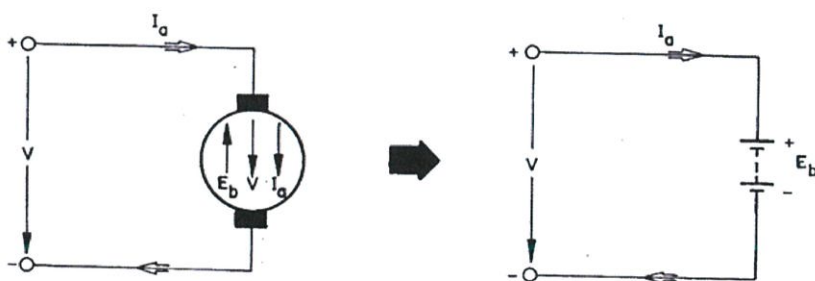
(ค) ตัวนำเคลื่อนที่ขึ้น



(ง) ตัวนำเคลื่อนที่ลง

รูปที่ 2.43 ปฏิกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กที่ขดลวดตัวนำ

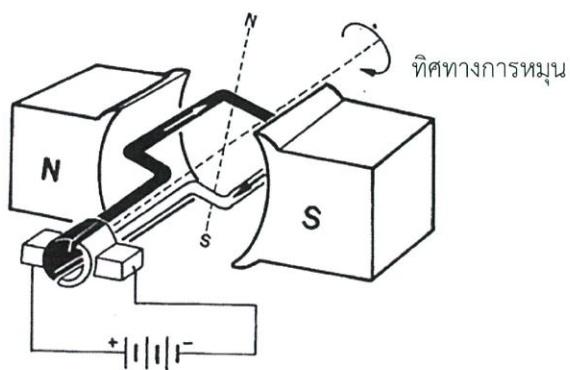
การที่ลวดตัวนำต้องเคลื่อนที่นี้จะต้องเคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จึงทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในลวดตัวนำนั้นจำนวนหนึ่ง การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้เป็นไปตามกฎของเลนซ์ โดยทิศทางของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะต้านกับการเคลื่อนที่ที่ทำให้ขดลวดตัวนำนั้นเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากภายนอกเข้าไปในลวดตัวนำ หรือเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎมือขวาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกฎมือซ้ายสำหรับมอเตอร์แล้ว จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต่อต้านหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กลับมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต่อต้านหรือแรงดันไฟฟ้านานกลับ ใช้สัญลักษณ์ E_c หรือ E_b ซึ่งมันจะเกิดขึ้นในลวดอาเมเจอร์ของมอเตอร์เสมอ ค่าของแรงดันไฟฟ้านานกลับนี้มีค่าไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์แรงดันไฟฟ้า ต้านกลับที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเปรียบเทียบได้เหมือนกับในอาร์เมเจอร์นั้นมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซ่อนอยู่ และจ่ายไฟออกมาตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปดังรูปที่ 2.44



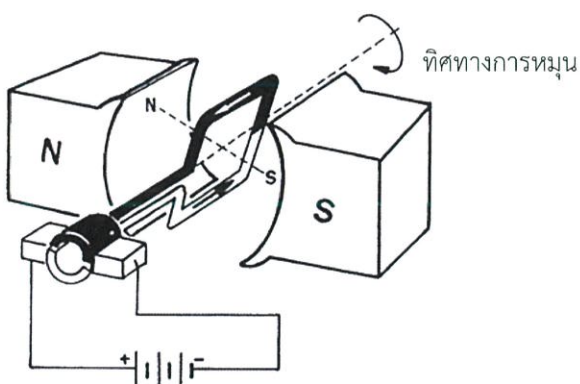
รูปที่ 2.44 วงจรเทียบเคียงของแรงดันไฟฟ้านานกลับ

จากรูปที่ 2.45 เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยขดลวดที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก โดยปลายของขดลวดทั้งสองข้างต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ด้านละซี่ ซึ่งจะมีแปรงถ่านต่อไว้และแปรงถ่านทั้งสองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก ขดลวดตัวนำนั้นจะต้องหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่อขดลวดอยู่ ณ ตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ก) กระแสไฟไหลผ่านขดลวดทำให้ด้านบนของขดลวดเป็นขั้วเหนือและด้านล่างของขดลวดเป็นขั้วใต้ ตามกฎมือขวา ขั้วแม่เหล็กของขดลวดจะถูกดูดหรือผลักขึ้นอยู่กับว่าเป็นขั้วเหมือนหรือต่างกัน และต่อมาเมื่อขดลวดหมุนมาอยู่ที่ 90 องศา คือตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ข) กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเปลี่ยนทิศทาง ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดนั้นกลับขั้ว ดังนั้นขณะนี้จะเป็นขั้วเหมือนกันผลักกัน ลวดตัวนำก็จะหมุนเลยต่อไปอีก ซึ่งเป็นการหมุนได้เพราะขั้วเหมือนกันผลักกัน แต่ถ้าขดลวดหมุนไปครบ 180 องศา คือตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ค) ปฏิบัติเช่นเดียวกับเมื่ออยู่ตำแหน่งที่ 2 จะเกิดขึ้นใหม่อีกครั้งคือกระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะเปลี่ยนทิศทางขั้วแม่เหล็ก

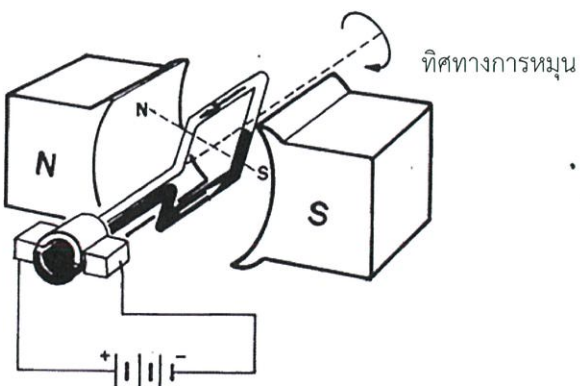
ที่ขดลวดจะกลายเป็นขั้วต่างกันผลักออกจากกันอีก ผลก็คือมอเตอร์จะหมุนได้ตลอดเวลา ดังนั้นคอมมิวเตเตอร์จึงมีบทบาทกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดกลับทางได้ทันทีที่ขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันกำลังเผชิญหน้ากันเมื่อกลับทางไหลก็จะทำให้ขั้วของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เปลี่ยนให้ผลักจากกันต่อมอเตอร์ก็จะหมุนได้ตลอดเวลา



(ก)



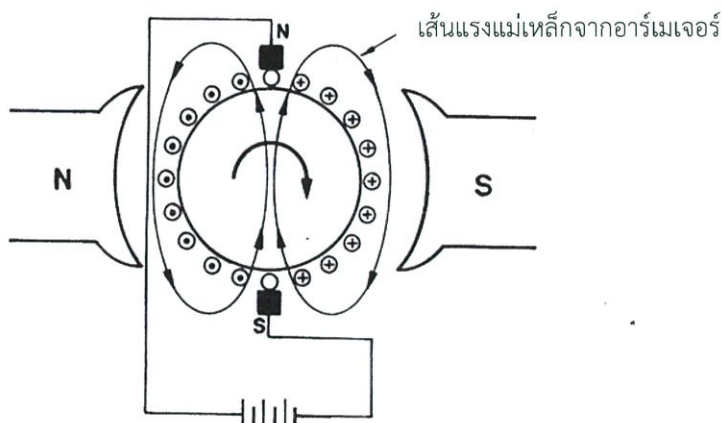
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.45 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย

แต่ถ้าอาร์เมเจอร์ที่ใช้ขดลวดหลายชุด แต่ละชุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับขดลวด 1 ชุด ในขณะที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กซึ่งจะมีขั้วดังรูปที่ 2.46 ขั้วเหนือของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะสอดเข้าหาขั้วใต้ของขั้วแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลัก แรงดึงดูดกันนี้ทำให้แรงผลักที่หมุนที่อาร์เมเจอร์ ทำให้หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เกิดแรงบิดที่สม่ำเสมอราบเรียบไม่กระตุกเพราะมีขดลวดหลายๆชุดที่อยู่ติดกันผลัดกันทำงานทีละชุดตามลำดับการที่มีขดลวดหลายชุดเช่นนี้จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กพัทธ์ที่อาร์เมเจอร์ขึ้นค่าหนึ่ง ซึ่งเปรียบเทียบกับมีค่าคงที่ หรือสนามแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ในขณะที่อาร์เมเจอร์กำลังหมุนอยู่



รูปที่ 2.46 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์

แรงที่กระทำบนขดลวดตัวนำต่อหนึ่งชุดในขณะที่มีกระแสไหลผ่านตัวนำนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนกระแสที่ไหล ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กและความยาวของตัวนำใน ส่วนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (หรือความยาวของตัวนำส่วนที่ใช้งานจริง) แรงที่เกิดขึ้นนี้ใช้สัญลักษณ์ F ซึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = BI$$

เมื่อ F = แรงที่กระทำในขดลวดมีหน่วยเป็นนิวตัน

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร หรือเทสลา

l = ความยาวของตัวนำในส่วนที่ผ่านสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเมตร

I = กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นแอมแปร์

จากสมการจะเห็นว่า ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ และความยาวของขดลวดตัวนำมีค่าคงที่ แรง ผลักหรือแรงที่กระทำก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตัวนำเพียงอย่างเดียว แรงบิด (Torque) แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ใช้สัญลักษณ์ τ และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{แรงบิด} = \text{แรง} \times \text{ระยะทาง}$$

หรือ
$$\tau = F x r$$

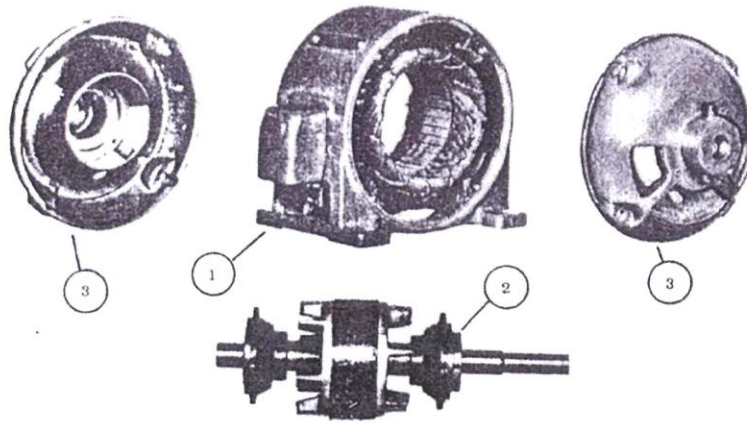
เมื่อ T = แรงบิดที่เกิดขึ้นมีหน่วยวัตต์เป็นนิวตันเมตร

r = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลลาถึงตัวนำมีหน่วยวัตต์เป็นเมตร 2.8.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีทั้งอินดักชันมอเตอร์และซิงโครนัสมอเตอร์ มีใช้งานอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จนถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก แม้แต่ในบ้านพักอาศัยก็มีการใช้กัน ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะของเครื่องอำนวยความสะดวกทั้งที่จำเป็นและฟุ่มเฟือยในรูปแบบต่าง ๆ กันมากมายตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่ ๆ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นมอเตอร์ที่ทำงานด้วยความเร็ว (speed) คงที่เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นบางชนิดซึ่งอาจจะออกแบบให้สามารถปรับความเร็วได้ก็มี แต่เป็นส่วนน้อย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับคือเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในกาเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่โรเตอร์ของมอเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำหรือที่เรียกว่า อินดักชัน (induction) ดังนั้นจึงเรียกมอเตอร์กระแสสลับว่า อินดักชันมอเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับบางที่เรียกชื่อสั้น ๆ ว่า มอเตอร์ไฟสลับ หรือมอเตอร์กระแสสลับ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือแบบที่มีโรเตอร์เป็นสไลควอเรลเกจ (squirrel cage) หรือกรงกระรอก เรียกมอเตอร์แบบนี้ว่า สไลควอเรลเกจมอเตอร์ (squirrel cage motor) และแบบที่โรเตอร์พันด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ ที่เรียกว่า วาวด์โรเตอร์ (wound rotor) เรียกมอเตอร์แบบนี้ว่า วาวด์โรเตอร์มอเตอร์ (wound rotor motor) หรือสลีปริงมอเตอร์

มอเตอร์ทั้งสองแบบนี้ จะมีส่วนประกอบคล้าย ๆ กันดังนี้ คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) เหมือนกัน ฝาครอบ (end plate) เหมือนกัน จะแตกต่างกันเฉพาะส่วนเคลื่อนที่ (rotor) เท่านั้น มอเตอร์ไฟสลับหรืออินดักชันมอเตอร์นี้ ยังแบ่งออกได้ 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดหนึ่งเฟส (หนึ่งยก single phase) และชนิดสามเฟส (สามยก three-phase) มอเตอร์ไฟฟ้าสลับทั้งชนิดหนึ่งเฟสและสามเฟสจะมีส่วนประกอบเบื้องต้นเหมือนกัน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่เคลื่อนที่ และฝาครอบ ดังรูปที่ 2.47



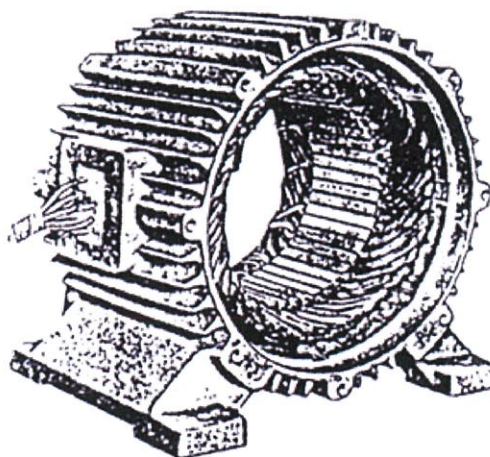
รูปที่ 2.47 ส่วนประกอบเบื้องต้นของมอเตอร์

1) ส่วนที่อยู่กับที่ 2) ส่วนเคลื่อนที่ 3) ฝาครอบ

2.10.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย

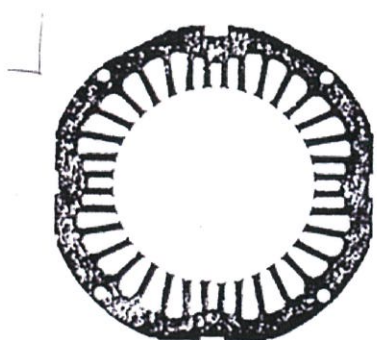
1.ส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่อยู่กับที่นี้มักจะเรียกว่า สเตเตอร์ และในส่วนนี้ยังประกอบด้วยสิ่งสำคัญดังนี้ คือ โครงมอเตอร์ แกนขดลวดและขดลวด

(1) โครงมอเตอร์ (Frame หรือ Yoke) บางทีเรียกสั้น ๆ ว่า โครง ทำด้วยเหล็กหล่อ รูปทรงกระบอกกลวง ฐานส่วนล่างมีลักษณะเป็นขาตั้ง มีกล่องสำหรับต่อสายไฟอยู่ด้านบนหรือด้านข้างดังรูปที่ 2.48 โครงทำหน้าที่จับยึดแกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ ผิวด้านนอกโดยรอบของโครงมอเตอร์บางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีบบ เพื่อช่วยให้ระบายความร้อน

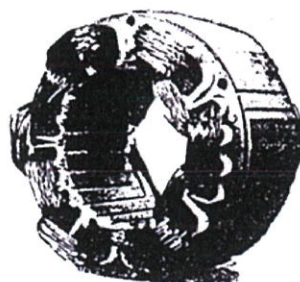


รูปที่ 2.48 โครงมอเตอร์ชนิดมีครีบบ

(2) แกนขดลวด (Stator core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ มีลักษณะกลม เจาะรูตรงกลางและ
 เสาะร่องภายในโดยรอบ แผ่นเหล็กนี้เรียกว่า แผ่นลามิเนต (laminated sheet) ดังรูปที่ 2.49
 แต่ละแผ่นหนา 0.025 นิ้ว แล้วนำแผ่นเหล็กบางเหล่านี้ที่อบซิลิกอนแล้ว มาอัดเข้าด้วยกัน
 ดังรูปที่ 2.50 เรียกว่าแกนขดลวด หรือสเตเตอร์ คอร์ ร่องที่เสาะภายในโดยรอบ เรียกว่า สล็อต
 (slot) เป็นที่สำหรับพันขดลวดและแกนขดลวดนี้ทำหน้าที่เป็นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กหรือเป็น
 วงจรแม่เหล็กด้วย

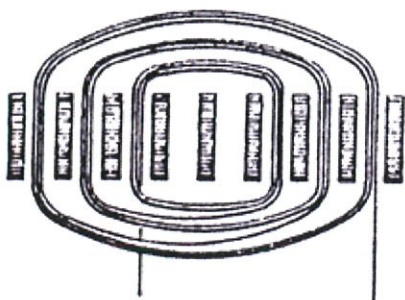


รูปที่ 2.49 แผ่นเหล็กลามิเนต

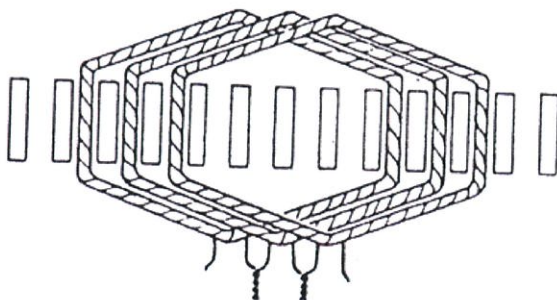


รูปที่ 2.50 แกนขดลวดและขดลวดสเตเตอร์

(3) ขดลวด (Stator winding) ขดลวดที่พันในสล็อตของแกนขดลวดนั้นแตกต่างกันตามชนิด
 ของมอเตอร์ เส้นลวดทองแดงที่ใช้พันเป็นขดลวดจะเป็นชนิดที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี เช่น
 น้ำมันวานิช ซึ่งเมื่อแห้งสนิทจะเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี ลักษณะขดลวดดังรูปที่ 2.51



(ก) ขดลวดมอเตอร์หนึ่งเฟสแบบหนึ่ง



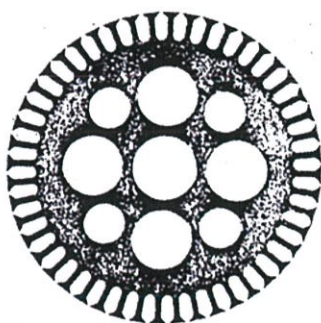
(ข) ขดลวดมอเตอร์สามเฟส

รูปที่ 2.51 ลักษณะของขดลวดมอเตอร์

2. ส่วนเคลื่อนที่

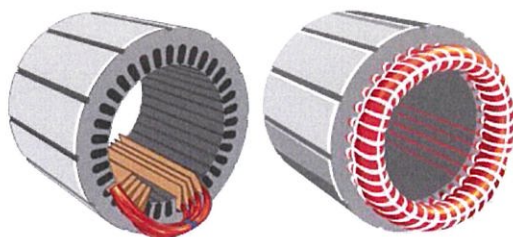
ส่วนนี้มักจะเรียกกันว่าโรเตอร์ (Rotor) มีสองแบบด้วยกันคือแบบสไควเรลเกจหรือทรงกระบอก (squirrel cage rotor) และแบบขดโรเตอร์ (wound rotor) แต่ละแบบยังประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่อไปนี้ แกนโรเตอร์ ขดลวด ใบพัด และเพลลา

1) โรเตอร์แบบสไควเรลเกจ เป็นโรเตอร์ที่ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหรือมอเตอร์ที่ทำงานด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่า อินดักชันมอเตอร์ แกนโรเตอร์จะทำให้ด้วยเหล็กบาง ๆ ที่เรียกว่า แผ่นเหล็กลามิเนต (laminated sheet steel) มีลักษณะกลม เสาะผิวภายนอกให้เป็นร่องโดยรอบ ๆ ขอบกับรูตรงกลางแผ่นจะเจาะเป็นรูไว้เพื่อใช้ช่วยในการระบายความร้อน และโรเตอร์มีน้ำหนักเบาดังรูปที่ 2.52 เมื่อนำเอาแผ่นลามิเนตเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกัน จะได้แกนโรเตอร์

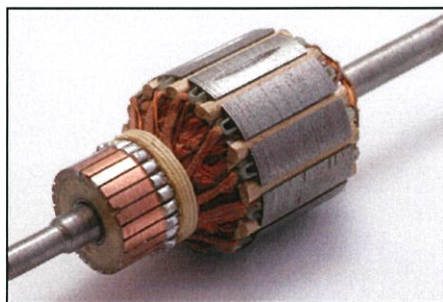


รูปที่ 2.52 ลักษณะแผ่นลามิเนตของแกนโรเตอร์

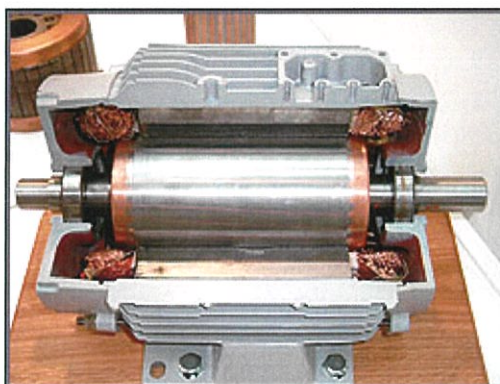
ขดลวดที่อัดเข้าไปในสล๊อทของแกนโรเตอร์จะทำด้วยแท่งอะลูมิเนียมหล่ออัดเข้าไปในสล๊อทให้แน่น แล้วยึดวงแหวนที่มีครีบบนออกมาเข้ากับปลายแต่ละข้างของแท่งอะลูมิเนียมที่ไหลออกมาจากสล๊อทเพื่อให้แท่งอะลูมิเนียมเหล่านั้นครบวงจรทางไฟฟ้า หรือไม่ก็นำเอาแกนโรเตอร์เข้าไปวางในแบบพิมพ์ (Mold) แล้วฉีดอะลูมิเนียม จะได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในสล๊อทจนเต็มและมีครีบบนออกไปทั้งสองข้างของแกนโรเตอร์ด้วยครีบบนที่ยื่นออกไปเหล่านี้เรียกว่า ใบพัดใช้สำหรับระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลลาเข้าไปที่รูกลางของแกนแล้ว จะได้แกนโรเตอร์ดังรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 แกนโรเตอร์ที่มีตัวนำแท่งอะลูมิเนียมอัดอยู่ในสล๊อทและแหวนอะลูมิเนียมพร้อมครีบบยึดติด



ก. แสดงให้เห็นถึงโรเตอร์แบบกรงกระรอกที่ประกอบด้วยแกนโรเตอร์ขดลวด ครีบ และเพลลา



ข. แสดงให้เห็นเพลลาที่อัดแน่นอยู่กับแกนโรเตอร์

รูปที่ 2.54 ลักษณะแผ่นลามิเนตของแกนโรเตอร์

สาเหตุที่เรียกแกนโรเตอร์แบบนี้ว่า แกนแบบกรงกระรอกเพราะว่า ถ้านำเอาแท่งอะลูมิเนียมที่อัดอยู่ในสลีตของแกนโรเตอร์ออกมาประกอบร่วมกับแผ่นวงแหวนที่ยึดติดหัวท้าย จะได้ตัวนำที่มีโครงสร้างเหมือนกับกรงกระรอก หรือถ้านำเอาแกนโรเตอร์ออกจากโรเตอร์ ก็จะเหลือตัวนำทั้งหมดที่มีโครงสร้างเหมือนกับกรงกระรอกดังแสดงในรูปที่ 2.54



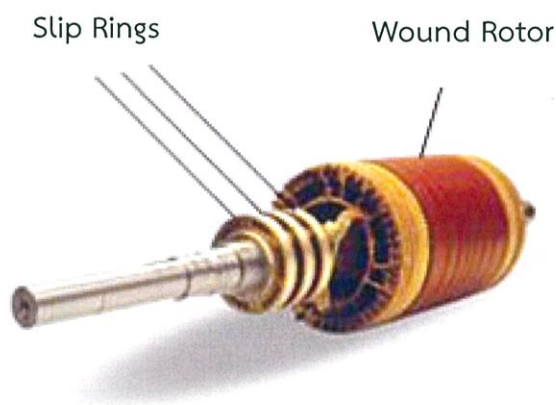
รูปที่ 2.55 ตัวนำของโรเตอร์ที่ต่อกันเหมือนกับกรงกระรอก

จากรูปที่ 2.55 จะเห็นว่าสล็อตจะมีลักษณะทำมุมเอียงกับแกนหรือเพลลาของโรเตอร์ แต่บางแบบสล็อตจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับเพลลา ข้อดีของโรเตอร์ที่มีสล็อตทำมุมเอียงกับเพลลา (skewed) ก็คือเมื่อมอเตอร์ทำงานจะหมุนเรียบและเงียบกว่าแบบที่มีสล็อต

2) โรเตอร์แบบวาวด์ หรือวาวด์โรเตอร์

โรเตอร์แบบนี้มีส่วนประกอบคล้าย ๆ โรเตอร์แบบกรงกระรอก คือมีแกนโรเตอร์ที่ทำด้วยแผ่นเหล็กลามิเนตอัดติดกัน มีขดลวดซึ่งพันด้วยเส้นลวดทองแดงที่หุ้มด้วยน้ำยาฉนวนไฟฟ้า โดยต่างจากขดลวดของโรเตอร์แบบกรงกระรอกที่ทำด้วยแท่งอลูมิเนียม ไบพัดสำหรับระบายความร้อนยัดติดอยู่หัวท้ายของแกนโรเตอร์และเพลลา นอกจากนี้โรเตอร์แบบวาวด์ยังมีแหวนทองแดงที่เรียกว่า สลิปริง (slipring) ต่อร่วมกับปลายสายของขดลวดอีกชุดหนึ่งจำนวน 3 ตัว

โดยปกติแล้ว วาวด์โรเตอร์จะใช้กับมอเตอร์สามเฟสเท่านั้น ดังนั้นสลิปริงทั้งสามตัว จึงมีไว้สำหรับต่อเข้าอุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้ควบคุมเพื่อทำให้ขดลวดโรเตอร์เกิดครบวงจรและประกอบการทำงานหมุน (สตาร์ท start) และควบคุมความเร็ว ลักษณะของวาวด์โรเตอร์ดังรูปที่ 2.56



รูปที่ 2.56 ลักษณะของโรเตอร์แบบวาวด์ที่มีโรเตอร์ ไบพัด สลิปริง และเพลลา

3) ฝาครอบ

ทำด้วยเหล็กหล่อ เจาะรูตรงกลางเพื่ออัดแบร์ริงรองรับเพลลาของโรเตอร์ ที่ฝาครอบนี้บางที่จะเจาะรูไว้ด้วยเพื่อช่วยในการถ่ายเทอากาศ

4) ขดลวดสเตเตอร์

หมายถึง ขดลวดที่พันอยู่ในสล็อตของแกนขดลวดที่สเตเตอร์หรือสเตเตอร์คอร์เท่านั้น ไม่รวมไปถึงขดลวดหรือแท่งอะลูมิเนียมที่พันหรืออัดอยู่ในสล็อตของโรเตอร์

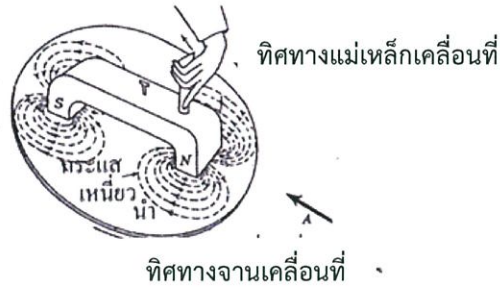
2.10.2 หลักการทำงานของอินดักชันมอเตอร์

1) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เบื้องต้นในมอเตอร์ไฟสลับพิจารณาได้ดังนี้

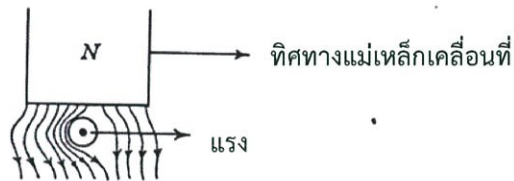
ก. เมื่อให้ส่วนเคลื่อนที่ มีลักษณะเป็นจานตัวนำกลมบาง นำเอาแท่งแม่เหล็กรูปตัวยู วางคว่ำให้ขั้วแม่เหล็ก N และ S หันเข้าหาจานตัวที่ด้วยแผ่นเหล็กหรือทองแดงหรืออะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.56 โดยให้จานตัวนำและแท่งแม่เหล็กมีศูนย์กลางร่วมกัน เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N จะพุ่งเข้าหาจานตัวนำและกลับเข้าหาขั้ว S เมื่อแท่งเหล็กและจานตัวนำอยู่หนึ่งกับที่ จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่จานตัวนำไม่มีการเคลื่อนที่

ถ้าให้จานตัวนำอยู่กับที่แล้วให้แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา ในกรณีนี้ก็เหมือนกับว่าให้แท่งแม่เหล็กอยู่กับที่แล้วให้จานเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา จะเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่จานตัวนำ จะเกิดทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง จะได้ว่าทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N จะไหลออกจากใต้ขั้วแม่เหล็ก N ไปสู่ขอบจานตัวนำเมื่อมองจากจุด A เข้าหาจานตัวนำ และก็จะพบว่าทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก S จะไหลจากขอบจานตัวนำเข้าสู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็ก S หาทิศทางการไหลของกระแสเหนี่ยวนำได้จากกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง

จากทิศทางการไหลของกระแสเหนี่ยวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้วจะพิจารณาต่อไปอีกว่าที่ขั้วแม่เหล็ก N เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสเหนี่ยวนำด้านซ้ายมือ จะเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกมาจากขั้วแม่เหล็ก N และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำด้านขวามือ จะหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกมาจากขั้วแม่เหล็ก N ที่ขั้วแม่เหล็ก S เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำด้านซ้ายมือ จะหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหาขั้วแม่เหล็ก S และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำด้านขวามือจะเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าหาขั้วแม่เหล็ก S ทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำนี้หาได้จากกฎมือขวา ดังนั้นลักษณะเป็นเส้นแรงแม่เหล็กรวมรอบตัวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N จะเห็นได้ดังรูปที่ 2.58 ซึ่งเป็นเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่จานตัวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N นี้ เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำและเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก N เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงขึ้นที่ตัวนำภายในใต้ขั้วแม่เหล็ก N และมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางขวามือดังรูปที่ 2.58 หรือจานตัวนำจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กที่กำหนดไว้ครั้งแรก ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของจานตัวนี้ ก็หาได้โดยใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่งและจานตัวนำ ซึ่งเป็นส่วนเคลื่อนที่นี้จะเคลื่อนที่หรือหมุนด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วของแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือแท่งแม่เหล็กหมุนเสมอ

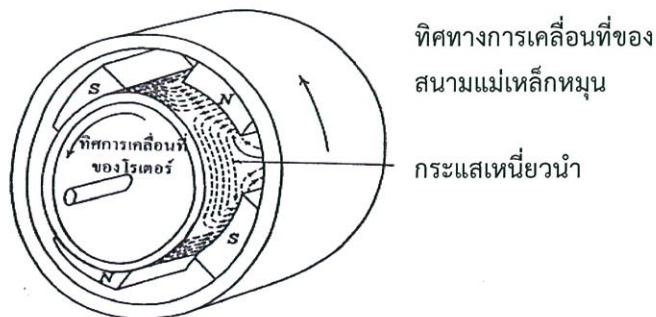


รูปที่ 2.57 แท่งแม่เหล็กรูปตัวยูวางคว่ำเข้าหาจวนตัวนำ



รูปที่ 2.58 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กรวมรอบตัวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N

ข. เมื่อให้ส่วนเคลื่อนที่เป็นแกนทรงกระบอก จากรูปที่ 2.59 ส่วนเคลื่อนที่ที่เป็นตัวนำรูปทรงกระบอก จะอยู่ในโครงเหล็กทรงกระบอกที่ขั้วเหล็ก N และ S ยึดติดอยู่ 2 คู่ หรือ 4 ขั้วแม่เหล็ก สมมติว่าถ้าทำให้ตัวนำของทรงกระบอกอยู่กับที่แล้วให้ขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดอยู่กับโครงเหล็กเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา ก็เหมือนกับว่า ถ้าให้ขั้วแม่เหล็กอยู่กับที่แล้วทำให้ตัวนำทรงกระบอกเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา จะเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่ตัวนำทรงกระบอก โดยจะเกิดทั้งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหาได้โดยใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง จะได้ว่ากระแสเหนี่ยวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N จะไหลจากแกนทรงกระบอกผ่านภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N และกระแสเหนี่ยวนำภายใต้ขั้วแม่เหล็ก S จะไหลจากขอบแกนทรงกระบอกเข้าสู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็ก S ไปยังขอบแกนซ้ายมือด้านนอก



รูปที่ 2.59 ตัวนำทรงกระบอกเคลื่อนที่ได้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ดังนั้นทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำภายในตัวแม่เหล็ก N ทั้งสองขั้วนี้จะมีทิศทางเหมือนกันคือ ไหลจากขอบด้านนอกของแกนนำขั้วมือ ผ่านภายในตัวแม่เหล็ก N ไปสู่ขอบแกนตัวนำขั้วมือ และทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำภายในตัวแม่เหล็ก S ทั้งสองขั้วก็จะมีทิศทางเหมือนกันคือไหลจากขอบแกนตัวนำด้านในขั้วมือ ผ่านภายในตัวแม่เหล็ก S ออกมาสู่ขอบแกนตัวนำด้านขั้วมือ

เมื่อเกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นภายในตัวแม่เหล็กแล้ว จะทำให้แกนตัวนำทรงกระบอกเคลื่อนที่หมุนไปซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่หมุนไปของแกนตัวนำทรงกระบอกนี้หาได้โดยกฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง คือกางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางให้ตั้งฉากแก่กันและกัน เมื่อใช้นิ้วชี้แทนทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก N หรือ S นิ้วกลางแทนทิศการไหลของกระแสเหนี่ยวนำภายในตัวแม่เหล็ก N หรือ S แล้วนิ้วหัวแม่มือจะแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนตัวนำทรงกระบอกที่เคลื่อนที่ไป ดังนั้นจะทำให้แกนตัวนำทรงกระบอก ตามรูปที่ 2.59 หมุนทวนเข็มนาฬิกาตามทิศทางของขั้วแม่เหล็กที่กำหนดให้เคลื่อนที่ไว้ครั้งแรก

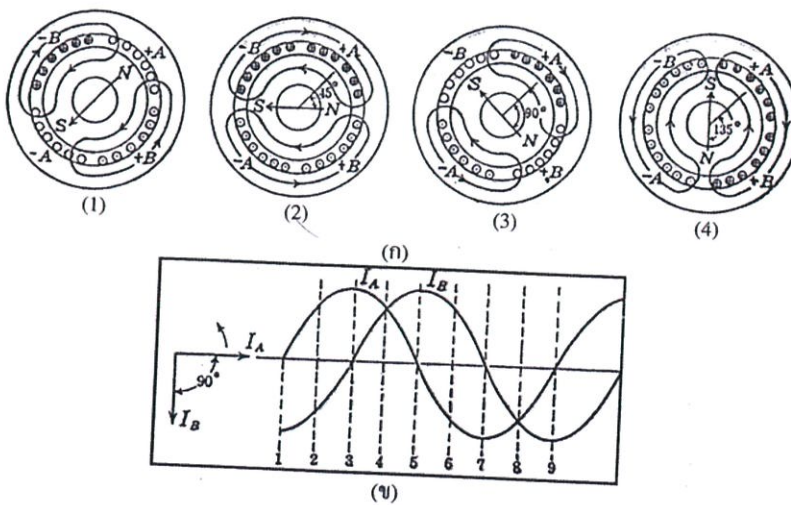
แต่อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถที่จะทำให้ขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดอยู่กับโครงของมอเตอร์เคลื่อนที่ได้ แต่เป็นข้อที่น่าสังเกตก็คือ ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เคลื่อนที่หมุนไปในทิศทางใด ขอให้เข้าใจไว้ว่าสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดกับโครงจะต้องเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นเสมอ

2) สนามแม่เหล็กหมุน

- สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สองเฟส

ในมอเตอร์หนึ่งเฟส จะมีขดลวดที่สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์หนึ่งชุด ต่อขั้วแม่เหล็กหนึ่งขั้วในมอเตอร์ มอเตอร์สองเฟส จะมีขดลวดที่สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์สองชุด ต่อขั้วแม่เหล็กหนึ่งขั้วในมอเตอร์ และมอเตอร์สามเฟส จะมีขดลวดที่สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์สามชุด ต่อขั้วแม่เหล็กหนึ่งขั้วในมอเตอร์

มอเตอร์สองเฟส ถ้าเป็นมอเตอร์ชนิดสองขั้วแม่เหล็กหรือสองโพล คือมีขั้ว N หนึ่งขั้ว และมีขั้ว S หนึ่งขั้ว ขั้ว N ก็จะมีขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด และขั้ว S จะมีขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด เช่นเดียวกัน โดยที่ขดลวดแต่ละชุดจะพันให้ห่างกัน 90 องศาไฟฟ้า



รูปที่ 2.60 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สองเฟสชนิดสองโพล

เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย จะกล่าวถึงขลวดสเตเตอร์ชนิดที่พันลงในสล็อตทละหนึ่งคอยล์ที่เรียกว่า Single layer ตามรูปที่ 2.60 ดังนั้น ขลวดทั้งชุด A และ B ภายใต้ขั้วแม่เหล็ก N หรือขั้วแม่เหล็ก S นั้นจะพันลงในสล็อตให้ห่างกัน 90 องศาไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าสองเฟลาที่จะป้อนให้กับมอเตอร์นั้น จะทำมุมกัน 90 องศาไฟฟ้าด้วย หรือที่เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าเฟสที่หนึ่งจะทำหน้าแรงดันไฟฟ้าเฟสที่สองเป็นมุม 90 องศาไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.60 ก. ขลวดชุด A หรือเฟส A มีต้นกับปลายคือ $+A$ และ $-A$ ขลวดชุด B หรือเฟส B มีต้นกับปลายคือ $+B$ และ $-B$ สมมติให้กระแสไฟจากระบบสองเฟสที่บวกไหลเข้าขลวดด้านบวก $+$ ออกทางด้าน $-$ และกระแสไฟที่เป็นลบไหลเข้าขลวดด้าน $-$ ออกทางด้านบวก $+$ สำหรับรูปที่ 2.4 ข. เป็นลักษณะกระแสไฟสองเฟสคือ กระแสไฟเฟส A, I_A และกระแสไฟเฟส B, I_B กระแสไฟ I_B จะล้าหลังกระแสไฟ I_A อยู่ 90 องศาไฟฟ้า

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า I_A และ I_B เข้าขลวดเฟส A และเฟส B จะเกิดผลดังนี้

ณ จุดที่ 1 ในรูปที่ 2.60 ก. และ 2.60 ข. กระแส I_A มีค่าเป็นศูนย์ กระแส I_B มีค่าลบสูงสุด ($-I_B$) ดังนั้นกระแส I_B จะไหลเข้าขลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และไหลออกทางด้าน $+B$ เมื่อทราบทิศทางของกระแสไหลในขลวดแต่ละเฟสแล้ว ก็หาทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ โดยใช้กฎไขควงมือขวา กำขลวดแต่ละด้าน ให้หัวแม่มือแทนทิศทางการไหลของกระแส ส่วนนิ้วทั้งสี่ที่เหลือจะแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดเฟส B จะทยอยลงจากขวามือไปสู่ซ้ายมือ หรือจากด้าน $+A$ ไปสู่ด้าน $-A$ ของขลวดเฟส A

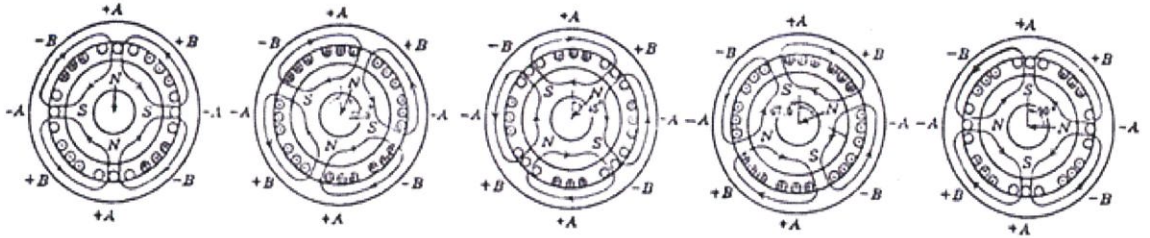
ณ จุดที่ 2 กระแส I_A จะมีค่าเป็นบวก จึงไหลเข้าขลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และไหลออกที่ด้าน $-A$ กระแส I_B จะมีค่าเป็นลบ จึงไหลเข้าขลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และไหลออกที่ด้าน $+B$ เมื่อใช้กฎไขควงมือขวาหาทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดทั้งสองเฟสแล้วก็จะได้ว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เสริมกัน และเส้นแรงแม่เหล็กจากขลวดเฟส A ที่ด้าน $-A$ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดเฟส B ที่ด้าน $+B$ จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เสริมกัน ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมเคลื่อนที่ในแนวระดับจากขวามือไปซ้ายมือ

ณ จุดที่ 3 กระแส I_A มีค่าเป็นบวก จึงไหลเข้าขลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และไหลออกที่ด้าน $-A$ กระแส I_B จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นขลวดเฟส B จึงไม่มีกระแสไฟไหลเข้า เมื่อใช้กฎไขควงมือขวาหาทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ที่แยงขึ้นจากขวามือไปสู่ซ้ายมือ หรือจากด้าน $+B$ ไปสู่ด้าน $-B$ ของขลวดเฟส B

ณ จุดที่ 4 กระแส I_A และ I_B เป็นบวกจึงไหลเข้าขลวดเฟส A และเฟส B ที่ด้าน $+A$ และด้าน $+B$ และไหลออกทางด้าน $-A$ และด้าน $-B$ ตามลำดับ เมื่อใช้กฎไขควงมือขวาหาทิศทางและเฟส B มีทิศทางการเคลื่อนที่เสริมกัน คือเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนตามแนวตั้ง

จากที่ได้กล่าวมาสังเกตเห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขลวดเฟส A และเฟส B จะเคลื่อนที่จากด้านบนลงสู่ด้านล่างตามทิศทางการเคลื่อนที่ของเข็มนาฬิกา ถ้าพิจารณาต่อไปอีก สนามแม่เหล็กก็จะเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไปรอบ ๆ แบบนี้เรียกว่า สนามแม่หมุน

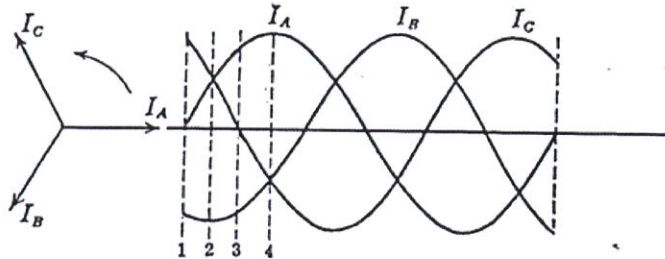
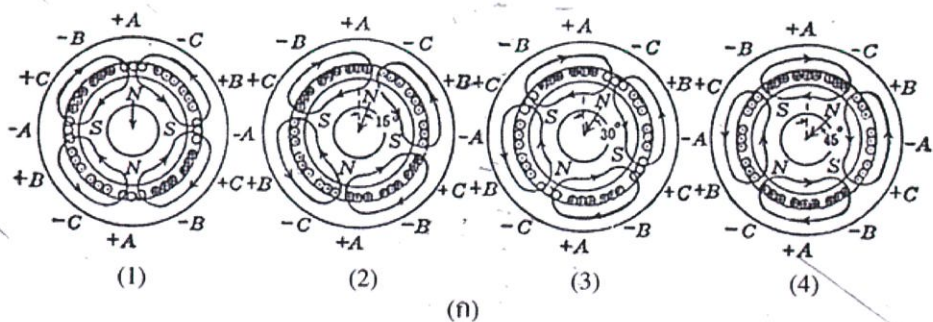
ถึงแม้ว่าจะเป็นมอเตอร์แบบสองชนิด ชนิด 4 โพล หรือ 6 โพลก็ตาม เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กแล้ว ก็จะได้ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 2.61 แสดงให้เห็นถึงสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สองเฟสชนิด 4 โพล



รูปที่ 2.61 ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์สองเฟสชนิด 4 โพล

- สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สามเฟส

มอเตอร์สามเฟส ก็คือมอเตอร์ที่มีจำนวนขดลวดภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้วรวมกันสามชุด ซึ่งอาจจะเรียกว่า ชุดที่ 1 ชุดที่ 2 ชุดที่ 3 หรือเรียกว่า เฟส 1 เฟส 2 เฟส 3 หรือ เฟส A เฟส B เฟส C เป็นต้น พิจารณาสถาณแม่เหล็กหมุน ในมอเตอร์สามเฟสได้ดังรูปที่ 2.62 ในรูปที่ 2.62 ก. แสดงให้เห็นมอเตอร์สามเฟสชนิด 4 โพล ซึ่งแต่ละโพลก็จะมีขดลวด 3 ชุด คือ เฟส A เฟส B และเฟส C ในรูปที่ 2.62 ข. เป็นกระแสไฟจากเครื่องกำเนิดสามเฟสที่จะป้อนให้กับมอเตอร์คือกระแส I_A , I_B และ I_C ซึ่งกระแสแต่ละส่วนจะทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้าเวลาพิจารณาทั้งรูปที่ 2.62 ก. และรูปที่ 2.62 ข. พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.62 ลักษณะสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์สามเฟส

เริ่มพิจารณา ณ จุดที่ 1 ในรูปที่ 2.62 ข. กระแส I_A มีค่าเป็นศูนย์ กระแส I_B เป็นลบ กระแส I_C เป็นบวก ดังนั้นกระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และไหลออกทางด้าน $+B$ กระแส I_C จะไหลขดลวดเฟส C ที่ด้าน $+C$ และไหลออกทางด้าน $-C$ จะไม่มีไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดเฟส A เมื่อใช้กฎไขควงมือขวา หาคิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแล้ว จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส C ที่ด้าน $+C$ ที่อยู่ใกล้กันจะมีทิศทางเสริมกัน และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่จากขั้ว N ไปสู่ขั้ว S จะได้ขั้วแม่เหล็ก N ไปสู่ขั้ว S จะได้ขั้วแม่เหล็ก N ในแนวตั้งและได้ขั้วแม่เหล็ก S ในแนวนอน

พิจารณาจุดที่ 2 กระแส I_A และ I_C เป็นบวกและมีค่าเท่ากัน และกระแส I_B เป็นลบสูงสุด กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และไหลออกที่ด้าน $-A$ กระแส I_C จะไหลเข้าขดลวดเฟส C ที่ด้าน $+C$ และไหลออกที่ด้าน $-C$ กระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และออกที่ด้าน $+B$ เมื่อใช้กฎไขควงมือขวาพิจารณาคิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่าขดลวดเฟส A ที่ด้าน $-A$ ขดลวดเฟส B ที่ด้าน $+B$ ขดลวดเฟส C ที่ด้าน $-C$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมา มีทิศทางเสริมกัน และขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ ขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ ขดลวดเฟส C ที่ด้าน $+C$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N ในจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ในแนวตั้งเริ่มเคลื่อนที่ไปทางขวามือห่างจากแนวตั้งเล็กน้อย และขั้วแม่เหล็ก S ในจุดที่ 1 ซึ่งอยู่ในแนวนอนเริ่มเคลื่อนที่ออกห่างจากแนวนอนเล็กน้อย

พิจารณาจุดที่ 3 กระแส I_A เป็นบวก กระแส I_B เป็นลบ กระแส I_C เป็นศูนย์ กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และไหลออกที่ด้าน $-A$ กระแส I_B จะไหลเข้าขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ และไหลออกที่ด้าน $+B$ ส่วนขดลวดเฟส C จะไม่มีกระแสไหลเข้า เมื่อใช้กฎไขควงมือขวาพิจารณาคิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่า ขดลวดเฟส A ที่ด้าน $-A$ และขดลวดเฟส B ที่ด้าน $+B$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน และขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ ขดลวด B ที่ด้าน $-B$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N เคลื่อนที่ห่างจากแนวตั้งมากขึ้น และขั้วแม่เหล็ก S ก็เคลื่อนที่ห่างจากแนวนอนมากขึ้นเช่นกัน

พิจารณาจุดที่ 4 กระแส I_A เป็นบวกสูงสุด กระแส I_B และ I_C เป็นลบ และมีค่าเท่ากัน กระแส I_A จะไหลเข้าขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ และไหลออกที่ด้าน $-A$ และกระแส I_B และ I_C จะไหลเข้าขดลวดเฟส B และเฟส C ที่ด้าน $-B$ และ $-C$ และไหลออกที่ด้าน $+B$ และ $+C$ ตามลำดับ ไขควงมือขวาพิจารณาคิศทางการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะพบว่าขดลวดเฟส A ที่ด้าน $-A$ ขดลวดเฟส B ที่ด้าน $+B$ ขดลวดเฟส C ที่ด้าน $+C$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ขดลวดเฟส A ที่ด้าน $+A$ ขดลวดเฟส B ที่ด้าน $-B$ ขดลวดเฟส C ที่ด้าน $-C$ ที่อยู่ใกล้กันจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาเสริมกัน ทำให้ขั้วแม่เหล็ก N เคลื่อนที่ออกห่างจากแนวตั้งมากยิ่งขึ้น และขั้วแม่เหล็ก S ก็เคลื่อนที่ออกห่างจากแนวนอนมากยิ่งขึ้น และมุมการเคลื่อนที่ของขั้ว S ห่างจากแนวนอนนี้จะเท่ากับมุมการเคลื่อนที่ของขั้ว N ห่างจากแนวตั้งด้วย

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อนี้จะเห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดที่พันอยู่กับสเตเตอร์ของมอเตอร์สามเฟส จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์แบบนี้ เรียกว่า สนามแม่เหล็กหมุน

- สนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์หนึ่งเฟส

สำหรับมอเตอร์หนึ่งเฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กจะมีขดลวดเพียงหนึ่งชุดเท่านั้น เมื่อมีขดลวดเพียงชุดเดียว สนามแม่เหล็กแทนที่จะหมุนเช่นเดียวกับมอเตอร์สองเฟสและมอเตอร์สามเฟส แต่จะกลับขั้วเหนือ N เป็นขั้วใต้ S และกลับจากขั้วใต้ S เป็นขั้วเหนือ N กลับไปกลับมาเท่านั้นจะทำให้โรเตอร์สั่นและไม่หมุนด้วย

เพื่อที่จะให้โรเตอร์หมุนจำเป็นจะต้องทำให้สนามแม่เหล็กหมุนก่อน หลักการขั้นต้นโดยพันขดลวดเพิ่มเข้าไปที่สเตเตอร์อีกชุดหนึ่ง เรียกขดลวดชุดนี้ว่า ขดลวดช่วยหมุน และเรียกขดลวดชุดแรกว่า ขดลวดหลักหรือขดลวดเมน ขดลวดหลักหรือขดลวดเมนนี้จะทำให้โรเตอร์หมุนอยู่ตลอดเวลา จึงเรียกว่าขดลวดรันหรือขดรัน และขดลวดช่วยหมุนจะช่วยให้โรเตอร์หมุนแล้วก็ปลดออกจึงเรียกว่าขดลวดสตาร์ท หรือขดสตาร์ท

โดยการออกแบบให้ขดสตาร์ทมีค่าความต้านทานสูง ๆ และให้ขดลวดรันมีค่าอินดักแตนซ์สูง จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดทั้งสองมีมุมต่างเฟสกันเกือบ 90 องศาไฟฟ้า คือกระแสที่ไหลผ่านขดสตาร์ทจะมีเฟสเดียวกับแรงดันที่ป้อน ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดรันจะมีมุมต่างเฟสกับแรงดันที่ป้อน 90 องศาไฟฟ้า เมื่อขดลวดสตาร์ทเกิดขั้วเหนือ N ไปแล้ว 90 องศาไฟฟ้าขดรันก็จะเกิดขั้วเหนือ N ขึ้นมาบ้าง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นโดยอาศัยหลักของมอเตอร์สองเฟสนั่นเอง เมื่อโรเตอร์หมุนได้ความเร็วตามพิกัดแล้ว ขดสตาร์ทจะถูกตัดออกด้วยสวิตช์อัตโนมัติ

2.11 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.63 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หรือเรียกว่า เอซีไดรฟ์ (AC drives) ก็คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือเอซีมอเตอร์

2.11.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์

เนื่องจากความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์ หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการซิงโครนัส-สปีดดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous speed} = (120 * f) / P$$

โดยกำหนดให้ f = ความถี่กระแสไฟฟ้า

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการซิงโครนัส-สปีดจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทางคือ

1. เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P)
2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (f)

ดังนั้นหากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่คือ 50 Hz. (หรือ 60 Hz. ในบางประเทศ เช่น อเมริกา) ความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ละตัวก็จะมีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์

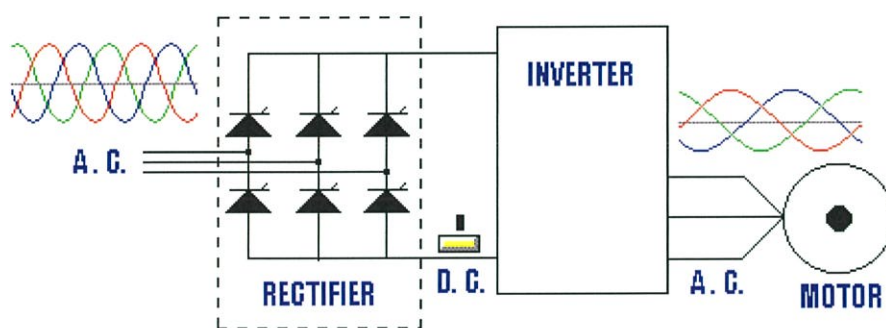
จำนวนขั้วแม่เหล็ก(P)	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 Hz. (RPM)	3000	1500	1000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 Hz. (RPM)	3600	1800	1200	900	720	600

จากตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไปครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาที หรือจาก 1500 รอบต่อนาที ไปเป็น 3000 รอบต่อนาที (กรณีเปลี่ยนจากการต่อแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กไปเป็นการต่อแบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก หรือจาก 4 ขั้วแม่เหล็กลดลงมาเหลือ 2 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด ,ทำได้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวน

ข้อแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับความต้องการของงานในหลาย ๆ ประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

2.11.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่าย ๆ ของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ๆ และมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.64 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์

1. Rectifier circuit

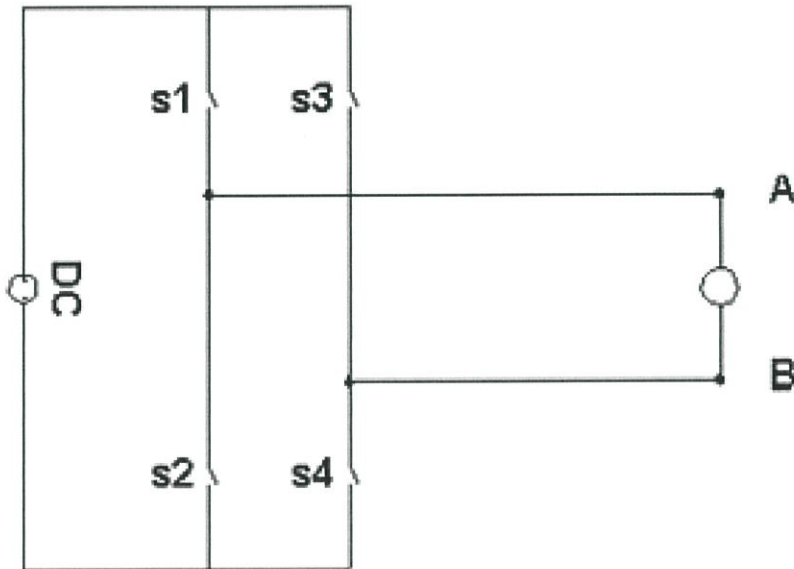
วงจรเรกติไฟเออร์ หรือวงจรเรียงกระแส ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วย เพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว หรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส

2. DC link

ดีซีลิงค์ หรือ วงจรเชื่อมโยงทางดีซี คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยแคปปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พิกัดแรงดัน ไฟฟ้า 400 VDC หรือ 800 VDC โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมาก ๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกลับมาตกคร่อมแคปปาซิเตอร์และทำให้ แคปปาซิเตอร์เสียหาย ได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่าความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขนานกับแคปปาซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำให้ที่เป็นสวิตช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

3. Inverter circuit

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.65 วงจรอินเวอร์เตอร์

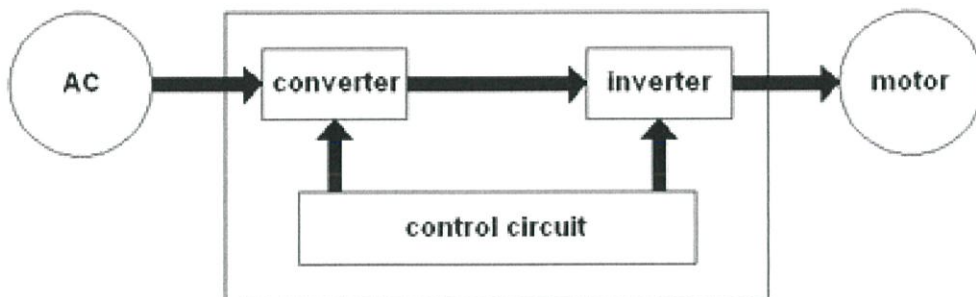
- เมื่อปิดสวิตช์ S1 และ S4 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด A ไปยังจุด B
- เมื่อปิดสวิตช์ S2 และ S3 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด B ไปยังจุด A

ดังนั้นถ้าเปิด-ปิดสวิตช์ S1 และ S4 สลับกับสวิตช์ S2 และ S3 จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นนั่นเอง โดยถ้ามีการควบคุมเวลา ในการเปิด-ปิดสวิตช์ ที่ต่างกัน ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกันไป

4. Control circuit:

วงจรควบคุม จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งนำเอาท์พุทออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตาม ที่ผู้ใช้งานต้องการ

2.11.3 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์

2.11.4 ผลที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ มีดังนี้

1. ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปได้
2. ติดตั้งง่ายประหยัดพื้นที่
3. ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้ง่าย
4. กลับทิศทางหมุนได้ง่าย
5. เพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องจักร
6. ประหยัดพลังงาน
7. Soft Start / Soft Stop
8. ทำงานได้โดยระบบอัตโนมัติ
9. บำรุงรักษาง่าย

2.11.5 การเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์

การนำอินเวอร์เตอร์ (Inverter) มาประยุกต์ใช้งานกับมอเตอร์ (Motor) โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ กำหนดได้จาก ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. ความถี่ (Frequency) ของแหล่งจ่ายไฟมอเตอร์
2. จำนวนขั้ว (Pole) ของมอเตอร์
3. แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์
4. แรงบิด (Torque) ของโหลด

ประเด็นหลัก ๆ ที่ต้องนำมาพิจารณาการเลือกใช้อินเวอร์เตอร์กับมอเตอร์ พิจารณาได้ดังนี้

1. การรวมกันและเข้ากันได้ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับมอเตอร์ เช่น ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์หรือมอเตอร์ ใช้ไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 380 VAC, 3 เฟส 220 VAC หรือ 1 เฟส 220 VAC เป็นต้น

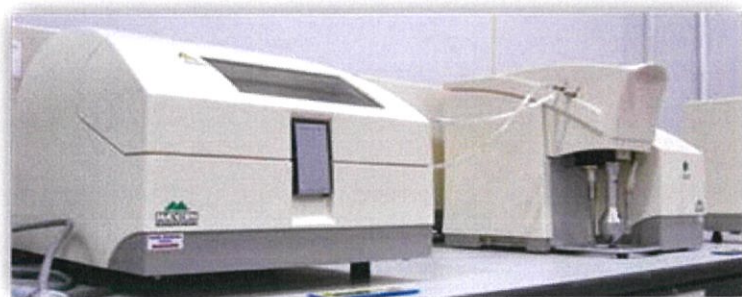
2. ความสามารถของอินเวอร์เตอร์ แบ่งได้ 2 ชนิด

1) ในระหว่างการเร่งความเร็วหรือการควบคุมความเร็วให้คงที่ จะต้องสามารถตอบสนองได้ทันทีเมื่อมีการขับมอเตอร์ โดยไม่เกินพิกัดกระแส (Overload current rate)

2) ในระหว่างการลดความเร็วลง จะต้องมีความสามารถในการกำจัดและยับยั้งพลังงานที่มาจากมอเตอร์ขณะลดความเร็วลง

3. กระแสพิคกิ้งเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ > กระแสพิคกิ้งของมอเตอร์ x 1.1

2.12 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

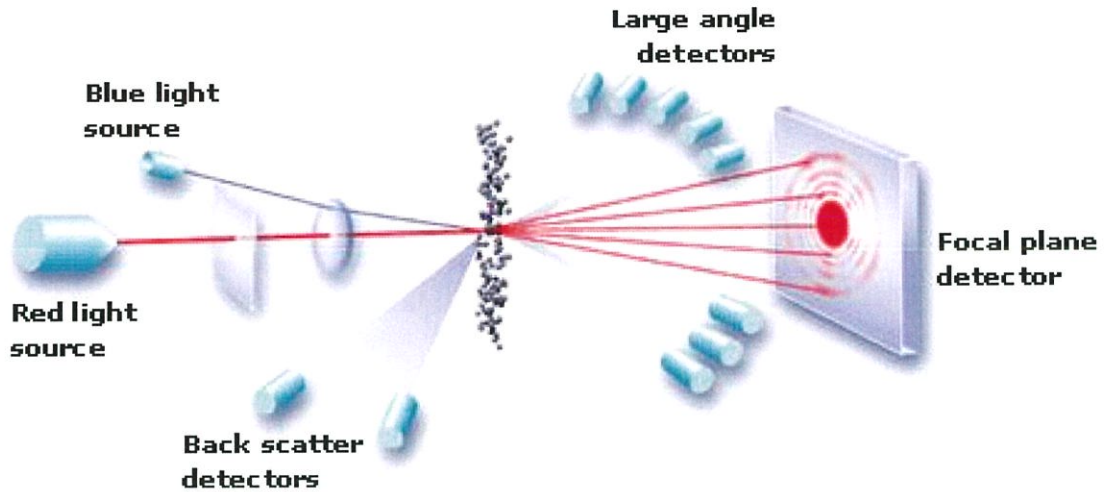


รูปที่ 2.67 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 nm ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์

หลักการการทำงานของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

เมื่อแสงเลเซอร์ เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย จะเกิดปรากฏการณ์กระเจิงของแสง โดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แต่ละมุมของการกระเจิงจะมีสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสมบัติการกระเจิงของแสงจากอนุภาคนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ โดยลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่ Photocell detector ซึ่งวางอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับเส้นทางเดินของแสงเลเซอร์ ที่จุดโฟกัสของการเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นวงมืด - สว่างสลับพันกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เลนส์รวมแสงได้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่ว่าอนุภาคจะก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณใดในลำแสงเลเซอร์ก็ตาม รูปแบบการเลี้ยวเบนจะไม่เคลื่อนไหว และมีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกนออฟติกของเลนส์เสมอ (Allen, 1997) จากการกระเจิงของแสงที่ได้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ตามทฤษฎีของมี (Mie theory) โดยใช้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) และค่าการดูดซับแสง (Absorption index) ของอนุภาคและตัวกลางร่วมด้วย



รูปที่ 2.69 การเลี้ยวเบนของเลเซอร์

จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงและสีน้ำเงินเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มตัวอย่าง (แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ใช้วัตถุอนุภาคขนาดใหญ่ และแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 473.00 นาโนเมตร ใช้วัตถุอนุภาคขนาดเล็ก) และมีดีเทคเตอร์รับแสงการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และบันทึกค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผ่านคอมพิวเตอร์โดยมุมของการเลี้ยวเบนจะขึ้นกับขนาดอนุภาค ซึ่งความสัมพันธ์ดังนี้ (Rahaman, 2003)

$$\sin \theta = 1.22\lambda/t$$

โดย θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

t คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

หากพิจารณาที่มุมการเลี้ยวเบนน้อยๆ จะได้

$$\theta = 1.22\lambda/t$$

เครื่อง Particle size distribution analyzer ของ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง มีระบบการวิเคราะห์ 2 ระบบ คือ การทดสอบแบบเปียก และการทดสอบแบบแห้ง

1) การทดสอบแบบเปียก จะใช้ของเหลวเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนผ่าน cell window (ทางห้องแลปใช้น้ำ RO) ซึ่งการทดสอบแบบเปียกจะมีการกระจายตัวของสารตัวอย่างได้ดี โดย cell window แคน และมีระบบ ultrasonic ช่วยในการกระจายอนุภาคขณะทำการทดสอบ

2) การทดสอบแบบแห้ง จะใช้ลมเป็นตัวกลางนำสารตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่าน cell window สำหรับตัวอย่างที่ไม่สามารถกระจายตัวในของเหลวได้ แต่การทดสอบแบบแห้งนี้ จะมีการกระจายตัวของตัวอย่างได้ไม่ค่อยดีเท่าแบบเปียก และ cell window ทำให้อนุภาคใหญ่มีโอกาสบังอนุภาคเล็กขณะเคลื่อนที่ผ่าน cell window

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการลดขนาดของอนุภาคสารเคมี โดยใช้ อุปกรณ์บดย่อยวัสดุประเภท Ball Milling ซึ่งได้ออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติม เพื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิม ให้สามารถใช้งานเป็นเครื่องบดสารชนิดแนวนอนได้ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับความต้องการของงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแนวนอนที่สร้างขึ้น

3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 ทฤษฎี Ball Milling

- การบดละเอียด (Grinding or Milling)
- Ball Mills หรือ Pebble Mills
- หลักการทำงานของ Ball Mills
- กลไกการแตกหักของวัสดุ
- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การบด
- การคำนวณหาความเร็ววิกฤต (Critical speed)

3.1.2 มอเตอร์

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor)
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Motor)

3.1.3 อินเวอร์เตอร์

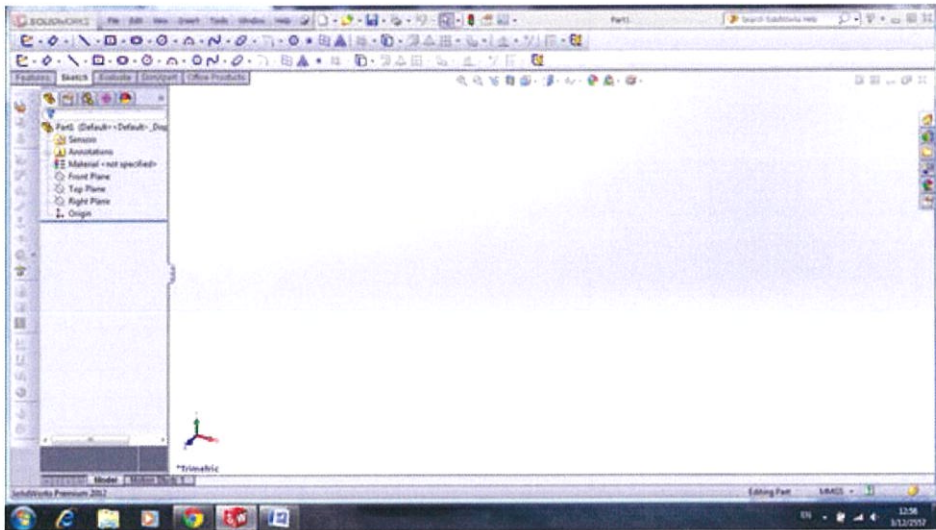
- หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์
- โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์
- หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

3.1.4 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

3.2 การออกแบบเครื่องบดสารประเภท Ball Milling

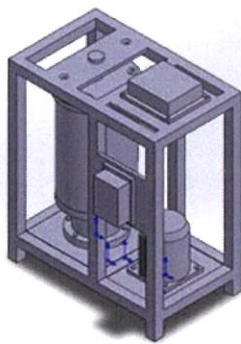
3.2.1 โปรแกรม Solid Works

ในการออกแบบเครื่องบดสารชนิดแนวนอนนั้น จะใช้โปรแกรม Solid Works ออกแบบ ส่วนประกอบเพิ่มเติมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารประเภทชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิม รวมทั้งยังออกแบบโครงสร้างและส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดประเภทชนิดแนวตั้งและแนวนอน เพื่อให้เห็นองค์ประกอบโดยรวมได้ชัดเจนยิ่งขึ้นอีกด้วย โดยหน้าตาของโปรแกรม Solid Works ที่ใช้ในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.1

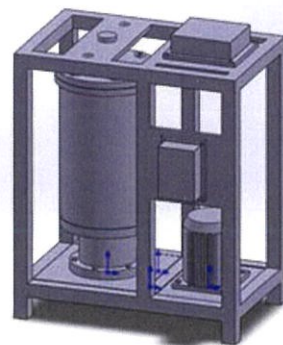


รูปที่ 3.1 หน้าต่างของโปรแกรม Solid Works ที่ใช้ในการออกแบบ

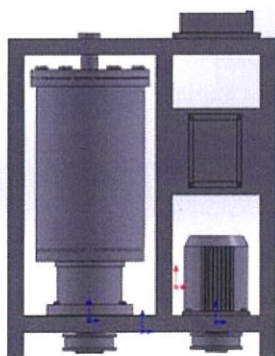
3.2.2. เครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง จะมีโครงสร้างโดยรวม ดังรูปที่ 3.2



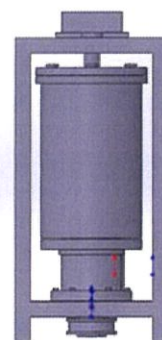
(a) Isometric



(b) Diametric



(c) Front



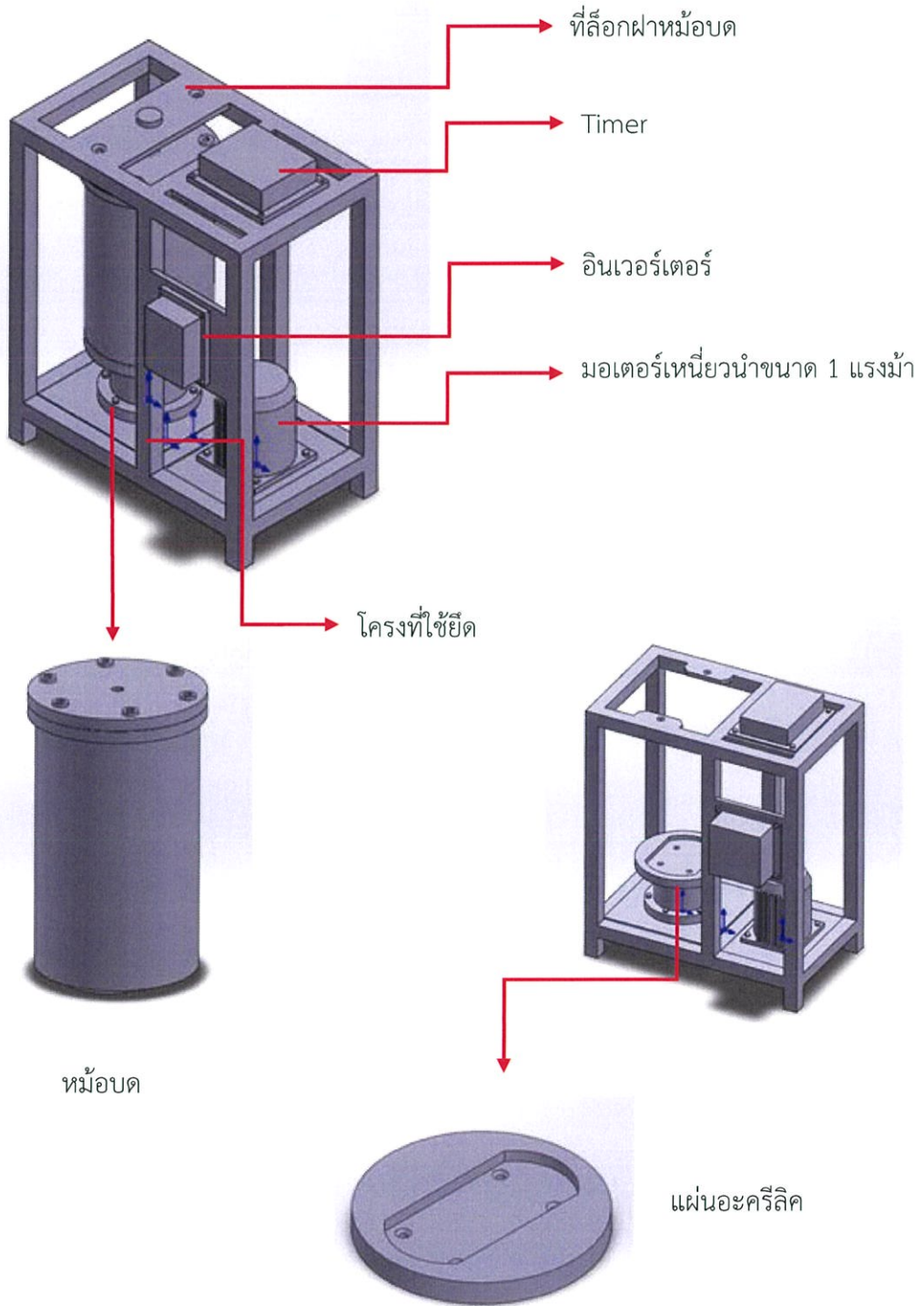
(d) Left

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งในมุมมองวัตถุต่าง ๆ (a) มุมมอง Isometric, (b) มุมมอง Diametric, (c) Front (มุมมองด้านหน้า) และ (d) Left (มุมมองด้านซ้าย)

ซึ่งโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งนั้น จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

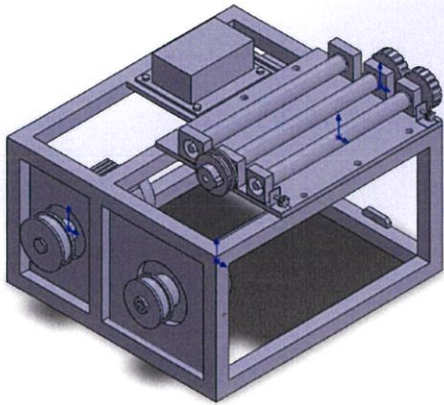
- | | |
|---|---------------------------|
| 1) มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า | 3) Timer |
| 2) อินเวอร์เตอร์ | 4) โครงที่ใช้ยึดในแนวตั้ง |
| 5) หม้อบด แผ่นอะคริลิก และที่ลือกฝาหม้อบด | |

โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง จะแสดงดังรูปที่ 3.3

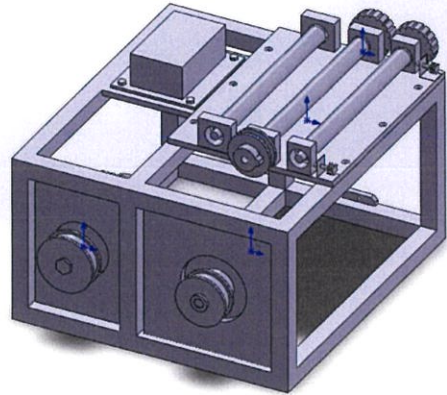


รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง

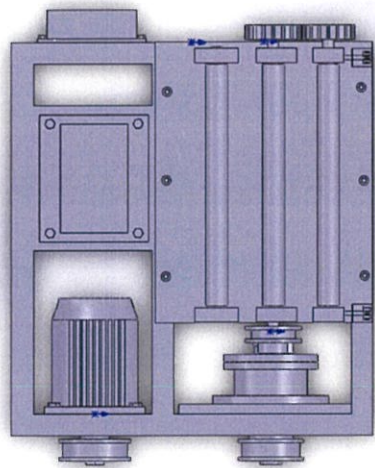
3.2.3. เครื่องบดสารชนิดแวนอน มีโครงสร้างโดยรวม ดังรูปที่ 3.4



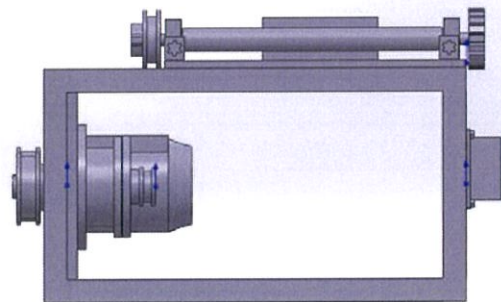
(a) Isometric



(b) Diametric



(c) Top



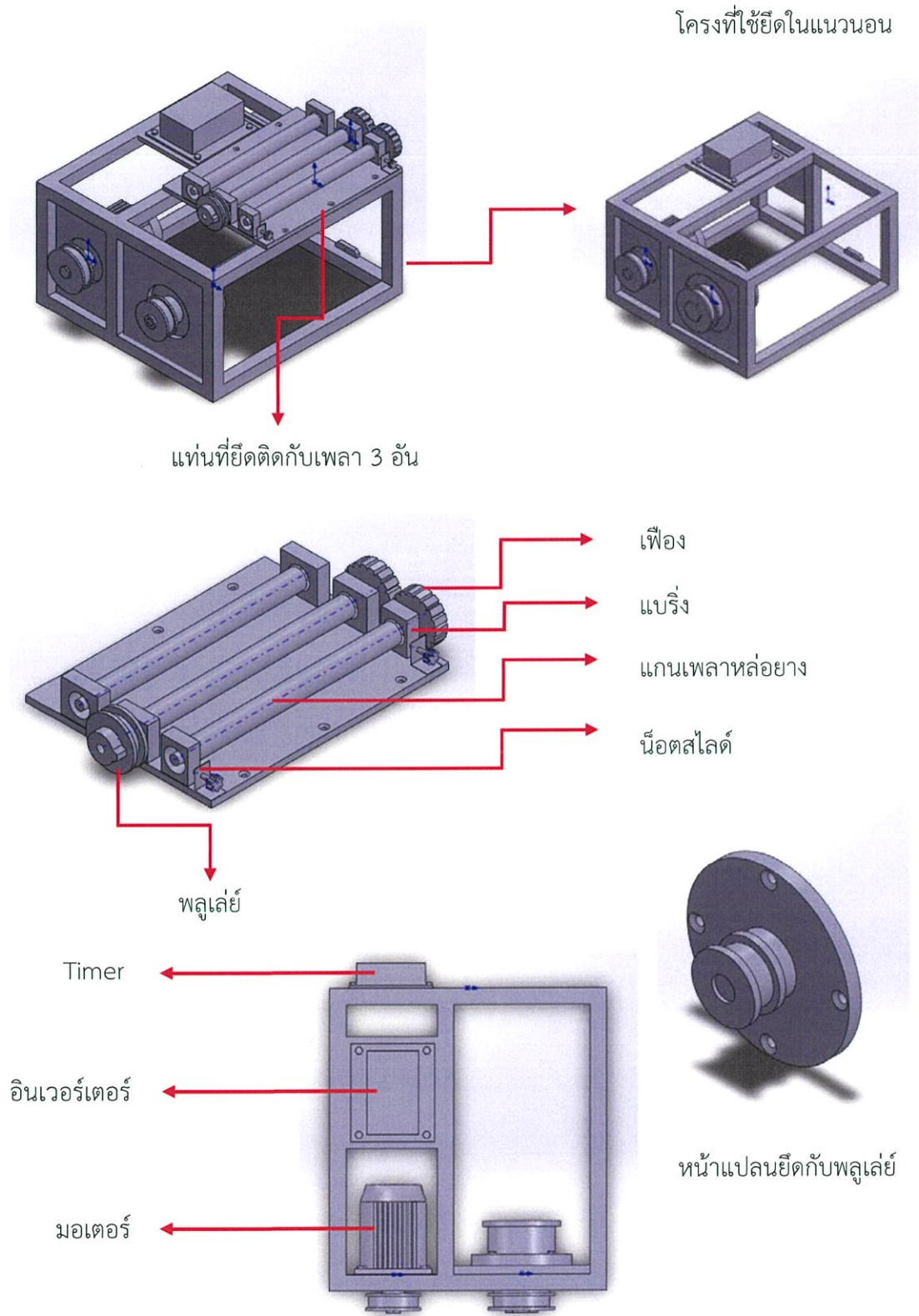
(d) Right

รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแวนอน ในมุมมองวัตถุต่าง ๆ

(a) มุมมอง Isometric (b) มุมมอง Diametric (c) Top (มุมมองด้านบน) และ

(d) Right (มุมมองด้านขวา)

ซึ่งโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแวนอนนี้ มีส่วนประกอบที่สำคัญ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องบดสารชนิดแวนอน

ส่วนประกอบของเครื่องบดสารชนิดแวนอนดังรูปที่ 3.5 จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- 1) มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า ทำหน้าที่ขับเคลื่อนเพลลาให้หมุน
- 2) อินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์
- 3) Timer ทำหน้าที่ตั้งเวลาในการบด
- 4) โครงที่ใช้ยึดในแวนอน ทำหน้าที่ยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน
- 5) แท่นที่ยึดติดกับเพลลา 3 อัน (ส่วนประกอบที่ออกแบบเพิ่มเติมเพื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเครื่องบดสารชนิดแวนอนตั้ง) ซึ่งจะประกอบด้วย

- เพลลาขนาด 25 mm ยาว 374 mm โดยจะหล່อย่างหนา 5 mm ยาว 334 mm ทำหน้าที่รองรับขวดที่ใส่ลูกบดแทนหม้อบดขนาดใหญ่

- แบริ่ง ทำหน้าที่ยึดเพลลา กับโครงสร้าง

- พลุเลย์ ทำหน้าที่ยึดติดกับมอเตอร์ และยึดติดกับเพลลา

- เฟือง ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการหมุนของเพลลา

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแวนอน

3.3.1 คำนวณหาค่าความเร็ววิกฤตของหม้อบด

จาก แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

$$\text{จะได้ว่า } mg \cos(\alpha) = mv^2/r$$

$$v^2 = gr \quad ; v = \omega r$$

$$(\omega r)^2 = gr$$

$$4\pi^2 f^2 r^2 = gr$$

$$f = gr/4\pi^2 r^2$$

แทนค่า $r = 0.03$ เมตร เมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อบด 6 เซนติเมตร

$$\text{จะได้ค่า } f = 3 \text{ Hz}$$

ดังนั้น ความเร็ววิกฤต (n_c) จะมีค่าเท่ากับ 180 รอบต่อนาที

3.3.2 คำนวณหาค่าความเร็วรอบของหม้ออบด

คำนวณค่าความเร็วรอบของหม้ออบดที่ 70% ของความเร็ววิกฤต, 80% ของความเร็ววิกฤตและ 90% ของความเร็ววิกฤต จาก

$$\phi_c = \frac{n}{n_c}$$

เมื่อ ความเร็ววิกฤต (n_c) มีค่าเท่ากับ 180 รอบต่อนาที

3.3.3 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์

โดยการปรับความเร็วอินเวอร์เตอร์ที่ค่าต่าง ๆ จากนั้นทำการจับเวลา 1 นาที พร้อมกับนับจำนวนรอบของสายพาน แล้วบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 บันทึกค่าการทดสอบหาจำนวนรอบของสายพานจากการปรับค่าตัวเลขอินเวอร์เตอร์

ค่าอินเวอร์เตอร์	ความเร็วรอบของสายพาน (รอบ/นาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
15				
20				
25				
30				
35				

3.3.4 ทดสอบการอบด โดยใช้เครื่องบดสารชนิดแฉนวนอน

1) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง: ผงอลูมินา



รูปที่ 3.6 ผงอลูมินา

2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1) ลูกบดอลูมินา

2.3) เครื่องบดสารชนิดแนวนอน

2.2) ขวดแก้ว

2.4) เตาอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (ข) ลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 ขวดแก้ว



รูปที่ 3.9 เครื่องบดสารชนิดแนวนอน



รูปที่ 3.10 เตาอบ

3) วิธีการทดสอบ

3.1) ขั้นตอนการเตรียมสาร

- คำนวณปริมาตรหม้อบด (ขวดแก้ว) จาก

$$\begin{aligned} v &= \pi r^2 L ; \text{เส้นผ่านศูนย์กลาง } 6 \text{ เซนติเมตร, ความสูง } 9 \text{ เซนติเมตร} \\ &= \pi(3^2)(9) \\ &= 254.34 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

- ใส่ลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ประมาณ 55% ของปริมาตรหม้อบด หรือประมาณ 254.34 cm^3 ของขวดแก้ว
- ใส่ผงอลูมินาและน้ำกลั่น ประมาณ 42% ของปริมาตรหม้อบด หรือประมาณ 106.88 cm^3 ของขวดแก้ว

3.2) บดผงอลูมินา ตามค่าที่กำหนด ดังนี้

- SET 1; ใช้ความเร็วรอบของหม้อบดเป็น 70% ของความเร็ววิกฤต และเวลาที่ใช้ในการบดเป็น 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง
- SET 2; ใช้ความเร็วรอบของหม้อบดเป็น 80% ของความเร็ววิกฤต และเวลาที่ใช้ในการบดเป็น 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง
- SET 3; ใช้ความเร็วรอบของหม้อบดเป็น 90% ของความเร็ววิกฤต และเวลาที่ใช้ในการบดเป็น 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง

3.3) นำผงอลูมินาที่ได้จากการบดละเอียด มาอบจนแห้ง ใช้เวลาประมาณ 6-18 ชั่วโมง

3.4) เก็บตัวอย่างผงอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียดมาแล้ว ไปตรวจวัดขนาดของอนุภาคต่อไป

3.4 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน โดยการนำผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียด ด้วยเครื่องบดสารชนิดแนวนอนที่สร้างขึ้นมาวัดขนาดอนุภาค ซึ่งจะใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) วัดขนาดอนุภาคต่างๆของผงอลูมินาที่ได้จากการบดตามค่าที่กำหนดไว้ ดังนี้

1) ผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 70% ของความเร็ววิกฤต เป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, และ 30 ชั่วโมง

2) ผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 80% ของความเร็ววิกฤต เป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, และ 30 ชั่วโมง

3) ผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 90% ของความเร็ววิกฤต เป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, และ 30 ชั่วโมง



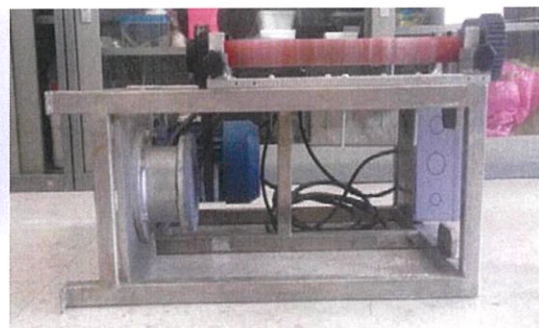
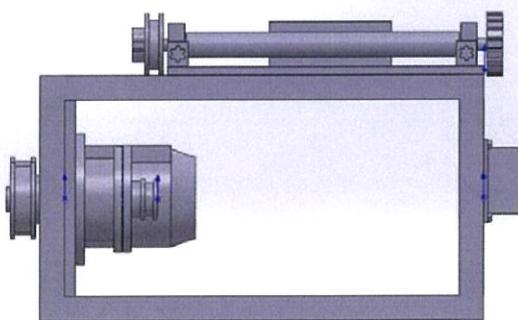
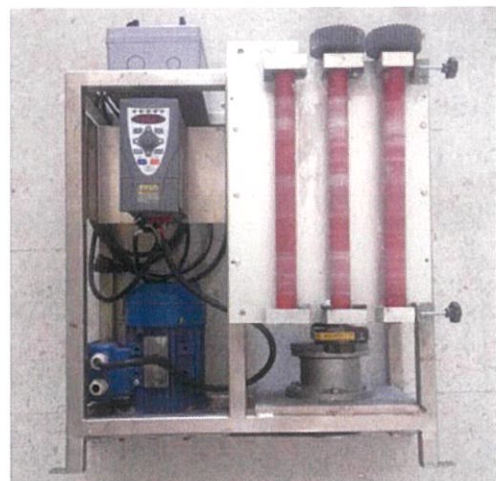
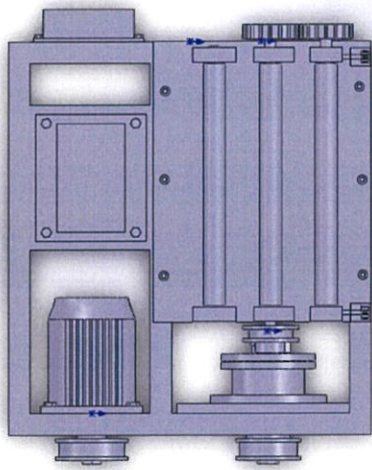
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการออกแบบเครื่องบดสารชนิดแนวนอน

การออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน โดยใช้โปรแกรม Solid Works เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิมนั้น สามารถนำมาใช้งานได้จริงตรงตามความต้องการคือ สามารถบดสารในปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการของงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ และยังสามารถเปลี่ยนกลับไปใช้งานในรูปแบบของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งสำหรับการบดสารเคมีในปริมาณที่มากขึ้นได้เหมือนเดิมอีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่างๆ นอกจากนี้เครื่องบดสารทั้งสองชนิดยังสามารถควบคุมความเร็วรอบและกำหนดเวลาในการบดได้อีกด้วย



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) เครื่องบดสารชนิดแนวนอน ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Works,

(ข) เครื่องบดสารชนิดแนวนอน ที่สร้างขึ้นตามแบบ

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดสารชนิดแวนอน

4.2.1 ผลการคำนวณหาค่าความเร็ววิกฤตของหม้อบด

จาก แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

$$\text{จะได้ว่า } mg \cos(\alpha) = mv^2/r$$

$$v^2 = gr \quad ; v = \omega r$$

$$(\omega r)^2 = gr$$

$$4\pi^2 f^2 r^2 = gr$$

$$f = gr/4\pi^2 r^2$$

แทนค่า $r = 0.03$ เมตร เมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อบด 6 เซนติเมตร

$$\text{จะได้ค่า } f = 3 \text{ Hz}$$

ดังนั้น ความเร็ววิกฤต (n_c) จะมีค่าเท่ากับ 180 รอบต่อนาที

4.2.2 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วรอบของหม้อบด

- ค่าความเร็วรอบของหม้อบดที่ 70% ของความเร็ววิกฤต, 80% ของความเร็ววิกฤต และ 90% ของความเร็ววิกฤต โดยแสดงดังตารางที่ 4.1

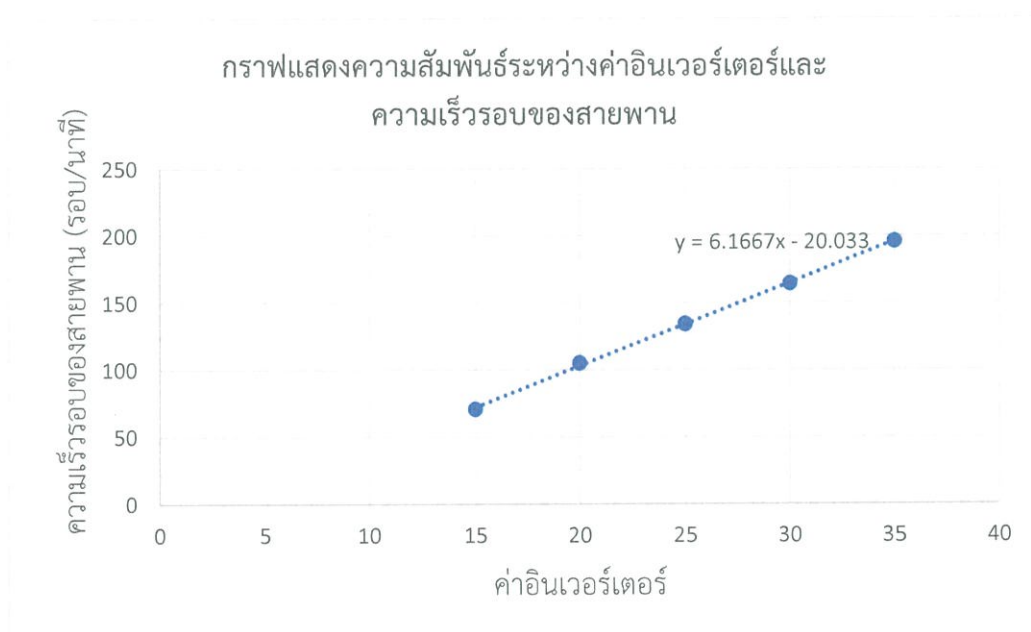
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเร็วรอบหม้อบดที่ได้จากการคำนวณ

ความเร็วรอบ (% ของความเร็ววิกฤต)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
70%	126
80%	144
90%	162

4.2.3 ผลการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาความเร็วรอบของสายพานจากการปรับค่าตัวเลขที่อินเวอร์เตอร์

ค่าอินเวอร์เตอร์	ความเร็วรอบของสายพาน (รอบ/นาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
15	71	71	71	71
20	105	106	105	105.33
25	135	135	133	134.33
30	165	164	164	164.33
35	195	196	196	195.67



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินเวอร์เตอร์และความเร็วของสายพาน (รอบ/นาที)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินเวอร์เตอร์และความเร็วรอบของสายพานได้สมการคือ

$$y = 6.1667x - 20.033$$

โดยที่ y คือ ความเร็วรอบ x คือ ค่าที่ปรับจากอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.3 ค่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในกำหนดความเร็วรอบหม้อบด

ความเร็วรอบ (% ของความเร็ววิกฤต)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ค่าอินเวอร์เตอร์
70%	126	23.7
80%	144	26.6
90%	162	29.5

4.2.4 ผลการทดสอบการบด โดยใช้เครื่องบดสารชนิดแนวนอน

เมื่อทำการทดลองบดผงอลูมินาโดยใช้เครื่องบดสารชนิดแนวนอน ตามค่าที่กำหนดไว้ ดังนี้

- 1) ทำการบดผงอลูมินาที่ความเร็ว 70% ของความเร็ววิกฤตเป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง
- 2) ทำการบดผงอลูมินาที่ความเร็ว 80% ของความเร็ววิกฤตเป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง
- 3) ทำการบดผงอลูมินาที่ความเร็ว 90% ของความเร็ววิกฤตเป็นเวลา 0 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง

ผลการทดลองบดผงอลูมินาโดยใช้เครื่องบดสารชนิดแนวนอน พบว่าเครื่องบดสารชนิดแนวนอน ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถใช้งานได้จริง เหมาะกับขนาดบดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และยาว 9 เซนติเมตร โดยจะสามารถบดได้สูงสุดครั้งละ 6 ขวด พร้อมๆกัน รวมทั้งสามารถควบคุมการบดให้ทำงานตามเวลาและความเร็วรอบที่กำหนดได้ นอกจากนี้ถ้ามีวัตถุประสงค์ที่ต้องการบดสารที่มีปริมาณมากขึ้น ก็สามารถเปลี่ยนกลับไปใช้งานในรูปแบบของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งได้เหมือนเดิมอีกด้วย ซึ่งในการทำงานจะสามารถควบคุมความเร็วรอบและเวลาในการบดได้เช่นกัน

4.3 ผลการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน

เมื่อนำผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดโดยเครื่องบดสารชนิดแนวนอน ไปวัดขนาดโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) พบว่าเครื่องบดสารชนิดแนวนอน สามารถลดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาได้จริง ซึ่งจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบดละเอียด (บด 0 ชั่วโมง) โดยเครื่องบดสารชนิดแนวนอน กับขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดที่ใช้ความเร็วรอบและเวลาในการบดที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแวนอน

ความเร็วรอบของหม้อบด (%ความเร็ววิกฤต)	ขนาดของอนุภาคที่ผ่านการบด (nm)				
	เวลาที่ใช้ในการบด (ชั่วโมง)				
	0	12	24	18	30
70%	8543.4	1611.3	738.2	471.9	913.1
80%	8543.4	1329.1	1059.1	487.7	318.5
90%	8543.4	714.4	779.3	696.7	759.4

จากการตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดด้วยเครื่องบดสารชนิดแวนอนที่สร้างขึ้นนั้น พบว่าผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 70% ของความเร็ววิกฤต เมื่อใช้เวลาในการบดเพิ่มขึ้นจาก 12 ชั่วโมง 18 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับอนุภาคของผงอลูมินาจะมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เมื่อเทียบกับผงอลูมินาที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบดใดๆ (0 ชั่วโมง) แต่การบดที่ใช้เวลา 30 ชั่วโมงนั้น พบว่ามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคที่ใช้เวลาการบด 18 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากการตรวจวัดขนาดอนุภาคของสารเคมีนั้น จะต้องผ่านการผสมสารละลายบางชนิดเพื่อให้อนุภาคของสารเคมีเกิดการตกตะกอนโดยไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายดังกล่าวด้วย จากนั้นนำมาสันด้วยอัลตราโซนิกเพื่อให้อนุภาคของผงอลูมินาเกิดการกระจายตัว ก่อนที่จะนำไปวัดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ซึ่งการสันดังกล่าวนี้ อาจจะใช้เวลาในการสันไม่มากพอ ทำให้อนุภาคยังคงรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนอยู่ อนุภาคที่วัดได้นั้นจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 80% ของความเร็ววิกฤตนั้น พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการบดขึ้นจาก 12 ชั่วโมง 18 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับอนุภาคของผงอลูมินาจะมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ และมีขนาดเล็กที่สุด 318.5nm เมื่อเทียบกับผงอลูมินาที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบดใดๆ (0 ชั่วโมง) และสุดท้ายผงอลูมินาที่ได้จากการบดที่ความเร็วรอบ 90% ของความเร็ววิกฤต พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการบดมากขึ้นจาก 12 ชั่วโมง 18 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าขนาดของอนุภาคที่วัดได้นั้นมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับผงอลูมินาที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบดใดๆ (0 ชั่วโมง) และยังคงมีขนาดใกล้เคียงกันมาก เนื่องมาจากในช่วงเวลาเริ่มต้นของการบดนั้น แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นในหม้อบด (ขวดแก้ว) จะมีค่ามากทำให้แรงตกกระทบของลูกบดที่กระทำต่อผงอลูมินามีค่ามากตามไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปแรงเหวี่ยงดังกล่าวจะทำให้ลูกบดเกิดสภาวะติดผนังของหม้อบดตลอดเวลา และจะไม่เกิดกระบวนการบดใดๆขึ้นอีก ดังนั้นขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่วัดได้จึงมีขนาดใกล้เคียงกัน เพราะได้จากการบดในช่วงเวลาแรกของการบดเหมือนกันนั่นเอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีการบดละเอียดด้วยอุปกรณ์บดย่อยประเภทย่อย Ball Milling และพัฒนาเครื่องบดสารชนิดแนวตั้งที่มีอยู่เดิม ให้เหมาะสมกับการใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์มากยิ่งขึ้น โดยใช้โปรแกรม Solid Works ออกแบบส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของเครื่องบดสารชนิดแนวตั้ง ประกอบด้วยแกนหมุนที่ติดกับแกนมอเตอร์ผ่านสายพานและแกนหมุนอิสระประกบทั้งสองข้าง ซึ่งแกนหมุนดังกล่าวจะหล່อย่างหนา 5 มิลลิเมตร ยาว 334 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้งานในรูปแบบแนวนอน (หรือเครื่องบดสารชนิดแนวนอน) และใช้ขวดแก้วเป็นหม้อบดแทนหม้อบดขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดขวดบดแก้วที่เหมาะสม คือ ขวดบดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และยาว 9 เซนติเมตร โดยจะสามารถบดได้สูงสุดครั้งละ 6 ขวด พร้อมๆกัน ทำให้สามารถบดสารเคมีในปริมาณที่น้อยลง เหมาะสมกับการใช้งานด้านวิทยาศาสตร์ และเป็นการลดต้นทุนในการทำงานวิจัย สำหรับการทำงานของเครื่องบดสารทั้งชนิดแนวตั้งและแนวนอน สามารถควบคุมความเร็วรอบและเวลาในการบดได้ด้วยอินเวอร์เตอร์และ Timer ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถเลือกใช้งานเครื่องบดสารได้ทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความเหมาะสมของงานวิจัย

สำหรับเครื่องบดสารชนิดแนวนอนที่สร้างขึ้น ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานโดยการบดผงอลูมินาที่ใช้ความเร็วรอบเป็น 70% ของความเร็ววิกฤต, 80% ของความเร็ววิกฤต, และ 90% ของความเร็ววิกฤต เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเครื่องบดสารชนิดแนวนอนนั้นสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังนำผงอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียดด้วยเครื่องบดสารชนิดแนวนอนนี้มาตรวจวัดขนาดของอนุภาค เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องบดสารชนิดแนวนอน พบว่าการบดที่ความเร็วรอบ 80% ของความเร็ววิกฤต ขนาดอนุภาคของผงอลูมินามีขนาดเล็กลงเรื่อยๆที่เวลาในการบดเพิ่มขึ้น และมีขนาดเล็กที่สุด 318.5 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับผงอลูมินาที่ไม่ได้ผ่านการบด จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการบดที่ดีที่สุด สำหรับการบดที่ความเร็วรอบเป็น 70% ของความเร็ววิกฤตนั้น ก็ทำให้ขนาดอนุภาคของผงอลูมินาเล็กลงเช่นเดียวกัน แต่ที่เวลาในการบด 30 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น เกิดจากการสั่นด้วยอัลตราโซนิคก่อนนำไปวัดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค ใช้เวลาน้อยเกินไปทำให้อนุภาคยังคงรวมตัวเป็นกลุ่มๆอยู่ ทำให้วัดขนาดอนุภาคได้ใหญ่ขึ้น และสุดท้ายการบดที่ 90% ของความเร็ววิกฤต จะได้ขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่มีขนาดเล็กลงและมีขนาดใกล้เคียงกันมาก เพราะได้จากแรงกระแทกของลูกบดในขณะที่เริ่มต้นของการบด ก่อนที่ลูกบดจะถูกเหวี่ยงติดผนังหม้อบดตลอดเวลาเหมือนกัน จึงทำมีประสิทธิภาพในการบดน้อยที่สุด

ดังนั้นเครื่องบดสารชนิดแวนอนที่สร้างขึ้นนั้น สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีคุณภาพสามารถทำให้ขนาดอนุภาคของผงอลูมินาให้มีขนาดเล็กลงได้ ทั้งนี้เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบดที่ดีควรเลือกใช้ความเร็วรอบในการบด ประมาณ 70-80% ของความเร็ววิกฤต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อลดการปนเปื้อนจากการบดสามารถเปลี่ยนจากลูกบดอลูมินาเป็นลูกบดเซอโรโคเนียที่มีความปนเปื้อนต่ำกว่าลูกบดอลูมินา
2. ควรใช้หม้อบด 1 หม้อบดต่อสารตัวอย่าง 1 สารตัวอย่าง
3. จากการสังเกตในการทดลองพบว่าตำแหน่งที่ใกล้เพลลาจะมีความเร็วรอบมากกว่าตำแหน่งที่ไกลเพลลา ดังนั้นจึงเลือกตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่งในการบด เพื่อให้ความเร็วรอบคงที่

เอกสารอ้างอิง

[1]จุฑามาศ จิวะสังข์. 2557.ออกแบบงาน 3 มิติ ด้านวิศวกรรมและงานช่าง Solid Work 2012 ฉบับสมบูรณ์.พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

[2]บริษัท เซรามิกคอนซัลทิงต์ จำกัด. 2557.การบดละเอียด. [Online].

Available : http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.phpp

[3] 2557.มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. [Online]. Available : http://www.research-system.siam.edu/images/coop/THE_DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_THE_MULTIPURPOSE_TOASTING_MACHINE/9_%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%972.pdf.

[4] 2557.มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ. [Online].

Available : <http://www.phayaotc.ac.th/files/10092910102710/files/2pdf.pdf>.

[5]รจนา ปลื้มหอม, นายอดิศักดิ์ สาสิทธิ์, และอนันตญา ศรีแสง (2546). 2557. การสร้าง ball mill ขนาดใหญ่และทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ball mill กับขนาดเล็ก.[Online].

Available : http://mis.en.kku.ac.th/administrator/doc_upload/CHE20070316171445.pdf.

[6]วิรัช เลิศพรหม. (ม.ป.ป.). 2557.ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดด้วยโม่บด (ตอนที่ ๑).

[Online]. Available : <http://eng.sut.ac.th/ceramic/old/article/19.pdf>.

[7]หัสวีภา หมายมั่น. (2555). 2557. Particle size analyzer. [Online].

Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/113-particle-size-analyzer.html>.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดมาแล้ว
ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

โดยแบ่งการตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ผ่านการบดละเอียดมาแล้ว เป็น 3 SET ดังนี้

SET 1 ใช้ความเร็วรอบในการบด 70% ของความเร็ววิกฤต แบ่งเป็น 6 ตัวอย่าง ดังนี้

- S1 ใช้เวลาในการบด 0 ชั่วโมง
- S2 ใช้เวลาในการบด 6 ชั่วโมง
- S3 ใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง
- S4 ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง
- S5 ใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง
- S6 ใช้เวลาในการบด 30 ชั่วโมง

SET 02 ใช้ความเร็วรอบในการบด 80% ของความเร็ววิกฤต แบ่งเป็น 6 ตัวอย่าง ดังนี้

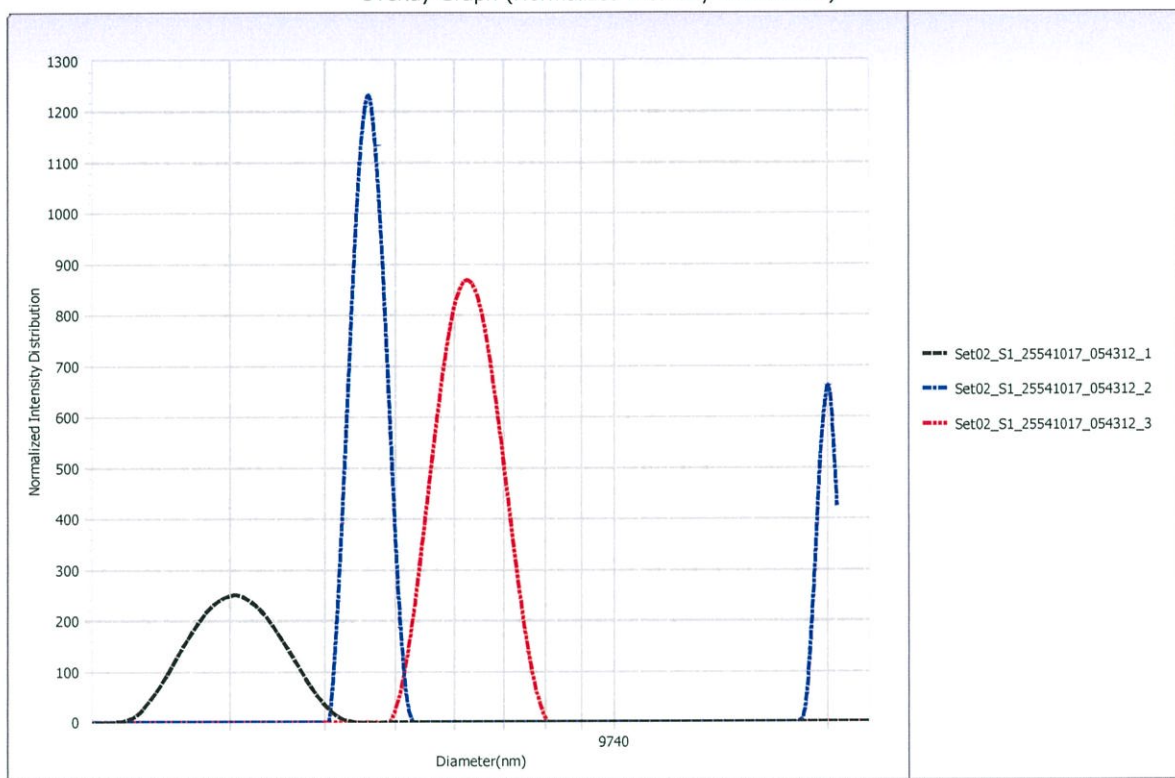
- S1 ใช้เวลาในการบด 0 ชั่วโมง
- S2 ใช้เวลาในการบด 6 ชั่วโมง
- S3 ใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง
- S4 ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง
- S5 ใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง
- S6 ใช้เวลาในการบด 30 ชั่วโมง

SET 03 ใช้ความเร็วรอบในการบด 90% ของความเร็ววิกฤต แบ่งเป็น 6 ตัวอย่าง ดังนี้

- S1 ใช้เวลาในการบด 0 ชั่วโมง
- S2 ใช้เวลาในการบด 6 ชั่วโมง
- S3 ใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง
- S4 ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง
- S5 ใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง
- S6 ใช้เวลาในการบด 30 ชั่วโมง

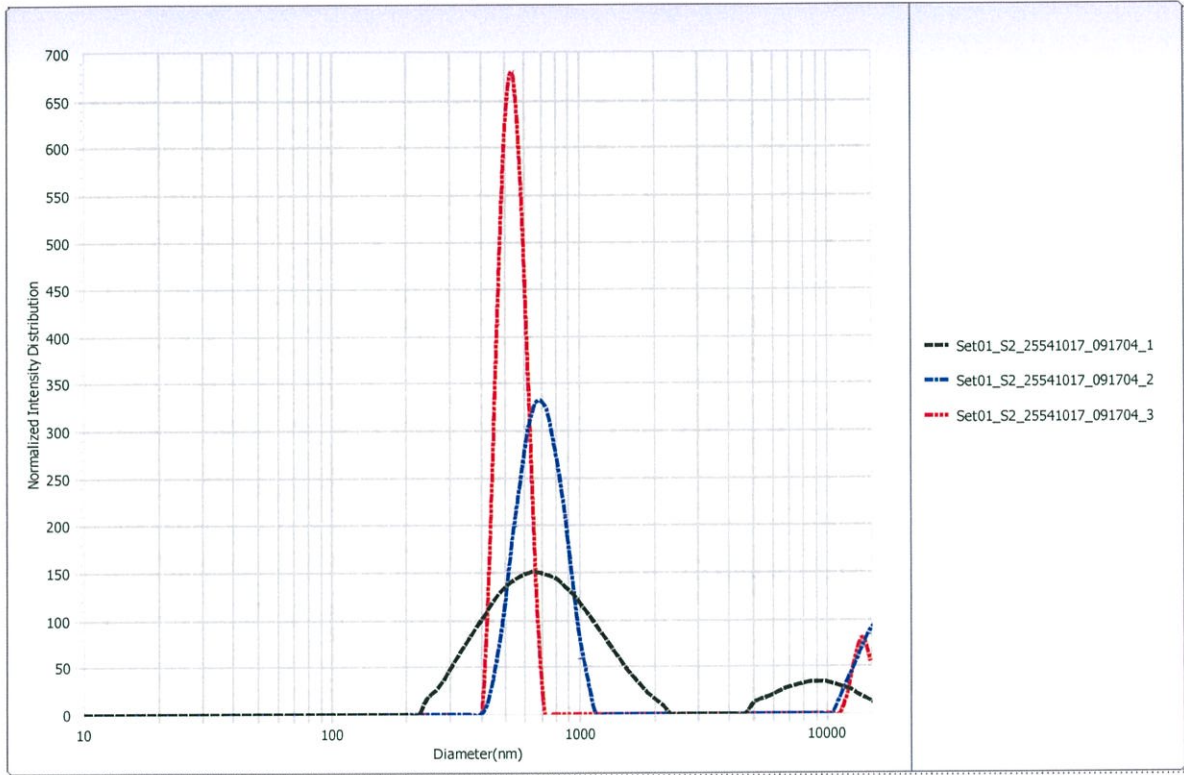
ทั้งนี้จะวัดขนาดอนุภาคของผงอลูมินาที่ใช้เวลาในการบด 0 ชั่วโมง เพียงค่าเดียว คือ SET02_S1

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



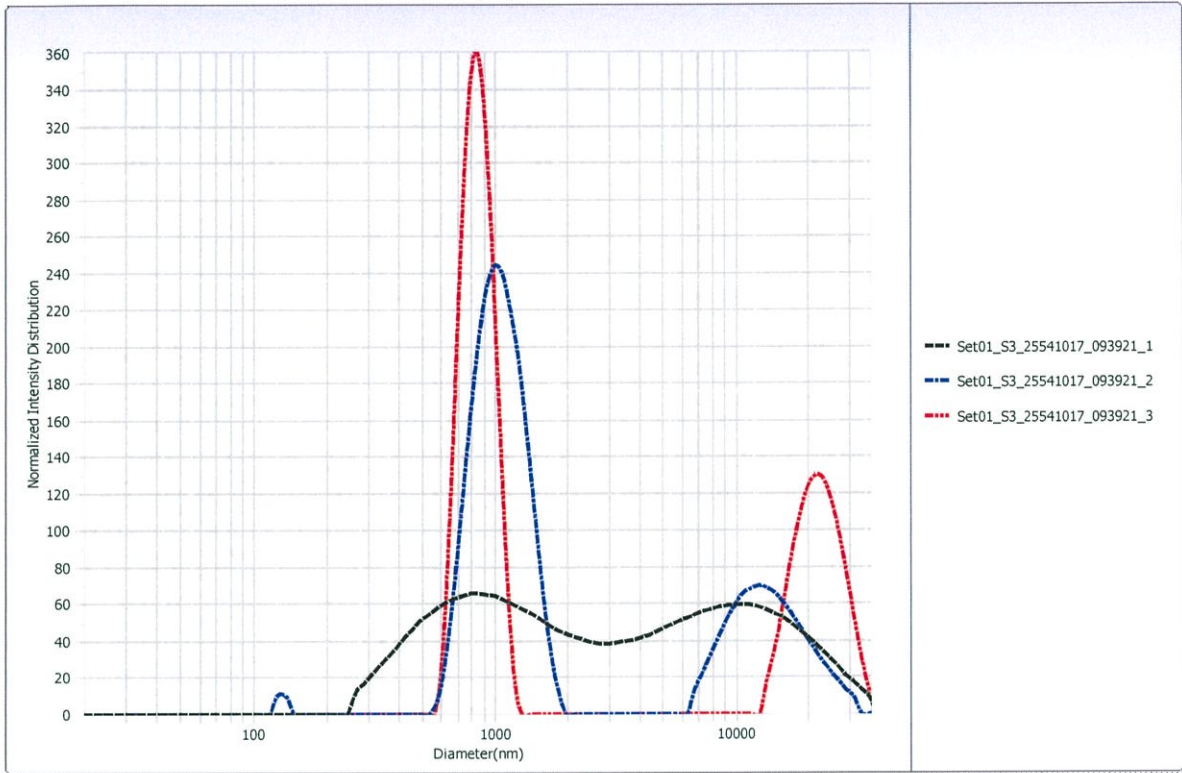
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_S1_25541017_054312_1	1	NA	6761.0	0.926	92150.7	2402.3	116144.9	181053.0
2	Set02_S1_25541017_054312_2	2	NA	8955.9	-0.731	7709.8	4010.5	4362.8	19518.4
3	Set02_S1_25541017_054312_3	3	NA	9913.2	-1.957	6042.6	5221.8	5934.5	6755.4
Average :				8543.4	-0.587	35301.0	3878.2	42147.4	69108.9

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



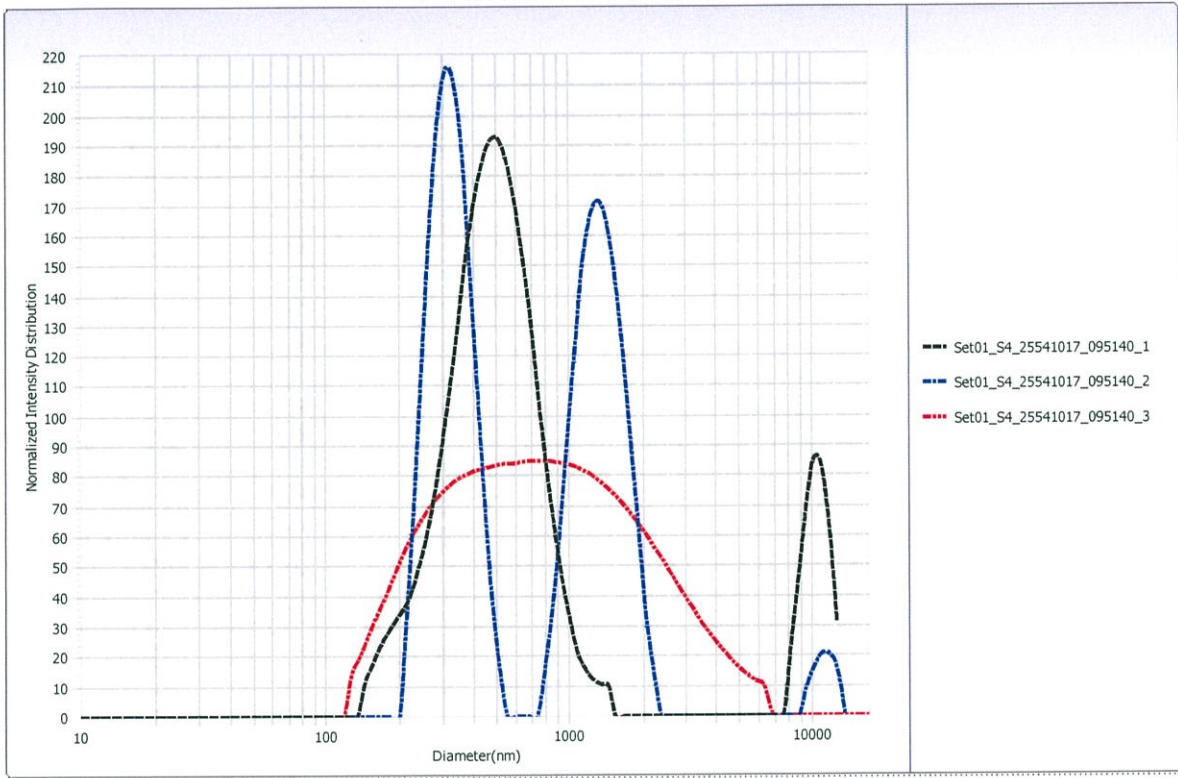
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set01_S2_25541017_091704_1	1	NA	897.6	0.314	1873.4	361.5	721.2	6662.4
2	Set01_S2_25541017_091704_2	2	NA	1035.1	0.361	3913.0	520.8	712.9	15629.1
3	Set01_S2_25541017_091704_3	3	NA	764.8	0.292	1457.6	442.8	520.1	633.9
Average :				899.2	0.322	2414.7	441.7	651.4	7641.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



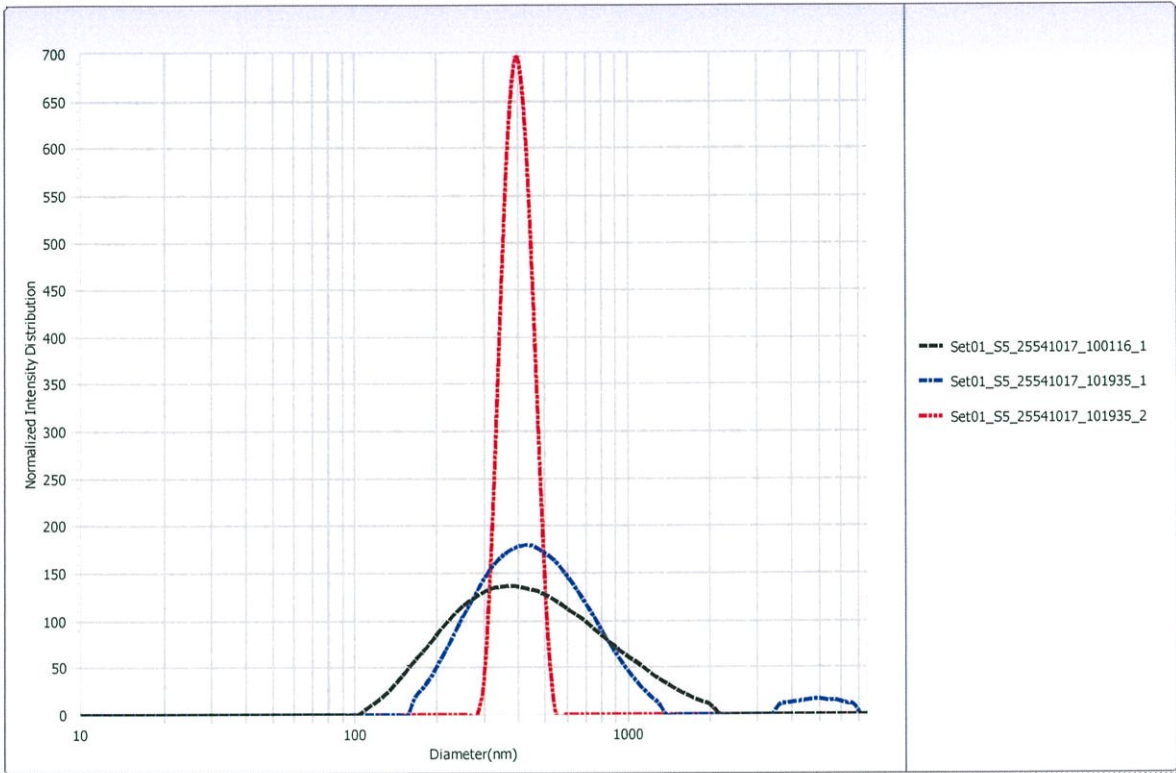
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set01_S3_25541017_093921_1	1	NA	1769.0	0.513	6166.8	499.1	2667.5	16278.1
2	Set01_S3_25541017_093921_2	2	NA	1601.1	0.457	5032.7	746.2	1135.2	15100.2
3	Set01_S3_25541017_093921_3	3	NA	1463.9	0.468	8575.2	687.5	915.3	24240.4
Average :				1611.3	0.479	6591.6	644.3	1572.7	18539.6

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



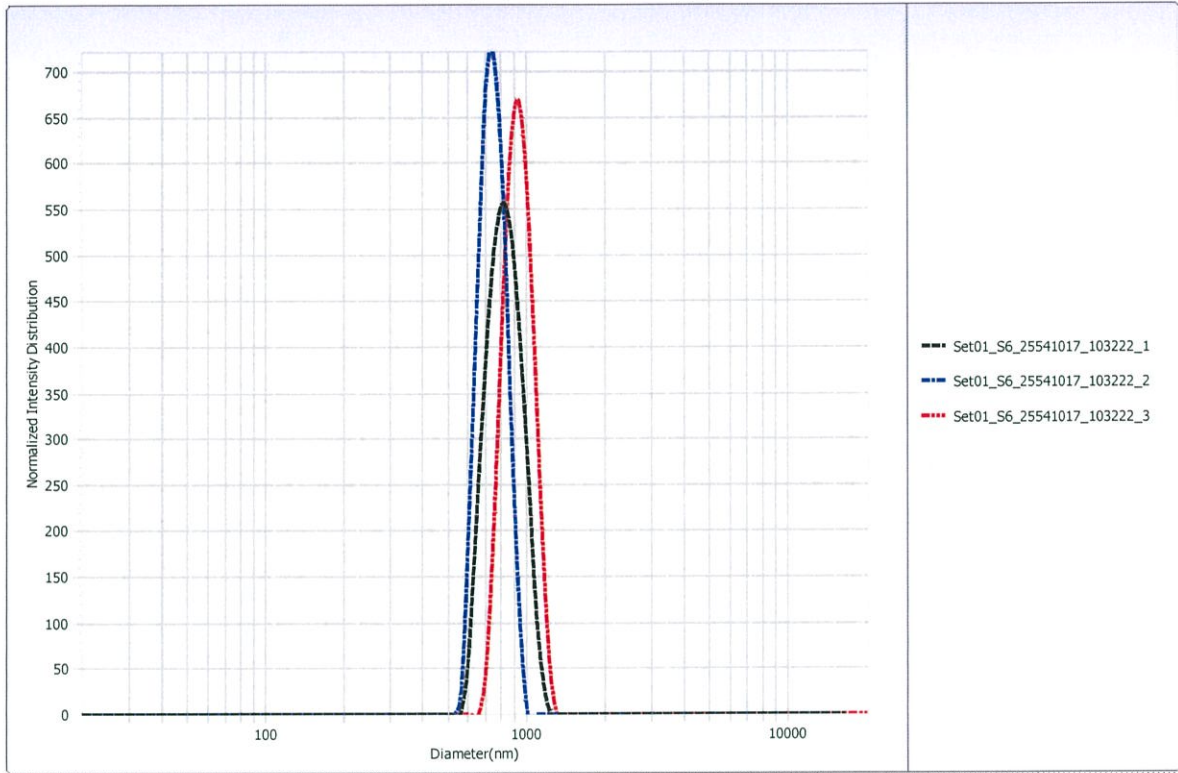
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set01_S4_25541017_095140_1	1	NA	676.2	0.264	1759.0	261.8	493.7	8918.7
2	Set01_S4_25541017_095140_2	2	NA	709.2	0.283	1092.5	257.4	466.5	1619.1
3	Set01_S4_25541017_095140_3	3	NA	829.3	0.316	1131.6	221.7	708.8	2502.5
Average :				738.2	0.288	1327.7	247.0	556.3	4346.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



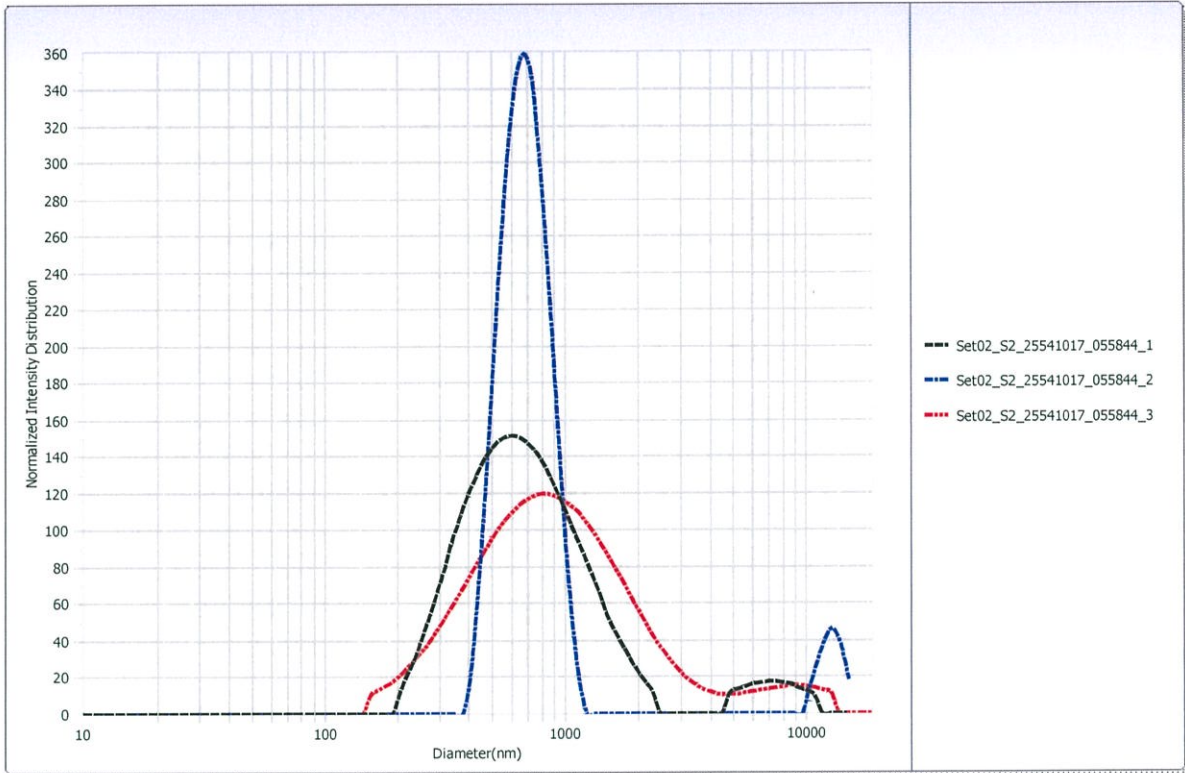
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set01_S5_25541017_100116_1	1	NA	421.5	0.261	520.3	183.6	395.6	961.5
2	Set01_S5_25541017_101935_1	1	NA	530.4	0.212	671.6	237.6	431.6	864.9
3	Set01_S5_25541017_101935_2	2	NA	463.8	0.191	398.6	325.8	382.6	448.5
Average :				471.9	0.221	530.2	249.0	403.3	758.3

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



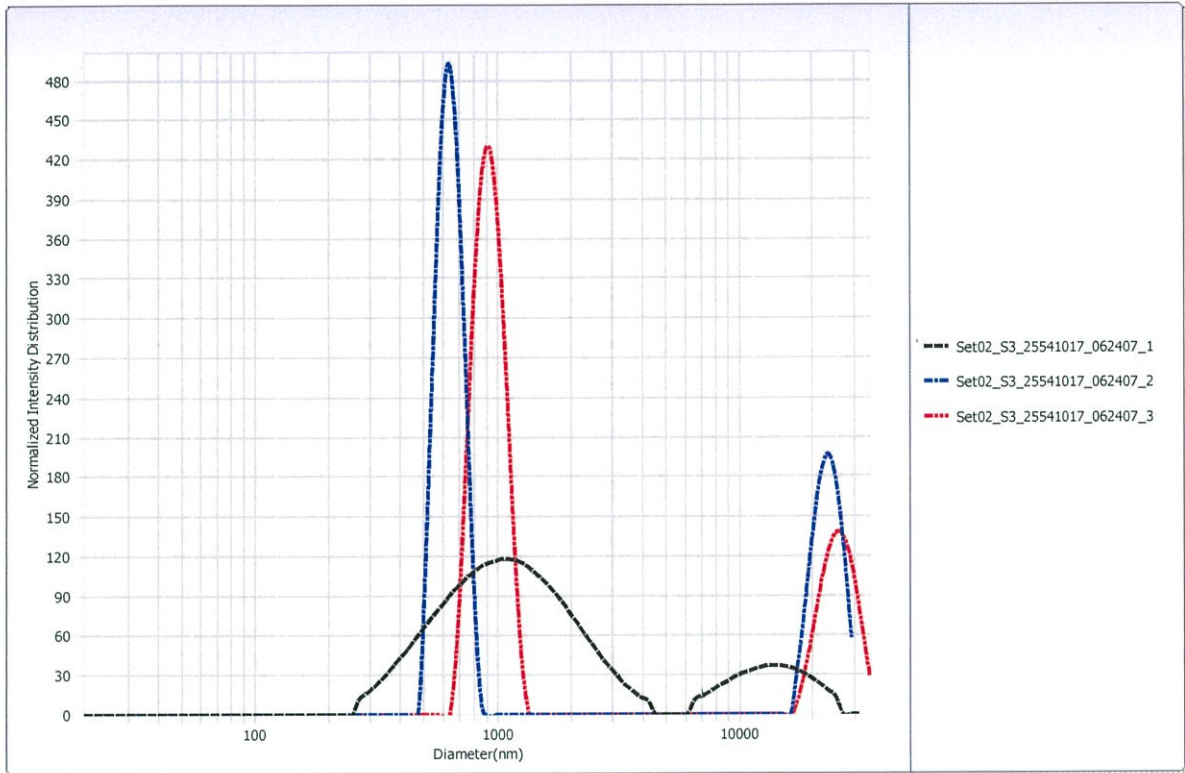
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set01_S6_25541017_103222_1	1	NA	913.8	0.250	832.6	651.1	794.9	974.3
2	Set01_S6_25541017_103222_2	2	NA	790.7	0.246	743.5	611.3	711.9	833.1
3	Set01_S6_25541017_103222_3	3	NA	1034.8	0.288	936.3	759.8	896.9	1059.9
Average :				913.1	0.261	837.5	674.1	801.2	955.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_S2_25541017_055844_1	1	NA	755.0	0.278	1109.4	317.0	635.5	1543.4
2	Set02_S2_25541017_055844_2	2	NA	792.4	0.270	1412.7	485.8	659.6	944.1
3	Set02_S2_25541017_055844_3	3	NA	910.4	0.314	1445.6	318.1	823.2	2561.2
Average :				819.3	0.287	1322.6	373.6	706.1	1682.9

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



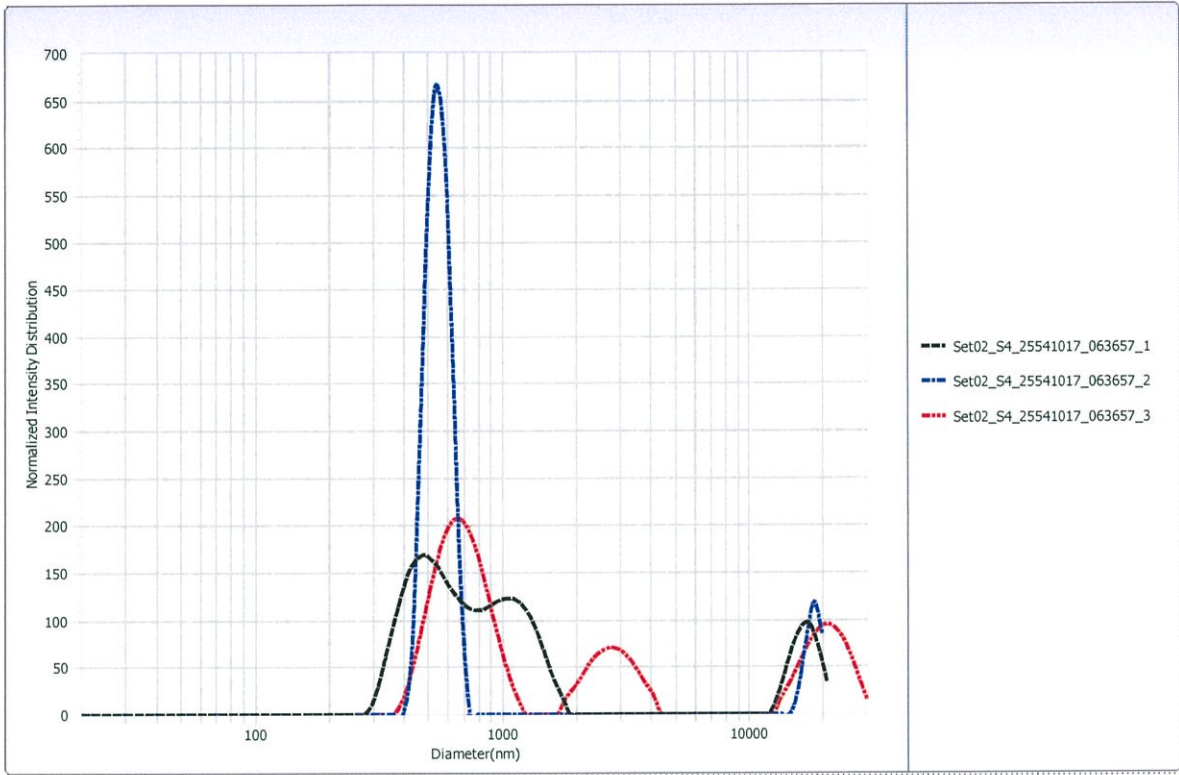
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_S3_25541017_062407_1	1	NA	1354.0	0.403	3327.9	480.5	1187.9	11409.8
2	Set02_S3_25541017_062407_2	2	NA	1209.1	0.436	7682.2	537.8	662.6	23594.3
3	Set02_S3_25541017_062407_3	3	NA	1424.3	0.450	7638.7	751.0	953.0	25835.9
Average :				1329.1	0.430	6216.3	589.8	934.5	20280.0

Print Date : 17/10/54

Print Time : 06:57:24

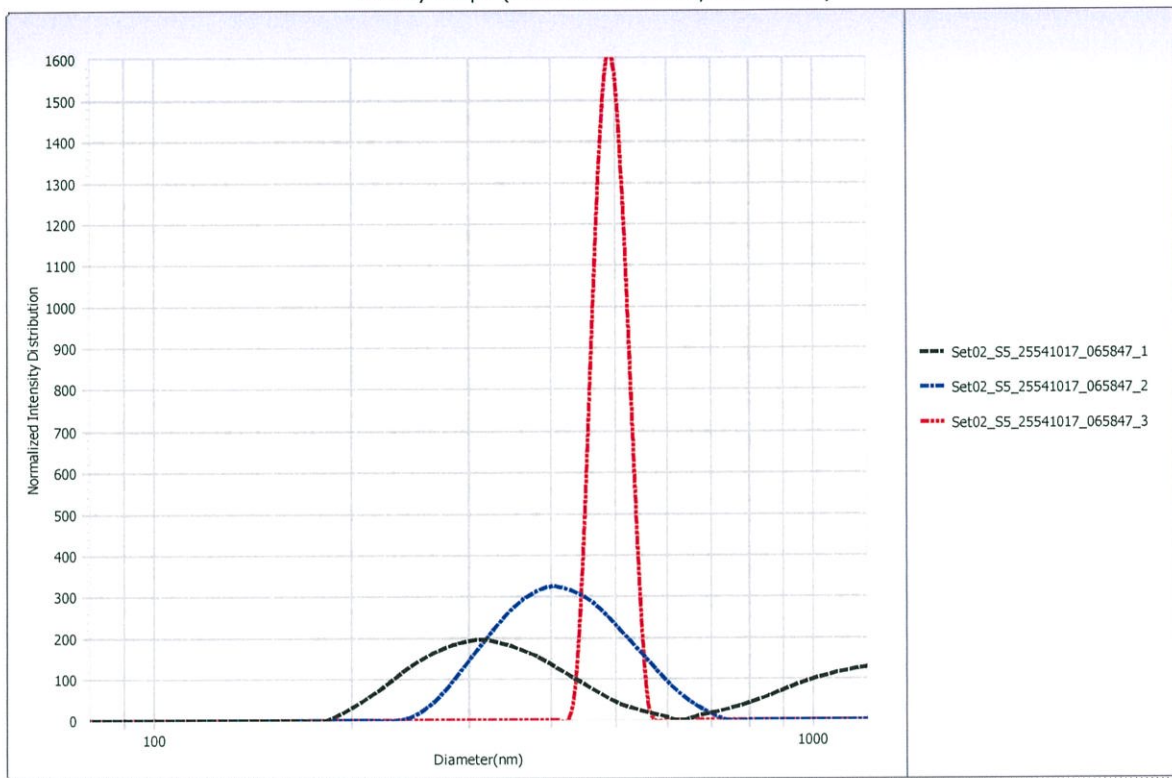
Version 3.73 / 2.30

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



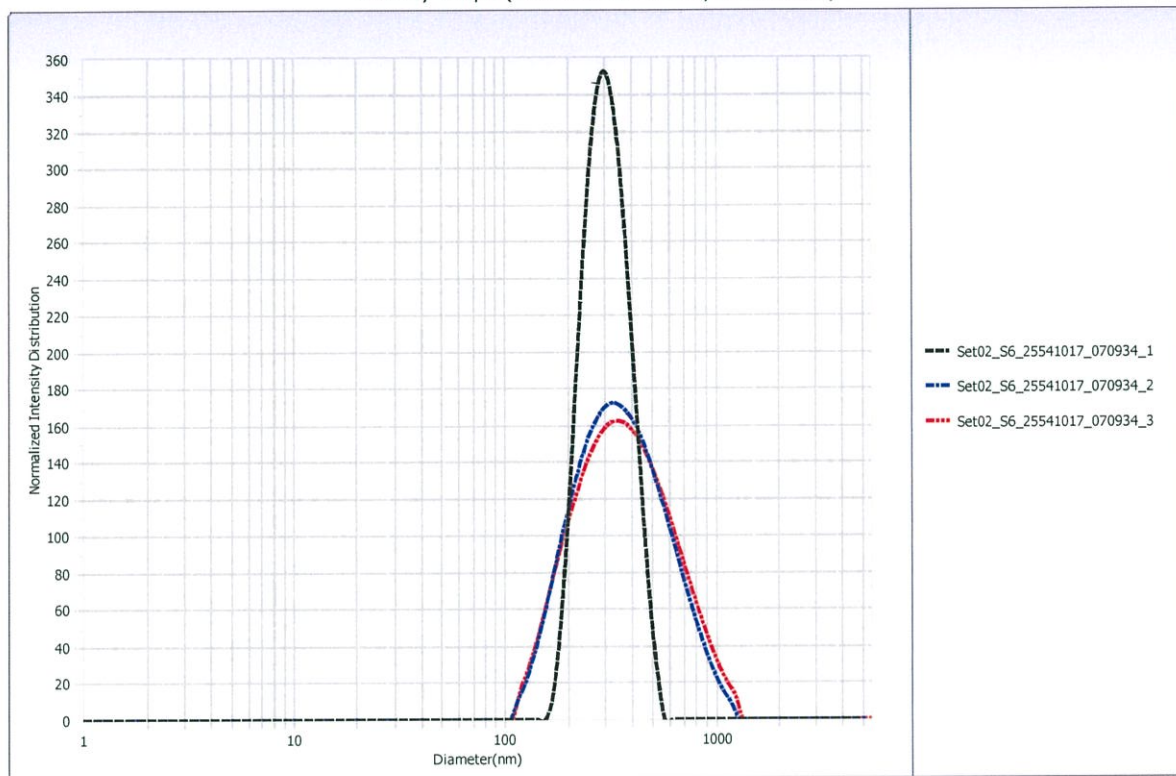
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_S4_25541017_063657_1	1	NA	976.7	0.343	3143.7	386.5	730.9	15148.8
2	Set02_S4_25541017_063657_2	2	NA	922.0	0.354	2369.0	454.8	535.0	15023.6
3	Set02_S4_25541017_063657_3	3	NA	1278.6	0.420	5637.8	505.4	836.5	20283.2
Average :				1059.1	0.372	3716.8	448.9	700.8	16818.5

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



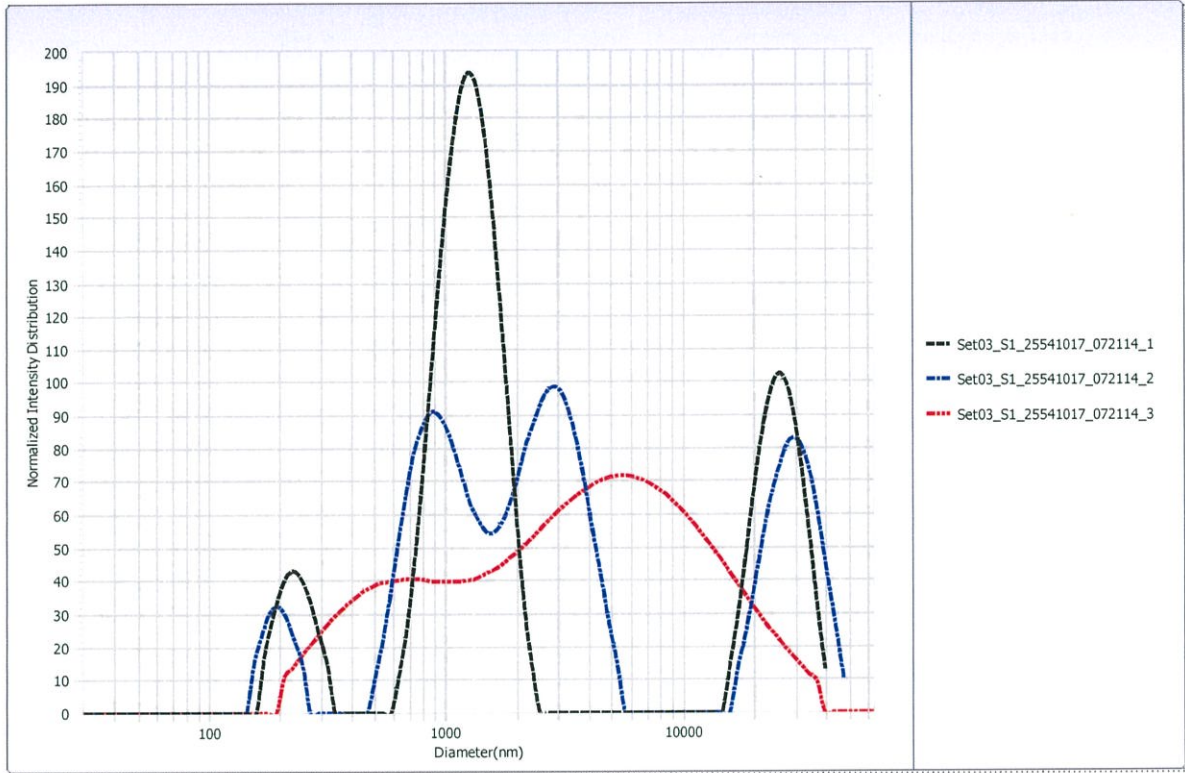
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_SS_25541017_065847_1	1	NA	490.0	0.270	785.5	246.1	434.4	1579.7
2	Set02_SS_25541017_065847_2	2	NA	478.5	0.250	1118.1	306.7	421.8	3964.1
3	Set02_SS_25541017_065847_3	3	NA	494.6	-0.016	492.6	452.5	485.2	520.5
Average :				487.7	0.168	798.7	335.1	447.1	2021.4

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



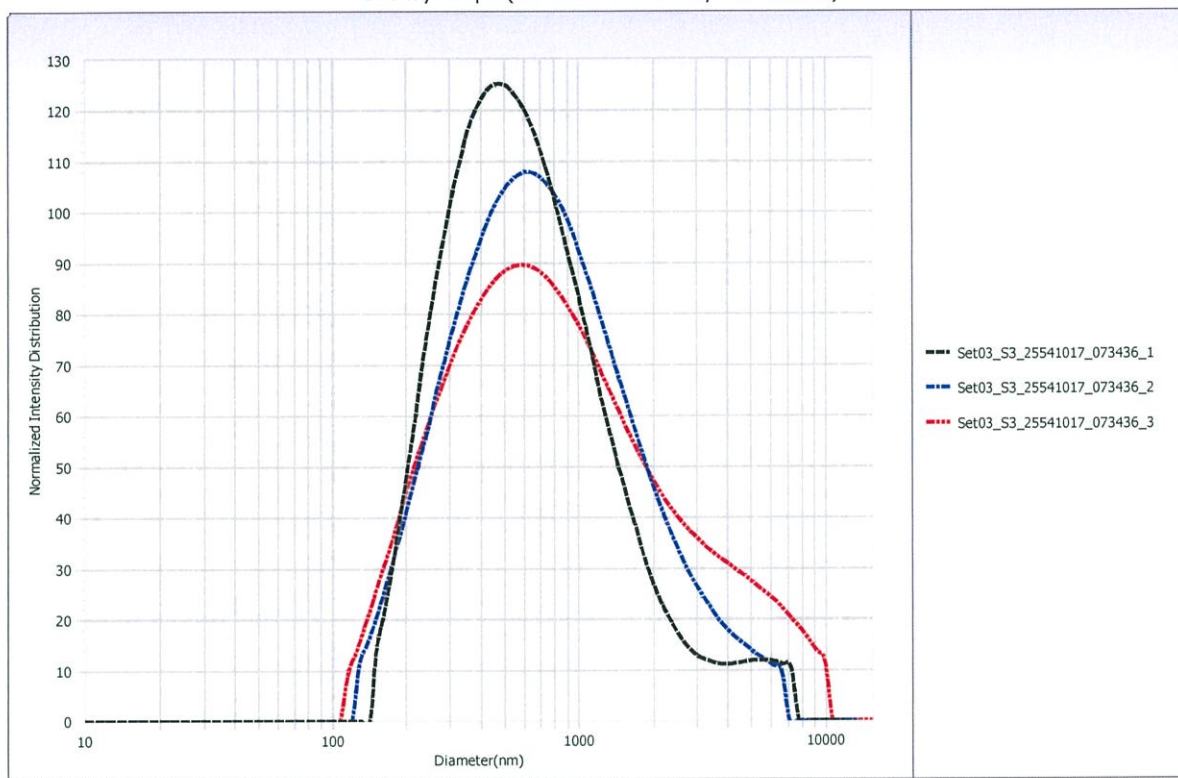
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set02_S6_25541017_070934_1	1	NA	309.8	0.185	309.1	209.9	287.5	395.6
2	Set02_S6_25541017_070934_2	2	NA	318.7	0.190	392.0	176.1	329.3	643.6
3	Set02_S6_25541017_070934_3	3	NA	327.0	0.206	411.9	176.0	341.2	694.6
Average :				318.5	0.194	371.0	187.3	319.3	577.9

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



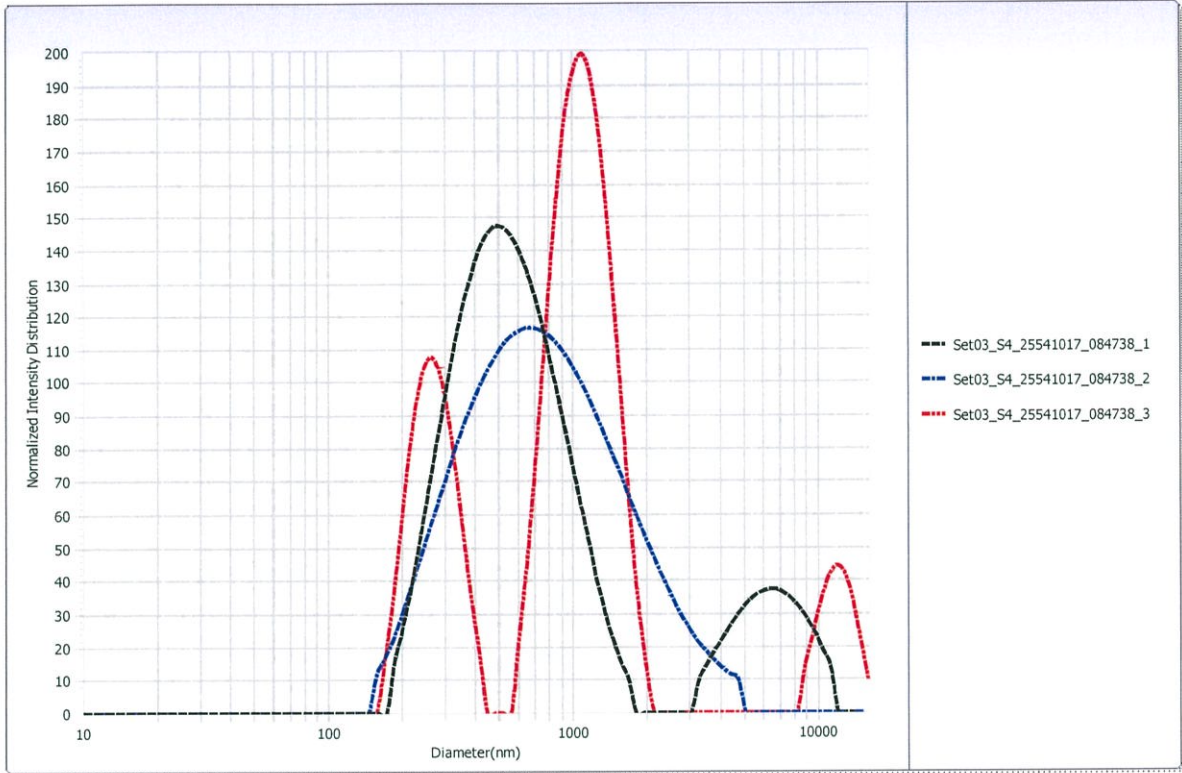
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set03_S1_25541017_072114_1	1	NA	1575.6	0.479	7737.7	652.2	1323.8	26189.2
2	Set03_S1_25541017_072114_2	2	NA	1797.1	0.524	8538.1	629.9	2237.1	29274.7
3	Set03_S1_25541017_072114_3	3	NA	2209.2	0.614	5983.9	469.3	3468.0	14540.9
Average :				1860.6	0.539	7419.9	583.8	2343.0	23334.9

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



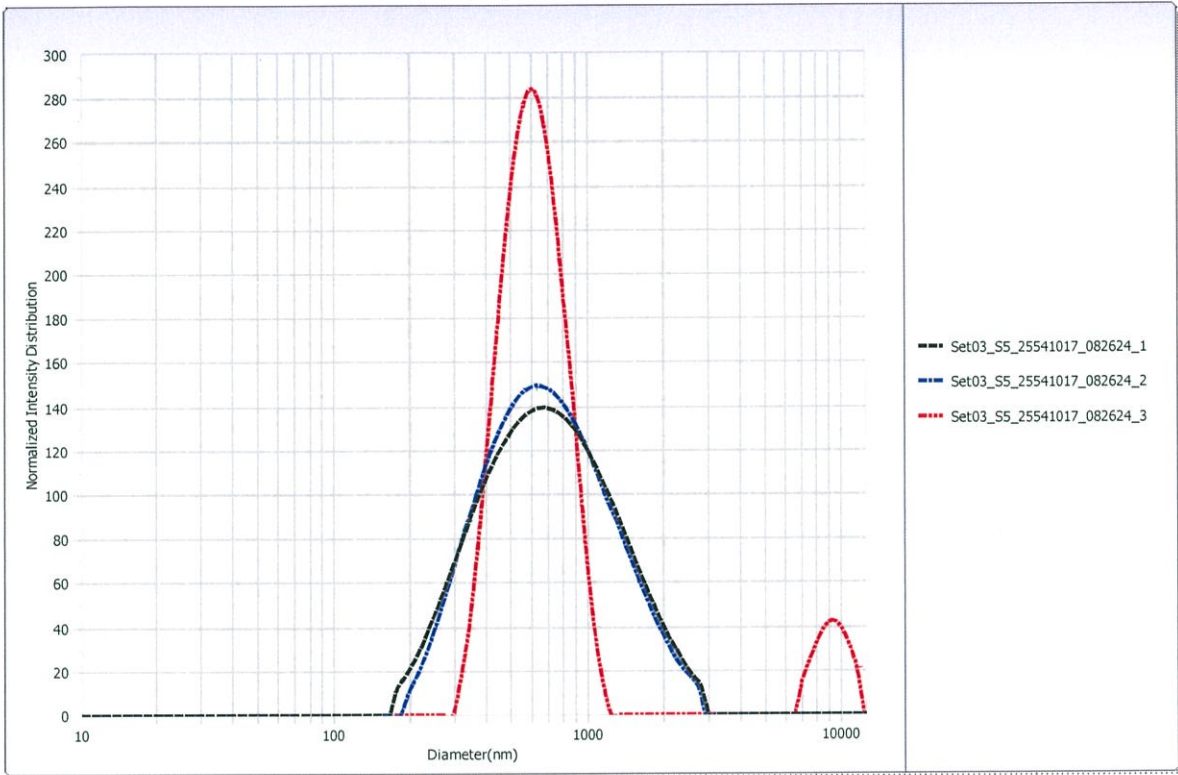
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set03_S3_25541017_073436_1	1	NA	654.7	0.253	892.2	241.0	545.0	1652.9
2	Set03_S3_25541017_073436_2	2	NA	716.6	0.280	1035.5	241.2	656.6	2158.3
3	Set03_S3_25541017_073436_3	3	NA	771.9	0.306	1436.3	225.6	714.5	3604.2
Average :				714.4	0.280	1121.3	235.9	638.7	2471.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



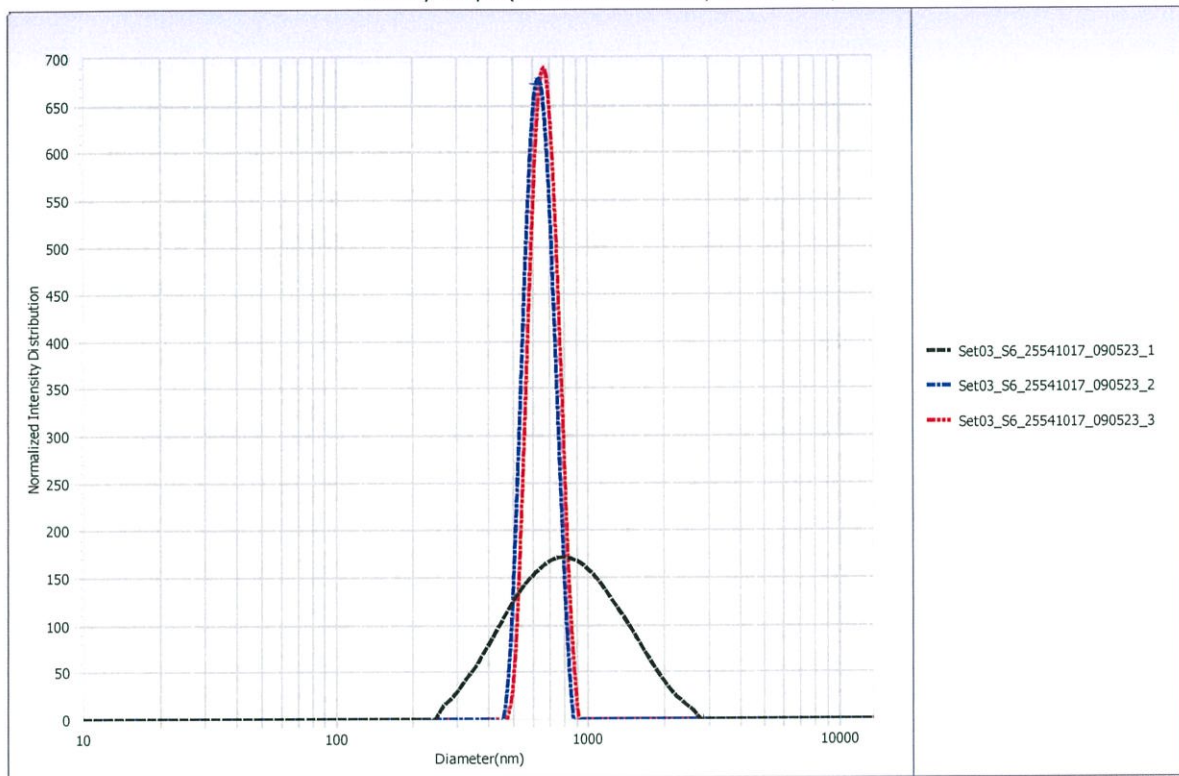
No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set03_S4_25541017_084738_1	1	NA	731.6	0.281	1510.0	281.0	565.9	5233.9
2	Set03_S4_25541017_084738_2	2	NA	797.3	0.291	974.8	276.8	693.4	1937.1
3	Set03_S4_25541017_084738_3	3	NA	808.9	0.300	1818.0	232.8	922.5	1729.3
Average :				779.3	0.291	1434.3	263.5	727.3	2966.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set03_S5_25541017_082624_1	1	NA	663.4	0.282	825.3	302.1	662.2	1495.5
2	Set03_S5_25541017_082624_2	2	NA	730.0	0.264	811.2	319.1	652.9	1441.4
3	Set03_S5_25541017_082624_3	3	NA	696.6	0.241	1297.3	408.4	599.7	977.5
Average :				696.7	0.262	977.9	343.2	638.3	1304.8

Overlay Graph (Normalized Intensity Distribution)



No	Data	Repet. No	pH	Ave.Diameter(nm)	PD	Mean.(nm)	D (10%) (nm)	D (50%) (nm)	D (90%) (nm)
1	Set03_S6_25541017_090523_1	1	NA	836.7	0.261	901.0	403.7	769.8	1482.9
2	Set03_S6_25541017_090523_2	2	NA	707.6	0.243	641.2	521.0	614.1	725.4
3	Set03_S6_25541017_090523_3	3	NA	733.8	0.254	670.9	547.7	642.8	757.3
Average :				759.4	0.253	737.7	490.8	675.6	988.5