

การปรับปรุงคุณภาพปั๊มฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะโดยเทคนิคการแต่งแร่



นายวิชา ประกายพรรณ

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

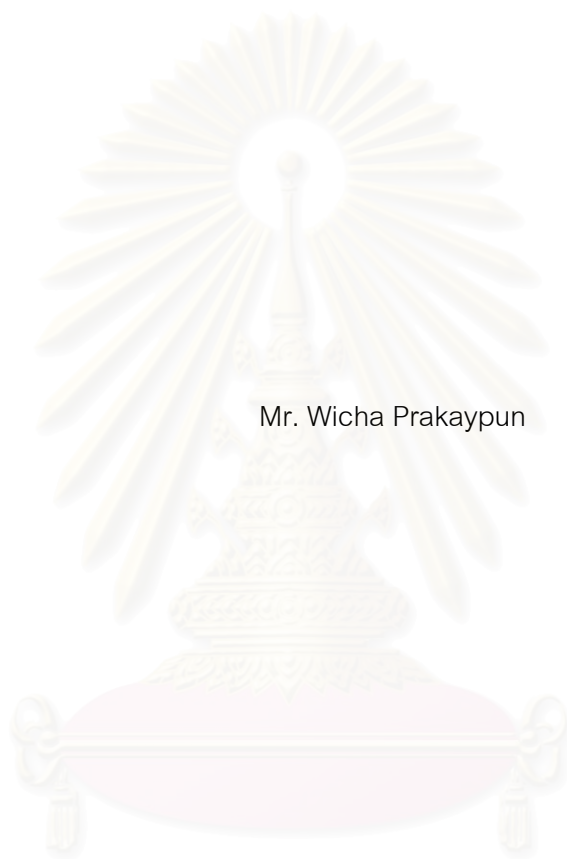
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UPGRADING OF MAE MOH FLUE-GAS GYPSUM BY MINERAL PROCESSING TECHNIQUE




Mr. Wicha Prakaypun

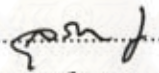
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering  
Department of Mining and Petroleum Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2006  
Copyright of Chulalongkorn University

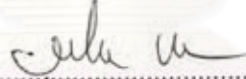
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูออไรด์แหล่งแม่เมาะโดยเทคนิคการแต่งแร่
โดย	นายวิชา ประกายพรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้ให้นักศึกษานี้  
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ภูวิจิตร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. จิตศักดิ์ บุญปราโมทย์)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวิตย์ วิวรรณะเดช)

นายวิชา ประกายพรรณ : การปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะโดยเทคนิคการแต่งแร่. (UPGRADING OF MAE MOH FLUE-GAS GYPSUM BY MINERAL PROCESSING TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ภิญญ มีจันทร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย 75 หน้า.

ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue-Gas Gypsum) หรือยิปซัมเอฟจีดี (FGD Gypsum) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น วัสดุเหลือทิ้ง (Waste) ซึ่งเกิดจากเครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือเครื่องเอฟจีดี (FGD : Flue Gas Desulfurizer) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊ส จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยเทคนิคการแต่งแร่เพื่อทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สนั้นมีคุณภาพเท่ากับมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม โดยนำยิปซัมฟลูแก๊สมาผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) แล้วนำเอาส่วนหยาบ (Underflow) ที่ได้มาผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator : WHIMS) ก่อนนำเอาส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็กมาผ่าน ขบวนการขัดสีผิวแบบเปียก (Wet Scrubbing) โดยใช้สารเคมีช่วย ซึ่งขบวนการทั้งหมดดังกล่าวสามารถ เพิ่มคุณภาพของยิปซัมฟลูแก๊สได้ โดยเฉพาะในด้านความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) ผลที่ได้จากการศึกษ พบว่าการคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สด้วยไฮโดรไซโคลนโดยการป้อนแร่ที่ ความเข้มข้นแร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักและความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นสภาวะที่สามารถคัด แยกส่วนหยาบ (Underflow) ที่มีความขาวเพิ่มขึ้นได้ดีที่สุด และสามารถเก็บแร่ได้ 92.15% ของน้ำหนัก ของแร่ป้อน ส่วนละเอียด (Overflow) ประกอบด้วย เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนใหญ่ และมลทินอื่นๆ ใน ขั้นตอนต่อมา นำส่วนหยาบที่ได้มาผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 70 โวลต์และกระแสไฟฟ้า 14 แอมแปร์ สามารถเก็บมลทินที่ติดแม่เหล็กในส่วนติดแม่เหล็กได้มากที่สุด จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ไม่ติดแม่เหล็กที่ได้ไปผ่านเครื่องขัดสีผิวโดยเติมโซดาไฟ (NaOH) ที่ 1.43 กิโลกรัม ต่อตัน โดยมีความเข้มข้นแร่ป้อน 70% solid โดยน้ำหนักและความเร็วรอบที่ 600 รอบต่อนาที พบว่า ผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ได้ความขาวมีค่าเท่ากับ 61.25 และความขาวสว่างมีค่าเท่ากับ 80.65 ซึ่งค่าความขาว และค่าความขาวสว่างดังกล่าวสูงกว่าค่าของยิปซัมธรรมชาติที่มีค่าเท่ากับ 57.55 และ 66.95 ตามลำดับ

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม  
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต..... *อุษา ปากมพพรรณ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ศุภชัย น*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# #4670493921 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: FLUE-GAS GYPSUM / MINERAL PROCESSING / HYDROCYCLONE / WET HIGH INTENSITY MAGNETIC SEPARATOR / SCRUBBER

WICHA PRAKAYPUN: UPGRADING OF MAE MOH FLUE-GAS GYPSUM BY MINERAL PROCESSING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PINYO MEECHUMNA ,Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SOMSAK SAISINCHAI  
75 pp.

Flue-Gas Gypsum or FGD Gypsum for this study is the waste from Mae Moh power plant Flue-Gas Desulfurization (FGD) process. The objective of this study is to upgrade Mae Moh flue-gas gypsum by mineral processing technique to obtain gypsum product to be conformed with the industrial standard gypsum. The flue-gas gypsum is firstly classified by hydrocyclone and the underflow fraction of the hydrocyclone is then passed through Wet High Intensity Magnetic Separator (or WHIMS). Finally, The non-magnetic products is chemically wet scrubbed to improve the whiteness and brightness of the gypsum product. From the study, it is found that feeding slurried flue-gas gypsum through hydrocyclone with 5% solid by weight at 30 psi to obtained whiter gypsum (underflow) with 92.15% yield. The overflow consists of fly ash and other impurities. The underflow fraction is then passed through WHIMS at Voltage = 70 and Amperage = 14 to obtain non-magnetic product with less magnetic impurities. The non-magnetic product is further processed by wet scrubbing with caustic soda (NaOH) at 1.43 kilograms per ton feed with 70% solid concentration at 600 rpm for 30 minutes. The obtained product having whiteness value of 61.25 and brightness value of 80.65 which is higher than that of natural gypsum with the values of 57.55 and 66.95 respectively.

Department of Mining and Petroleum Engineering  
Field of Study Georesources Engineering  
Academic year 2006

Student's signature.....*Wicha Prakaypun*  
Advisor's signature.....*Pinyo Meechumna*  
Co-advisor's.....*Somsak Saisinchai*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมาและ ขอกราบขอพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเหมืองแร่และปิโตรเลียมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ และการถ่ายภาพคณะ วิทยาศาสตร์ที่อนุเคราะห์ เครื่องมือทดสอบ และขอขอบคุณ ดร.วิจิต ประกายพรธร ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และ ให้คำแนะนำด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอพระคุณอย่างสูงต่อบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งให้ความรัก ความเข้าใจเป็นกำลังใจ และสนับสนุนในด้านกำลังทรัพย์ ให้การศึกษากับผู้วิจัยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษาลุล่วงลงได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 บริหารศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 เครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	3
2.1.1 ระบบเตรียมน้ำหิโนปูน.....	3
2.1.2 ระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	3
2.1.3 ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม.....	5
2.2 ยิปซัมฟลูแก๊ส.....	6
2.3 การอบแห้ง.....	8
2.4 ไฮโดรไซโคลน.....	9
2.5 แร่ยิปซัมและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยิปซัม.....	17
2.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก.595-2528.....	21
2.7 การทำ Agglomeration .....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 วัตถุดิบและสารเคมี.....	23
3.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก การปรับยิปซัมฟลูแก๊ส.....	23
3.3 การศึกษาการคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....	23

3.4 การศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator : WHIMS) ในการแยกส่วนติดแม่เหล็กออก.....	25
3.5 การศึกษาผลของเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ในการปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness).....	26
4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองการใช้เทคโนโลยีการแต่งแร่โดยการใช้เทคนิคการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนกับยิปซัมฟลูแก๊ส.....	27
4.2 ผลการทดลองการศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator) ในการแยกส่วนติดแม่เหล็กออกมา.....	40
4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของเครื่องขัดสี (Scrubber Machine) ในการปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) .....	56
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	66
ภาคผนวก ค.....	68
ภาคผนวก ง.....	69
ภาคผนวก จ.....	70
ภาคผนวก ฉ.....	71
ภาคผนวก ช.....	72
ภาคผนวก ซ.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	75



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงคุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊ส.....	8
2-2 สมบัติที่ต้องการของยิปซัมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528.....	21
4-1 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมฟลูแก๊สวิเคราะห์โดยวิธี XRF.....	28
4-2 เฟสองค์ประกอบของยิปซัมธรรมชาติกับยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษานี้.....	28
4-3 ความชื้นแฉะ (Free Moisture) ของยิปซัมฟลูแก๊ส (ร้อยละ).....	30
4-4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ของยิปซัมฟลูแก๊สวิเคราะห์โดย Laser Diffraction Particle Size Analyzer .....	30
4-5 สีของแร่ยิปซัมธรรมชาติกับแร่ยิปซัมฟลูแก๊สที่มองด้วยตาเปล่า (ดูรูปที่ 4-1 และ 4-2 ประกอบ) .....	30
4-6 แสดงผลการทดลองการคัดขนาดยิปซัมโดยใช้ไฮโดรไซโคลอน.....	36
4-7 แสดงปริมาณส่วนที่ติดแม่เหล็กที่ค้างในแผ่นกรองในแต่ละความต่างศักย์ ขนาดต่างๆ.....	40
4-8 ค่าความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) ที่อ่านได้จากเครื่อง Technidyne ของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากการทดลอง.....	47
4-9 ผลการวิเคราะห์ XRF ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่ ความเข้มข้น 5% solid และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10,20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	54
4-10 แสดงเฟสองค์ประกอบของส่วนไม่ติดแม่เหล็กที่ผ่านการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลอน และเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นและความดันต่างๆกัน	56
4-11 แสดงค่าความขาว (Whiteness) และค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนและ หลังเข้าเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	58
4-12 เฟสองค์ประกอบของแร่ที่ผ่านการขัดสีผิว (Scrubbed Product) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	59

## สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 แสดงกระบวนการการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	5
2-2 แสดงยิปซัมพลูแก๊สที่เกิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	7
2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสียไปกับระยะเวลาในการอบ.....	9
2-4 แสดงส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) .....	10
2-5 การป้อนแร่เข้าไฮโดรไซโคลนในตำแหน่งต่างๆ กัน.....	11
2-6 แสดงแรงกระทำที่เกิดภายในไฮโดรไซโคลน.....	12
2-7 โชนความเร็วในแนวตั้งและแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน.....	13
2-8 การกระจายความเร็วตามแนวตั้งของของไหลในไฮโดรไซโคลน.....	13
2-9 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลไฮโดรไซโคลน.....	14
2-10 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสวงกลมของของไหลในไฮโดรไซโคลน.....	14
2-11 Regions of Similar Size Distribution within Cyclone.....	15
2-12 กราฟแสดงสมรรถนะของไฮโดรไซโคลน (Tromp Curve) .....	16
2-13 แสดงการเปลี่ยนแปลงระบบของยิปซัม $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	18
2-14 $\beta$ -Hemihydrate.....	19
2-15 $\alpha$ -Hemihydrate.....	20
2-16 แสดงการทำเป็น Briquette โดยใช้ Roller Press.....	22
2-17 แสดงรูปภาพการอัดก้อน Briquette แบบ Uniaxial Press.....	22
2-18 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมพลูแก๊สที่อัดที่แรงดัน 200 บาร์.....	22
3-1 แผนผัง (Flow Sheet) การคัดขนาดยิปซัมพลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน.....	24
3-2 แผนผัง (Flow Sheet) การศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียก (Wet High Intensity Magnetic Separator) ในการแยกส่วนไม่ติดแม่เหล็กและส่วนติดแม่เหล็กออกมา.....	25
3-3 แผนผัง (Flow sheet) การทดลองนำเอาส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ผ่านเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) เพื่อปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) .....	26
4-1 ยิปซัมพลูแก๊สที่ได้รับมาจากเหมืองแม่เมาะ.....	27
4-2 ยิปซัมธรรมชาติ.....	27
4-3 แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมพลูแก๊ส.....	29

## สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
4-4 แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมธรรมชาติ.....	29
4-5 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊ส.....	31
4-6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยิปซัมฟลูแก๊ส.....	31
4-7 มลทินที่อยู่ในยิปซัมฟลูแก๊ส.....	32
4-8 แสดงไฮโดรไซโคลน (KREB Hydrocyclone) ขณะทำงาน.....	33
4-9 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮไซโคลนในส่วนหยาบ (Underflow) โดยการป้อนแร่ที่ 5%solid โดยน้ำหนักและ 10%solid โดยน้ำหนักที่ความดันลดที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	33
4-10 ส่วนล้นเอียง (Overflow) ซึ่งประกอบด้วยตะกอนสีน้ำตาลแดง.....	34
4-11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนอนุภาคเถ้าลอยที่อยู่ในตะกอนสีน้ำตาลแดงซึ่งเป็นส่วนล้นเอียง (Overflow) .....	34
4-12 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคในส่วนล้นเอียง (Overflow)ของตะกอนสีน้ำตาลแดง.....	35
4-13 ผลการวิเคราะห์ XRD ของส่วนล้นเอียง (Overflow) .....	35
4-14 ผลการวิเคราะห์ XRDของ Fly Ash แหล่งแม่เมาะจังหวัดลำปาง.....	36
4-15 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	37
4-16 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	37
4-17 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	38
4-18 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 10% solid โดยน้ำหนักความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	38

## สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
4-19	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่แร็ป้อน 10% solid โดยน้ำหนักความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 39
4-20	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่แร็ป้อน 10% solid โดยน้ำหนักความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 39
4-21	มลทินที่ค้างในแผ่นกรอง..... 41
4-22	แผ่นกรองในเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง..... 41
4-23	กราฟแสดงปริมาณมลทินที่ค้างในแผ่นกรองเมื่อความต่างศักย์เปลี่ยนไป..... 41
4-24	เครื่องป้อน (Feeding Device) ทำการป้อนแร่เปียกชื้นที่ผ่านการคัดขนาดเข้าเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มข้นสูงแบบเปียก..... 42
4-25	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของมลทินติดแม่เหล็กที่ค้างในแผ่นกรอง (Matrix) แสดงสารประกอบเป็นแร่ฮีมาไทต์ แร่แมกนีไทต์ และแร่ยิปซัม(เล็กน้อย)..... 42
4-26	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 43
4-27	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 43
4-28	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 44

## สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
4-29 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่าน เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	44
4-30 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่าน เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	45
4-31 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่าน เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	45
4-32 การเตรียมตัวอย่างที่จะเข้าเครื่อง Technidyne.....	46
4-33 ตัวอย่างที่เตรียมด้วยแรงกด 20 bar เพื่อที่จะส่งแก๊สจากตาเปล่า.....	46
4-34 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊ส.....	48
4-35 ภาพถ่าย SEM ของ Non-Magnetic Product ของส่วนหยาบ (Underflow) ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและ ผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มข้นสูงแบบเปียก.....	48
4-36 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแรียปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มข้นสูง แบบเปียก.....	49
4-37 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแรียปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มข้นสูง แบบเปียก.....	50

## สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
4-38 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูง แบบเปียก.....	50
4-39 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูง แบบเปียก.....	51
4-40 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูง แบบเปียก.....	51
4-41 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูง แบบเปียก.....	52
4-42 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด (Optimum Condition) เมื่อเปรียบเทียบกับ ผลวิเคราะห์ XRD ของ ยิปซัมฟลูแก๊สและยิปซัมธรรมชาติ.....	53
4-43 ขณะทำการขัดสีผิวและหลังผ่านกระบวนการขัดสีผิวที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	56
4-44 แสดงค่าความขาวและความสว่างเปรียบเทียบในทุกสภาวะการทดลอง.....	58
5-1 ผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สจากแหล่งแม่เกาะที่เหมาะสม.....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่ยิปซัม เป็นวัตถุดิบจำเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท ยิปซัมจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน เช่น นำไปใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมด้านเซรามิก และมีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเซรามิกมากขึ้น

ในปัจจุบันหลายประเทศให้ความสนใจทางด้านสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการควบคุมการปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศ โดยเฉพาะมลพิษจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงต้องมีการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสีย (Flue Gas) ก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศโดยกระบวนการกำจัดนี้เรียกว่า ฟลูแก๊สดีซัลฟิวไรเซชัน (Flue Gas Desulfurization) โดยใช้หินปูนหรือ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นตัวดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในกระบวนการนี้ทำให้เกิดยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue-Gas Gypsum) หรือยิปซัมเอฟจีดี (FGD Gypsum) เป็นของเหลือทิ้ง (Waste) ในปริมาณมาก

ในประเทศไทยยิปซัมฟลูแก๊สมีแหล่งผลิตปริมาณมากเพียงแหล่งเดียว คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มียิปซัมฟลูแก๊สผลิตออกเป็นจำนวนปีละประมาณ 3 ล้านตัน (สำนักวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2541) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการกำจัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะโดยเทคโนโลยีการแต่งแร่ (Upgrading of Mae Moh Flue-Gas Gypsum by Mineral Processing Technique) พบว่าการคัดขนาดด้วยวิธีไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) การแยกด้วยแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator) แล้วนำไปผ่านขบวนการขัดสีผิว (Scrubbing) ด้วยสารเคมีจะช่วยทำให้เพิ่มความบริสุทธิ์และทำให้สีของยิปซัมฟลูแก๊สขาวขึ้นได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะโดยเทคโนโลยีการแต่งแร่
- เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะโดยเทคโนโลยีการแต่งแร่ เพื่อที่จะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ประโยชน์แทนที่ยิปซัมธรรมชาติ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เพิ่มมูลค่าให้กับยิปซัมฟลูแก๊ส
- ลดปริมาณการสูญเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการดีซัลฟลูไรเซชันในโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่จังหวัดลำปาง
- เป็นข้อมูลส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการศึกษาถึงการนำประโยชน์จากยิปซัมฟลูแก๊สในด้านต่างๆมากขึ้น
- เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของยิปซัมฟลูแก๊สให้ดียิ่งขึ้น
- ลดปริมาณการทำเหมืองยิปซัมธรรมชาติ ช่วยให้ปริมาณสำรองของยิปซัมธรรมชาติในประเทศไม่ลดลงเร็วเกินไป เป็นการยืดอายุปริมาณสำรองของยิปซัมธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 เครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization or FGD) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (สำนักงานวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2541)

เครื่องกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurizer or FGD) หรือเครื่องเอพจีดีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นชนิดเปียก (Wet Type) ใช้หินปูน (Calcium Carbonate- $\text{CaCO}_3$ ) เป็นตัวดูดซับ (Absorbent) ทำให้เกิดยิปซัม (Calcium Sulphate Dihydrate- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ที่เรียกว่า ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue Gas Gypsum) หรือยิปซัมเอพจีดี (FGD Gypsum) การทำงานของระบบเอพจีดีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประกอบด้วย 3 ระบบใหญ่ๆ คือ

##### 2.1.1 ระบบเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation System)

หินปูนจะถูกส่งโดยรถบรรทุกมายังบริเวณ FGD ซึ่งหินปูนดังกล่าวจะถูกขังน้ำหนักและลำเลียงเข้าไปเก็บไว้ในถังเก็บหินปูน (Limestone Silo) หลังจากนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่โม่บดหินปูน ผ่านทางสายพาน (Limestone Feeder) หินปูนจะถูกบดผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมภายในโม่บดหินปูนจนเป็นของเหลว และไหลลงสู่ถังพัก (Mill Recycle Tank) น้ำหินปูนเหลวจะถูกบดจากถังพักไปยังชุดแยกขนาด (Hydrocyclone) โดยหินปูนเหลวที่ถูกบดได้ขนาดแล้วจะผ่านชุดแยกขนาดไปเก็บไว้ในถังป้อนน้ำหินปูน (Reagent Feed Tank) ส่วนหินปูนที่ยังไม่ได้ขนาดจะไหลกลับไปยังโม่บดเพื่อบดอีกครั้งจนได้ขนาด ที่ถังป้อนน้ำหินปูนจะมีปั๊ม Reagent Feed Pump ติดตั้งเพื่อปั๊มน้ำหินปูนไปใช้ในระบบอื่น ๆ ต่อไป และระบบดังกล่าวยังถูกออกแบบให้มีการไหลวน (Recirculate) ของน้ำหินปูนด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันน้ำหินปูนอุดตันภายในท่อนอกจากนี้ยังมีชุดใบพายกวน (Agitator) ติดตั้งอยู่ที่ถังป้อนน้ำหินปูน เพื่อกวนไม่ให้น้ำหินปูนตกตะกอนด้วย

##### 2.1.2 ระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorber System)

ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้จับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorber) จะมีลักษณะคล้ายหอคอย (Tower) โดยภายในจะฉาบ (Liner) ด้วยสารทนกรด ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อน ที่ส่วนบนของ Absorber จะมีชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Gas to Gas Heater) ติดตั้งอยู่ทั้งทางด้านเข้าและออกจาก Absorber อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีลักษณะเป็นท่อคล้ายหม้อน้ำรถยนต์ ดังนั้นแก๊สไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงผ่านเข้ามาจะถ่ายเทความร้อนให้น้ำภายในท่อร้อนขึ้น และแก๊สไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำลง ส่วนน้ำในท่อที่ร้อนขึ้นก็จะไหลเวียนไปยังชุดถ่ายเทความร้อนชุดที่ติดตั้งอยู่ทางด้านออกของ

Absorber เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก๊สไอเสียที่จะออกจาก Absorber ให้ร้อนขึ้น ที่ส่วนล่างของ Absorber จะมีลักษณะ เป็นอ่าง (Sump) และมีน้ำผสมน้ำหินปูนบรรจุอยู่และมีอุปกรณ์ที่สำคัญติดตั้งอยู่ คือ

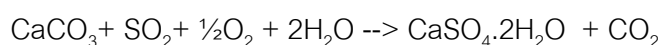
Recirculating Pump เป็นปั๊มจำนวน 4 ตัว(ปกติเดิน 3 ตัว Stand-by 1 ตัว) มีหน้าที่ปัมน้ำผสมน้ำหินปูน จากส่วนล่างขึ้นไปยังชุดหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนกลางของ Absorber

Absorber Bleed Pump เป็นปั๊มจำนวน 2 ตัว (ปกติเดิน 1 ตัว Stand-by 1 ตัว) มีหน้าที่ปัมน้ำผสมยิปซัมจากอ่าง Absorber ไปยังระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม

Oxidation Air Blower เป็นอุปกรณ์อัดอากาศจำนวน 3 ตัว (ปกติเดิน 2 ตัว Stand-by 1 ตัว) ทำหน้าที่อัดอากาศเข้าไปในอ่างของ Absorber เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเติมออกซิเจน (Oxidation) ในขบวนการผลิตยิปซัม

Absorber Sump Agitator เป็นอุปกรณ์ลักษณะคล้ายใบพาย เพื่อใช้กววนเพื่อให้สารละลายเข้ากัน ในอ่าง Absorber ที่ส่วนกลางของ Absorber จะมีชุดหัวฉีด (Nozzle) ที่รับน้ำผสมน้ำหินปูนจากชุด Recirculating Pump ติดตั้งอยู่เพื่อทำให้เกิดการพ่นกระจาย (Spray) ของน้ำผสมน้ำหินปูนใน Absorber ถัดจากชุดหัวฉีดลงมาจะมีชุดตะแกรง (Grid Pack) เพื่อให้ละอองน้ำผสมน้ำหินปูนที่ฉีดจากหัวฉีดผสมกับแก๊สไอเสียได้ดียิ่งขึ้น และระหว่างชุดหัวฉีดทางด้านออกของ Absorber กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีตะแกรงดักละอองน้ำ (Mist Eliminator) ติดตั้งอยู่เพื่อดักไม่ให้ละอองน้ำปะปนออกไปกับแก๊สไอเสียที่ถูกแยกแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกไปแล้ว

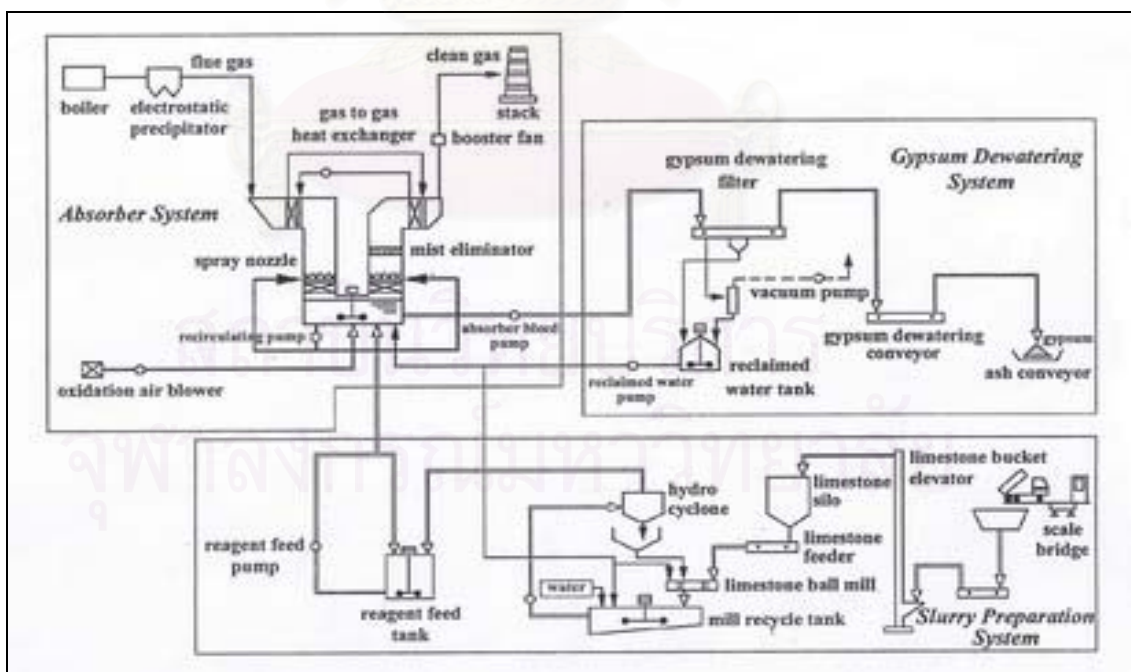
การทำงานของระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเริ่มต้นที่เมื่อแก๊สไอเสียจากหม้อน้ำ (Boiler) ผ่านเครื่องจับฝุ่น (Electrostatic Precipitator) แล้วและมีอุณหภูมิประมาณ  $163^{\circ}\text{C}$  ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาใน Absorber อุณหภูมิของแก๊สไอเสียจะลดลงเหลือ  $145^{\circ}\text{C}$  แก๊สไอเสียดังกล่าวก็จะปะทะและคลุกเคล้ากับน้ำผสมน้ำหินปูนที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีดใน Absorber น้ำส่วนหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอน้ำไปกับแก๊สไอเสียและอุณหภูมิของแก๊สไอเสียใน Absorber ก็จะเย็นลงถึงอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturated Temperature) ที่ประมาณ  $62^{\circ}\text{C}$  แต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่พ่นกระจายออกจากหัวฉีดได้ถูกออกแบบไว้ให้มีปริมาณสูงกว่าอัตราการระเหยมากจึงทำให้มีน้ำผสมน้ำหินปูนบางส่วนตกกลับลงมายังอ่างด้านล่างของ Absorber และน้ำผสมน้ำหินปูนเหล่านี้เอง จะละลายเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสียโดยมีการเติมอากาศเข้ามาใน Absorber จาก Oxidation Blower จึงเกิดปฏิกิริยาเติมออกซิเจน (Oxidation) ขึ้นในขบวนการจนได้เป็นยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ออกมา ดังสมการ



จากปฏิกิริยาดังกล่าว แก๊สไอเสียที่ไหลออกจาก Absorber จะมีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนอยู่น้อยมาก ก่อนที่แก๊สไอเสียดังกล่าวจะออกจาก Absorber แก๊สไอเสียดังกล่าวจะผ่านตะแกรงเพื่อดักเอาละอองน้ำออก และผ่านไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงไหลออกจาก Absorber ระหว่าง Absorber กับปล่องควันจะมีพัดลมช่วย (Booster Fan) เป็นตัวดูดเอาแก๊สไอเสียไปยังปล่องควันและปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอกต่อไป ส่วนยิปซัมที่เกิดขึ้นเป็นผลึกปนอยู่กับสารละลายในอ่าง Absorber และจะถูก Absorber Bleed Pump บั้มส่งไปยังระบบแยกน้ำออกจากยิปซัมต่อไปจะเห็นว่าระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสียนั้น สามารถจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ปริมาณที่สูงมาก คือ ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนเข้า Absorber ประมาณ 17 ตัน/ชม.ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายหลังผ่าน Absorber ประมาณ 0.8 - 0.9 ตัน/ชม.

### 2.1.3 ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม (Gypsum Dewatering System)

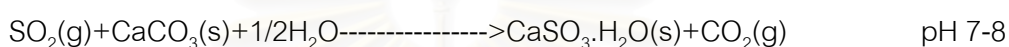
ยิปซัมผสมน้ำจากอุปกรณ์จับแก๊สจะถูกส่งไปยังเครื่องแยกน้ำมีลักษณะเป็นสายพานและบนสายพานจะมีผ้ากรอง (Gypsum Dewatering Filter) ส่วนใต้ของสายพานจะติดอยู่กับปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดน้ำให้แยกออกจากยิปซัมน้ำจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนยิปซัมจะไหลลงสู่สายพานส่ง (Ash Conveyor) เพื่อนำไปทิ้งหรือใช้งานต่อไป กระบวนการต่างแสดงไว้ดังรูปที่ 2-1



รูป 2-1 แสดงกระบวนการการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ  
(ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539)

## 2.2 ยิปซัมฟลูแก๊ส (กรมทรัพยากรธรณี, 2541)

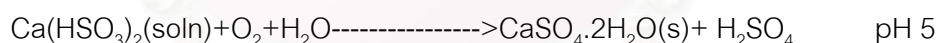
ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue Gas Gypsum) ดังแสดงในรูป 2-2 เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการกำจัดแก๊สกำมะถันจากที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuel) เช่น ถ่านหินชนิดต่างๆและน้ำมัน (Anthracite, Bituminous Coal, Lignite and Oil) มักพบในโรงงานขนาดใหญ่ โดยเฉพาะในโรงงานไฟฟ้าการกำจัดกำมะถันนั้นมีหลายประการและมีบางกระบวนการเหล่านี้จะทำงานแบบสวนทาง (Countercurrent) โดยการล้างแก๊สเสีย (Flue Gas) ด้วยสารละลายหินปูน (Limestone) หรือ Lime เพื่อกำจัด Sulfur Dioxide ออกซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดที่ pH 7-8 และได้สารผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งไม่มีการละลายน้ำไม่ตี ดังสมการ



ต่อมาเมื่อ pH ลดลงต่ำกว่า 5 จะทำให้ Calcium Sulfite เปลี่ยนเป็น Soluble Calcium Bisulfite ( $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ ) ที่ละลายน้ำได้ ดังสมการ



เนื่องจาก Calcium Bisulfite ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วย  $\text{O}_2$  จากอากาศได้เป็นยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue-Gas Gypsum Or  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ ) ดังสมการ

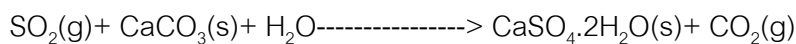


กรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับหินปูน (Limestone) ที่เหลือเกิดเป็นยิปซัมมากขึ้น ดังสมการ



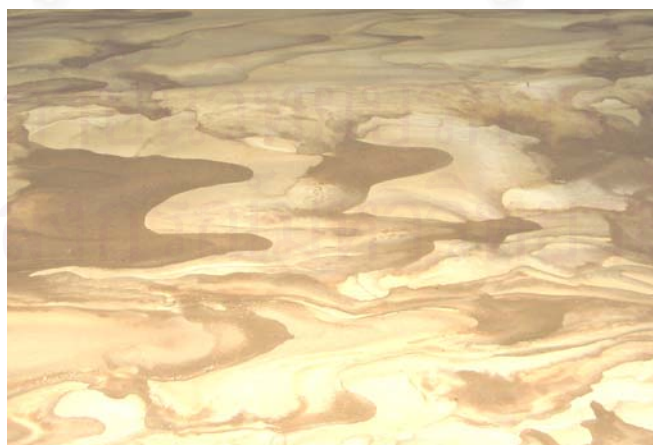
ผลึกยิปซัมโตขึ้นและจับตัวกันแน่นขึ้น มีลักษณะเป็นผงแขวนลอยในน้ำ (Suspension) สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) และตามด้วย Vacuum Drum Filter หรือ Centrifuge โดยยิปซัมที่ได้มีลักษณะผงละเอียด ความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง มีน้ำอยู่น้อยกว่า 10% (Free Water Content)

ปฏิกิริยารวม (Net Reaction) เขียนได้ดังสมการ



ยิปซัมฟลูแก๊สจัดเป็นยิปซัมสังเคราะห์ประเภทหนึ่งซึ่งเป็นผลจากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันและถ่านหินโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากโรงไฟฟ้าผลจากการที่ประเทศเยอรมันตะวันตกได้นำระบบเอพจีดีมาใช้ในการจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์อย่างจริงจังตั้งแต่ปี ค.ศ. 1983 และจากกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทำให้ประเทศในต่างๆ ในกลุ่ม European Communities (EC) และในกลุ่ม Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) นำระบบเอพจีดีมาใช้ปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละปีจึงมีปริมาณปีละหลายล้านตันด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดงานวิจัยต่างๆ ขึ้นมากมาย เพื่อปรับปรุงคุณภาพของยิปซัมฟลูแก๊สและเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ ที่สามารถใช้ยิปซัมฟลูแก๊สเป็นวัตถุดิบได้ เกณฑ์คุณภาพของยิปซัมฟลูแก๊สจึงถูกกำหนดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2-1 ปัจจุบันยิปซัมฟลูแก๊สไม่ถูกจัดเป็นของเหลือทิ้ง (Waste) ตามข้อกำหนด European Waste Catalogue (EWC) และOECD แต่ถูกจัดให้เป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่ง

ในประเทศไทยยิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะปีละประมาณ 3 ล้านตัน และจากรายงานการศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊ส พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีความบริสุทธิ์ (ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ประมาณร้อยละ 93 มีสิ่งเจือปน (Impurities) ต่างๆ อาทิ โดโลไมต์ ซิลิโคนไดออกไซด์ แก้วลอยและสารประกอบของเหล็กซึ่งทำให้ยิปซัมน้ำตาลดังแสดงในรูปที่ 2-2 อีกทั้งลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคยังมีความแตกต่างกันมากด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีข้อจำกัดในการที่จะนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนยิปซัมธรรมชาติ



รูปที่ 2-2 แสดงยิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

เนื่องจากการได้มีการเพิ่มความเข้มข้นของมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นป้องกันสิ่งแวดล้อมมีมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าและนำยิปซัมไปเป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ยิปซัมฟลูแก๊สนี้มีเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตสูงและมีสีขาวบริสุทธิ์ ความละเอียดและโครงสร้างผลึกของยิปซัม เป็นปัจจัยสำคัญในการทำยิปซัมไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยฟลูแก๊สยิปซัมบางส่วนจะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์และมีความเป็นไปได้ว่าหากมีการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สเหล่านั้นก็อาจจะสามารถนำเอายิปซัมฟลูแก๊สเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์มากขึ้นในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่นอุตสาหกรรมยิปซัมบอร์ด หรืออุตสาหกรรมผลิตปูนปลาสเตอร์ ตารางที่ 2-1 แสดงคุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊สในอุตสาหกรรม

### ตารางที่ 2-1 แสดงคุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊ส

(ที่มา : สำนักงานวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2541)

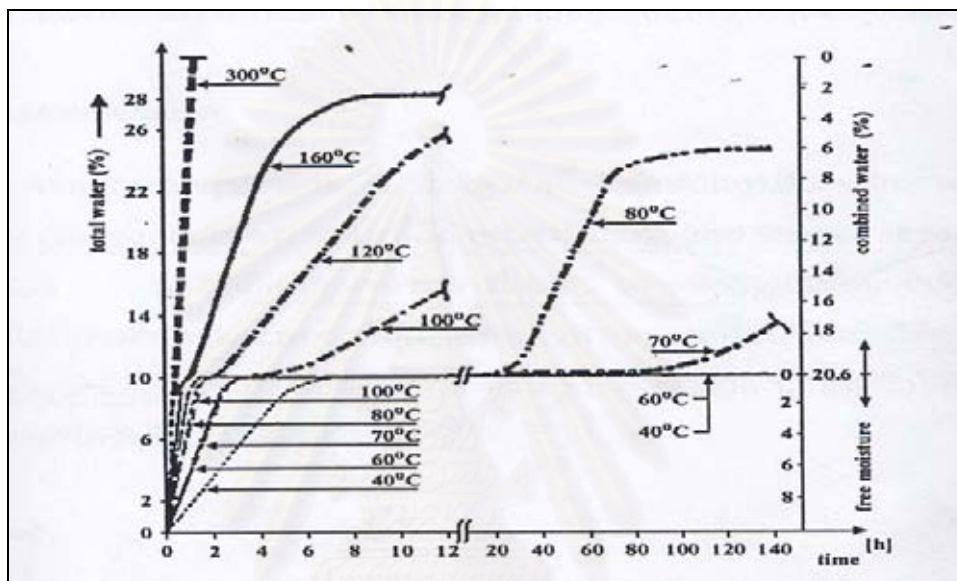
คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	10
แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ร้อยละ(น้ำหนักแห้ง) มากกว่า	95
แมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ(น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.1
คลอไรด์ ร้อยละ(น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.01
โซเดียมออกไซด์ ร้อยละ(น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.06
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ร้อยละ(น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.25
ค่า pH	5-9
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มี
ความเป็นพิษ(toxicity)	ไม่มี

### 2.3 การอบแห้งยิปซัมฟลูแก๊ส ( Wirsching,1983: 160-172)

ยิปซัมฟลูแก๊สโดยทั่วไปจะมีความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการที่มีน้ำถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาค นอกจากความชื้นแล้วในยิปซัมเองยังมีน้ำอยู่อีกประมาณร้อยละ 20 โดยเป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้าง (Crystal Water or Combined Water) โดยทั่วไปน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวสามารถไล่ออกไปได้โดยการให้ความร้อน แต่การให้ความร้อนที่มากเกินไปและนานเกินไปจะทำให้น้ำที่อยู่ในโครงสร้างออกไปด้วย ดังนั้นกระบวนการให้ความร้อนแก่ยิปซัมจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการอบแห้ง ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเพียงเพื่อกำจัดความชื้นออกไป

เท่านั้น ขณะที่ในขั้นที่สองจะเป็นการให้ความร้อนเพื่อดึงน้ำที่อยู่ในโครงสร้างออกมาซึ่งเรียกว่า “การแคลไซน์” จากรูปที่ 2-3 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง คืออุณหภูมิที่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ยิปซัมจะเริ่มสูญเสียน้ำในโครงสร้าง

ตารางที่ 2-1 แสดงคุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊ส  
(ที่มา : สำนักงานวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2541)



รูปที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสียไปกับระยะเวลาในการอบ  
(ที่มา : Wirsching, 1983)

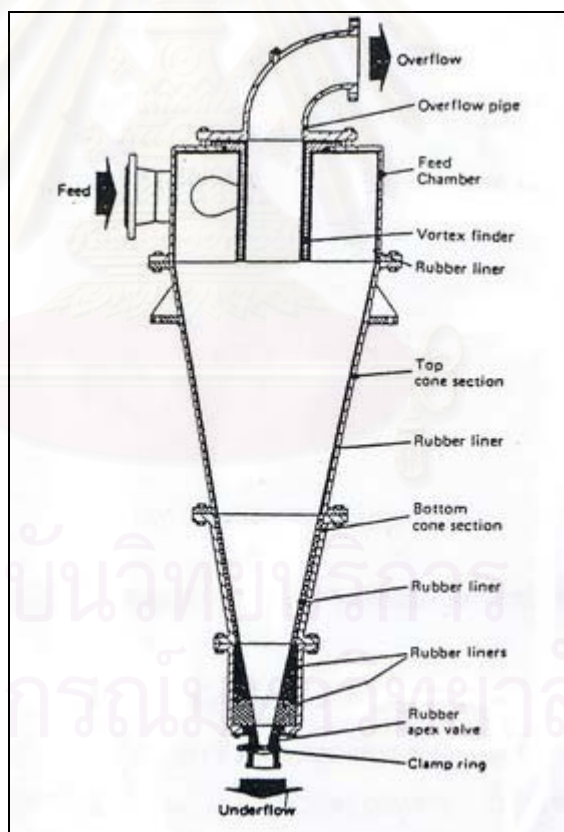
เนื่องจากในอุตสาหกรรมการอบแห้งยิปซัมฟลูแก๊สจะต้องคำนึงถึงพลังงานและเวลาที่ใช้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการศึกษากันต่อมาและพบว่า การอบแห้งด้วยวิธี Co-current Drying ซึ่งจะให้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสผ่านเข้าไปสัมผัสกับยิปซัมโดยตรงจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกมา (Exhaust Gas Temperature) จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่สูญเสียไป ดังรูป ซึ่งจากรูปที่แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมไม่ให้เกิดการแคลไซน์ขึ้นในขณะที่ทำการอบแห้งได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ออกมาให้อยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบเพียง 8-13 วินาทีเท่านั้น

## 2.4 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ( นิคม ไชติกานนท์, 2536: 136-142)

เครื่องมือชนิดนี้ได้มีผู้นำมาใช้ในสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ. 1890 เพื่อการทำการแยกน้ำออกจากทราย ต่อมาได้มีการออกแบบ และพัฒนานำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกหลายชนิด โดยมีขนาดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงไม่กี่มิลลิเมตร จนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 100 นิ้ว อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดตั้งแต่ 1 หรือ 2 : 1 จนกระทั่ง 8 หรือ 10 : 1 ไฮโดรไซโคลนนำไปใช้ประโยชน์ดังต่อไปนี้

- ทำหน้าที่กำจัดฝุ่นละเอียดหรือตะกอนฝุ่น (Desliming)
- ทำหน้าที่กำจัดตะกอนหยาบ (Degritting)
- ทำหน้าที่คัดขนาด (Classification)
- ทำหน้าที่แต่งแร่ (Separation หรือ Concentration)
- ทำหน้าที่ชะล้าง (Washing)

ส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงตามรูปที่ 2-4 สามารถแยกตามส่วนได้ดังนี้

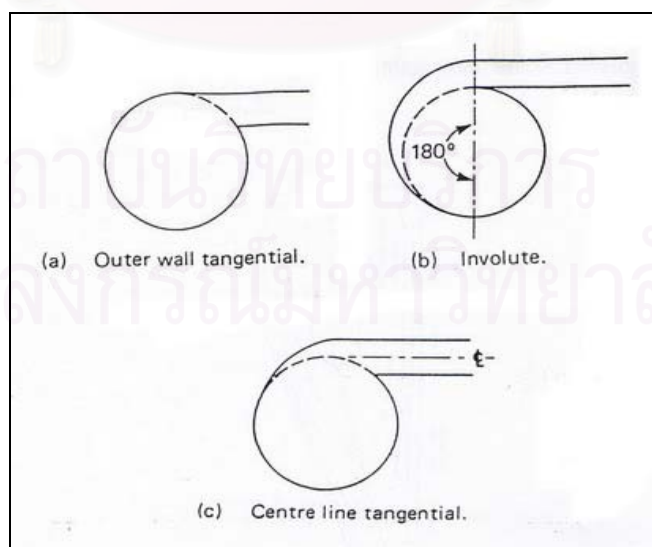


รูปที่ 2-4 แสดงส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)  
(ที่มา : นิคม ไซติกันนท์, 2536)



- ช่องป้อนเข้า (Feed Nozzle) เป็นทางเข้าของสิ่งที่ป้อนเข้าไปสู่ไฮโดรไซโคลนด้วยช่องบนและแผ่นปิด (Top and End Plate) ส่วนบนของไฮโดรไซโคลนจะถูกปิด ช่องทางออกของขนาดละเอียด (Overflow Nozzle or Vortex Finder) เป็นช่องตัวไซโคลน (Cyclone Body or Cone Section) ลักษณะเป็นรูปกรวยมีมุมแรงดันคงที่ ทำให้เกิดการหมุนวนภายในไซโคลน ช่องป้อนนี้จะมีแนวสัมผัสกับตัวไซโคลนพอดี
- ด้วยแผ่นปิดโดยที่ทอลันออก (Overflow) อยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางออกในแนวตั้ง
- ทางออกของขนาดละเอียด (Undersize) โดยต่อเป็นท่อจากแผ่นปิดทางออกของขนาดหยาบซึ่งอยู่ตอนล่างสุด
- ประมาณ  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  ถ้ามุมเล็ก ๆ เหมาะสำหรับการแต่งแร่ขนาดละเอียด
- ช่องทางออกของขนาดหยาบ (Underflow Nozzle or Vortex Orifice)

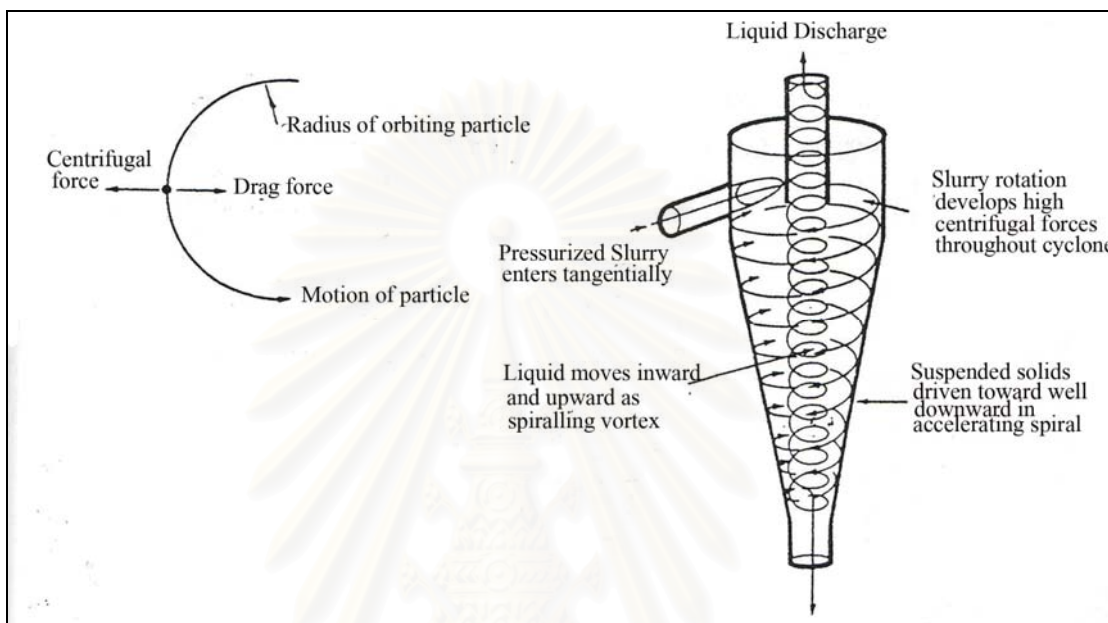
ไฮโดรไซโคลนใช้หลักความแตกต่างของอัตราการจมตัวในไซโคลน เมื่อป้อนแร่ผสมน้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะ เข้าไปในไซโคลน จะทำให้เกิดการไหลวนรอบผนังไซโคลน ในระยะใกล้แนวแกนจะมีความดันต่ำ ช่วงแนวแกนจะเปิดออกทั้งด้านบนและด้านล่าง ขนาดเม็ดละเอียดจะไหลวน และถูกดันออกทางด้านบน ขนาดหยาบจะไหลออกด้านล่าง น้ำผสมแร่ที่ถูกบีบเข้าไปในไซโคลน ในทิศทางต่างๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การป้อนแร่เข้าไฮโดรไซโคลนในตำแหน่งต่างๆ กัน

(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

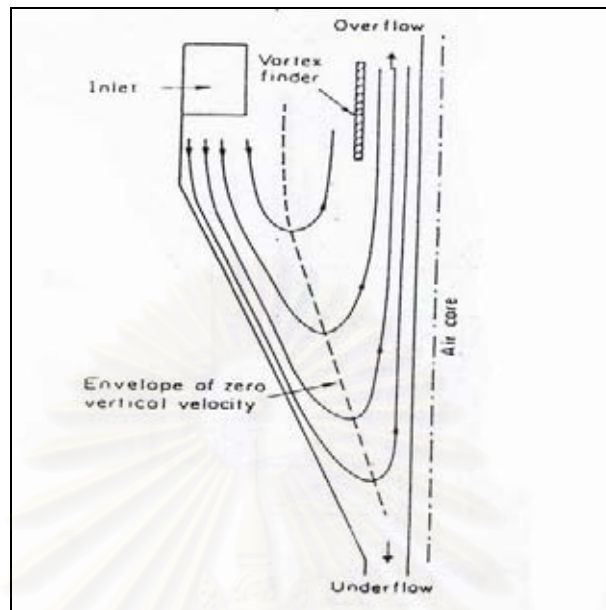
อนุภาคจะถูกกระทำด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) และแรงถ่วง (Drag Force) ดังแสดงตามรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงแรงกระทำที่เกิดภายในไฮโดรไซโคลน

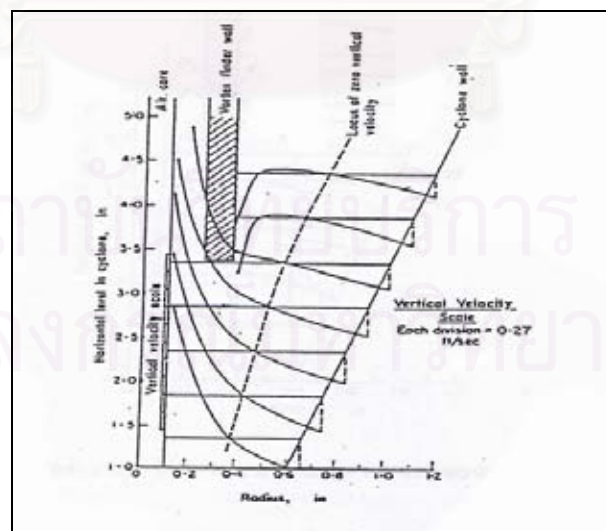
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

ความเร็วของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับอัตราการจมตัวและอัตราการจมตัวจะขึ้นอยู่กับขนาด น้ำหนักและความถ่วงจำเพาะของอนุภาค ถ้าแร่หรืออนุภาคมีน้ำหนักมากจะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางมาก สามารถเอาชนะแรงโน้มถ่วง อนุภาคจะติดไหลตามผนังไซโคลนจมลงสู่ตอนล่าง แต่ถ้าแรงหนีศูนย์กลางน้อย แรงถ่วงจะดึงเข้าสู่ศูนย์กลาง แนวแกนซึ่งเป็นโซนของความดันต่ำทำให้เกิดการยกตัวของอนุภาคออกจากช่องบน (Vortex Finder) ส่วนที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงจะมีเส้นแบ่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีความเร็วในแนวแกนตั้ง เรียกว่า Envelope of Zero Vertical Velocity อนุภาคที่อยู่ในแนวเส้นนี้พอดี จะมีแรงหนีศูนย์กลางเท่ากับแรงถ่วง ซึ่งจะทำให้อนุภาคไม่มีความเร็วในแนวตั้ง จึงมีโอกาสเป็นไปได้ว่าอนุภาคนั้นอาจจะออกไปทางด้านบน หรือด้านล่างของไฮโดรไซโคลนก็ได้ ดังแสดงตามรูปที่ 2-7

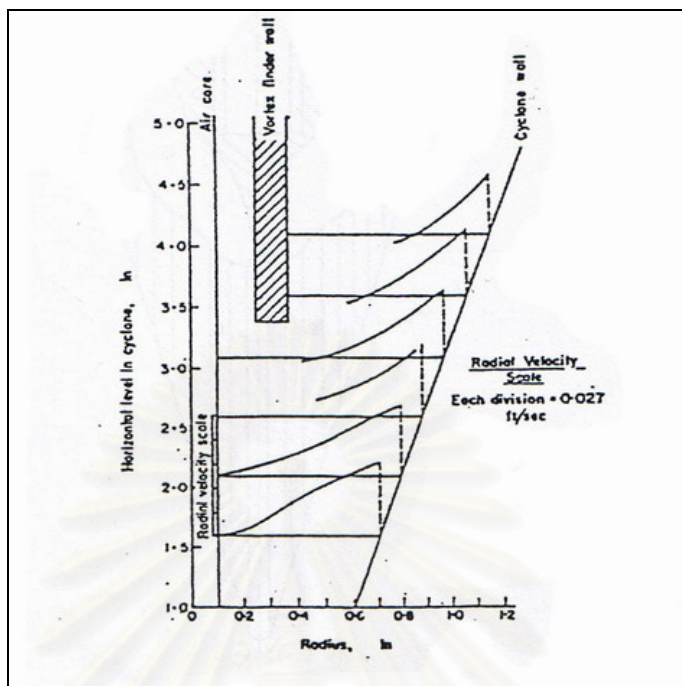


รูปที่ 2-7 โชนความเร็วในแนวตั้งและแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน  
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

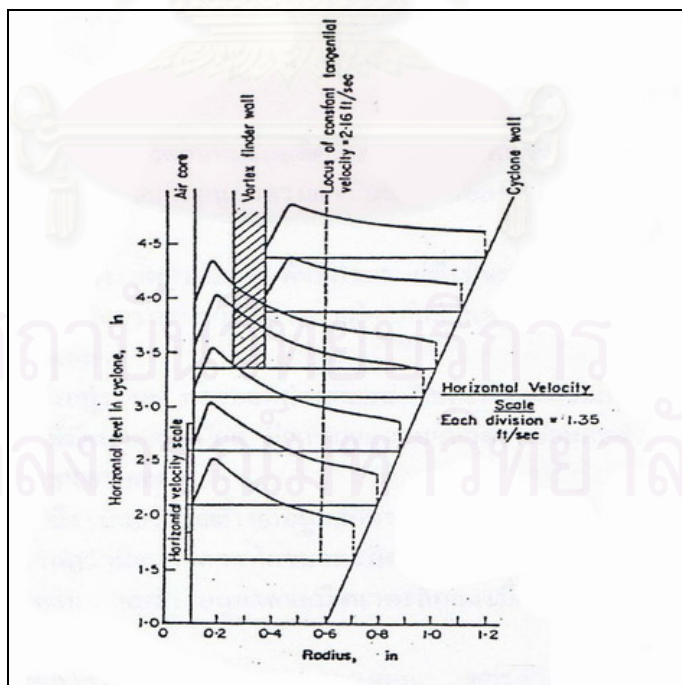
มีผู้แสดงการกระจายความเร็วของอนุภาคตามแนวตั้ง ตามแนวรัศมี และตามแนวสัมผัสของไฮโดรไซโคลนไว้ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ตามรูปที่ 2-8 รูปที่ 2-9 และรูปที่ 2-10 ตามลำดับ



รูปที่ 2-8 การกระจายความเร็วตามแนวตั้งของของไหลในไฮโดรไซโคลน  
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

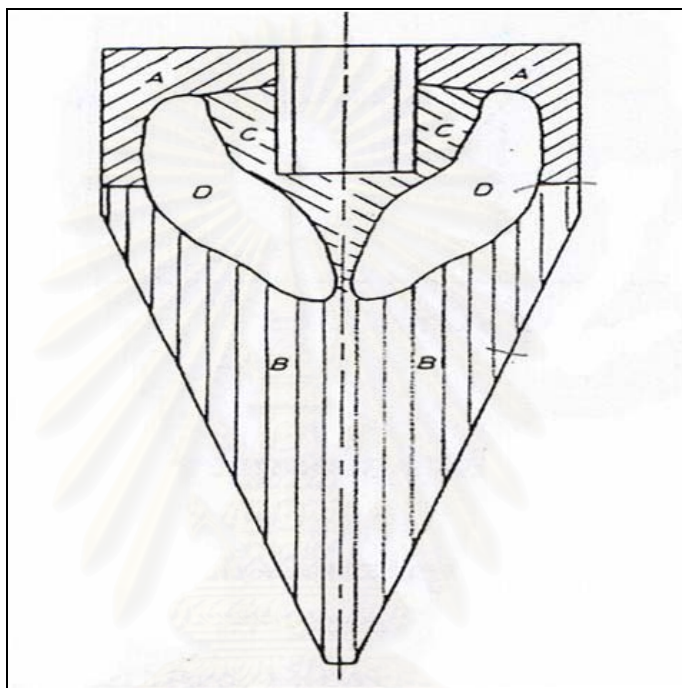


รูปที่ 2-9 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมีของของไหลไฮโดรไซโคลน  
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)



รูปที่ 2-10 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสวงกลมของของไหลไฮโดรไซโคลน  
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทำนายพฤติกรรมของการคัดขนาดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนให้แน่ชัด เนื่องจากมีตัวแปรมากมายที่มีผลต่อการคัดขนาด ได้มีผู้ทำการทดลองเก็บเอาตัวอย่างของผลตามจุดต่างๆ ในไฮโดรไซโคลนแล้วนำมาวิเคราะห์การกระจายของขนาด พบว่า การคัดขนาดไม่ได้เกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งไฮโดรไซโคลน โดยสามารถแบ่งไฮโดรไซโคลนออกได้เป็น 4 บริเวณซึ่งแสดงตามรูปที่ 2-11 ดังนี้



รูปที่ 2-11 Regions of Similar Size Distribution within Cyclone

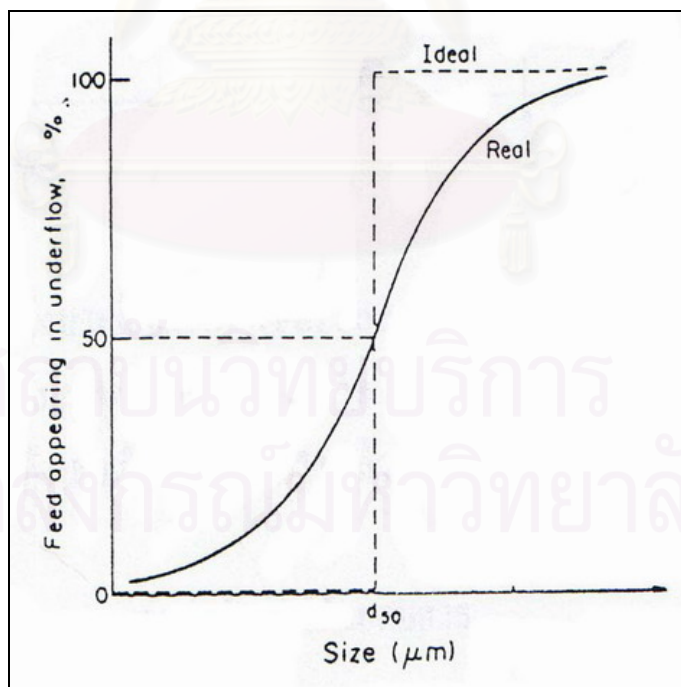
(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

- บริเวณ A ซึ่งอยู่ทางตอนบนและติดกับผนังรูปทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีการกระจายขนาดเหมือนกับอนุภาคในแร่ป้อน (Feed) นั่นคือ ยังไม่เกิดการคัดขนาดเกิดขึ้นในบริเวณ A นี้
- บริเวณ B มีอาณาเขตครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ที่เป็นรูปกรวยของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดหยาบ และมีการกระจายขนาดเหมือนกับส่วนหยาบ (Underflow) ที่คัดออกมาจากทางปลายล่างของไฮโดรไซโคลน
- บริเวณ C ซึ่งอยู่รอบๆ ทางออกส่วนละเอียดและมีบางส่วนยื่นลงมาตามแกนของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดละเอียด มีการกระจายขนาดเหมือนกับส่วนละเอียด (Overflow) ที่ออกมาจากด้านบนของไฮโดรไซโคลน

- บริเวณ D ซึ่งเป็นบริเวณที่เหลือถูกล้อมรอบด้วยบริเวณ A, B และ C บริเวณนี้เป็นบริเวณเดียวเท่านั้นที่ปรากฏว่ามีขอบเขตการคัดขนาดเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลอน คือ มีการกระจายขนาดตามแนวรัศมีของไฮโดรไซโคลอน พบว่า อนุภาคจะมีขนาดเล็กลงเมื่อระยะห่างตามแนวรัศมีจากแกนของไฮโดรไซโคลอนลดลง

วิธีการประเมินการทำงานของไฮโดรไซโคลอน ทำได้โดยการหาประสิทธิภาพของการคัดขนาดซึ่งมักแสดงอยู่ในลักษณะเส้นโค้งประสิทธิภาพ (Performance Partition Curve or Tromp Curve) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของน้ำหนักของแร่ป้อนที่เข้าไปอยู่ในส่วนหยาบกับขนาดของอนุภาคจากกราฟเส้นโค้งตามรูปที่ 2-12 จะเห็นว่า ขนาดของอนุภาคที่มีโอกาส 50% ที่จะเข้าไปอยู่ในส่วนหยาบ (หรือมีโอกาส 50% ที่จะเข้าไปอยู่ในส่วนละเอียด) คือ  $d_{50}$  จะเป็นขนาดซึ่งแยกระหว่างอนุภาคหยาบและอนุภาคละเอียด หากความชัน (Slope) ของเส้นโค้งยิ่งใกล้จะเป็นเส้นตรงตั้งตั้งประสิทธิภาพ ของการคัดขนาด จะเพิ่มขึ้น ความหมดจดของการคัดขนาด (Imperfection) จะมีค่าดังนี้

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}$$



รูปที่ 2-12 กราฟแสดงสมรรถนะของไฮโดรไซโคลอน (Tromp Curve)

(ที่มา : นิคม โชติกานนท์, 2536)

## 2.5 แร่ยิปซัมและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยิปซัม ( Supatra Jinawath,2005 )

แร่ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยิปซัมคือ เฮมิไฮเดรต (Hemihydrate, HH,  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) และแอนไฮไดรต์ (Anhydrite, A,  $\text{CaSO}_4$ ) ซึ่งได้มาจากการไล่น้ำผลึกออกไปจากยิปซัมนั้นมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างและใช้เป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) นอกจากนี้ยิปซัมและแอนไฮไดรต์ ยังใช้เป็นตัวเติมในดิน (Soil Conditioner) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการยอมให้ของเหลวผ่าน (Permeability) ของดินให้ดีขึ้นด้วยสำหรับเฮมิไฮเดรตจะใช้กันมากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลาสติก (Plaster) เช่น ในอุตสาหกรรมการทำเครื่องปั้นดินเผาใช้ทำแม่แบบในทางการแพทย์และทางด้านทันตกรรม จะใช้ทำเปลือกและทำแบบพิมพ์ฟันปลอม

ปัจจุบันได้นำแร่ยิปซัมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างกว้างขวางและนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่น ดังนี้

### 1. ในรูปของแร่ยิปซัม

- ใช้ผสมปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นตัวควบคุมการแข็งตัวของซีเมนต์ชนิดต่างๆ ซึ่งต้องการการก่อตัวช้าหรือเร็วตามลักษณะการใช้งานของซีเมนต์
- แร่ยิปซัมเกรดสูงๆ ใช้ผสมในอุตสาหกรรมสี ยาฆ่าแมลง ซอล์ด กระดาษอาหาร แป้ง เครื่องสำอางค์ สีนํ้าย้อม ซึ่งต้องการให้มึ่น้ำหนักและมีผิวเป็นมันวาว
- แร่ยิปซัมเกรดต่ำๆ ใช้ทำปุ๋ย ทำความสะอาดแร่ดีบุก
- แร่ยิปซัมชนิดเนื้อแน่น ละเอียด ใช้ทำเครื่องประดับ และเครื่องตกแต่งภายในอาคาร บ้านเรือน เพื่อความสวยงาม

### 2. เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนยิปซัมหรือปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris) ซึ่งนำมาใช้ทำวัสดุก่อสร้างต่างๆ หลายประเภท ดังนี้

- ทางด้านศิลปะหัตถกรรม เช่น งานปั้นรูปหุ่นตุ๊กตาต่างๆ หรือสิ่งตกแต่งอื่นๆ เป็นต้น
- ทางด้านผลิตภัณฑ์เซรามิก ใช้ทำแบบพิมพ์ต่างๆ เช่น Jiggering Mold และ Casting Mold เป็นต้น
- ทางด้านก่อสร้าง ใช้ทำยิปซัมบอร์ด (Gypsum Board) สำหรับฝ้าผนัง ฝ้าเพดานและใช้ทำปูนฉาบผนัง (Projection Plaster)
- ทางทันตกรรม ใช้ทำแบบพิมพ์ทำฟัน
- ทางการแพทย์ ใช้ในการทำเปลือกคนไข้
- ทางด้านการเรียนการสอน ใช้ทำวัสดุประกอบการศึกษาต่างๆ

คาดว่าในอนาคต คงจะมีการนำปูนปลาสเตอร์ ไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ที่แปลก ออกไปได้มากยิ่งขึ้น

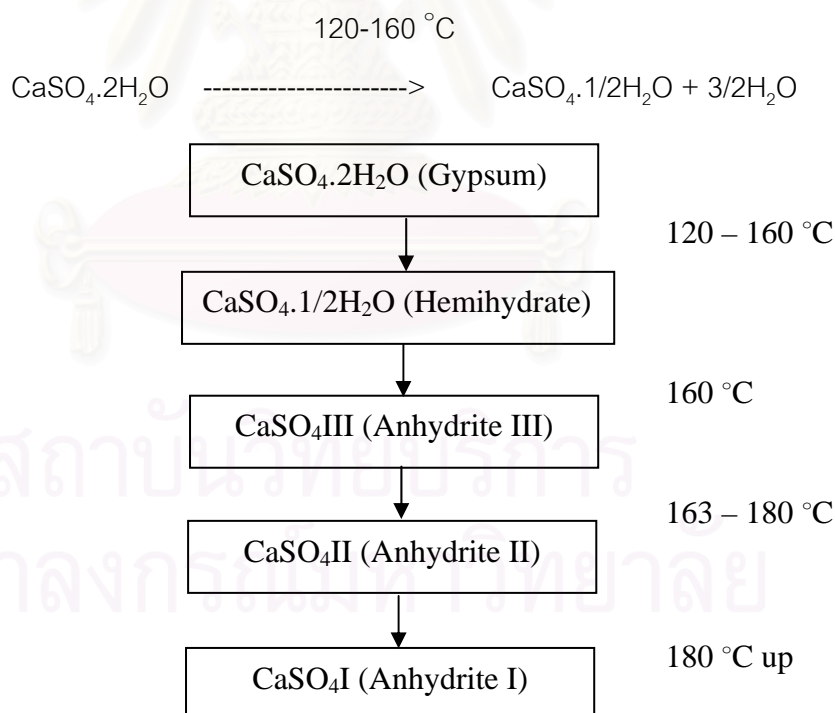
ในการศึกษาเฟส ( Phases) ของยิปซัมจะศึกษาจากระบบของยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากอิทธิพลของ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของยิปซัมจึงมีผลให้เกิดเฟสที่แตกต่างกันของยิปซัมซึ่งประกอบด้วย Calcium Sulfate Dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Calcium Sulfate Hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), Anhydrite III ( $\text{CaSO}_4\text{III}$ ), Anhydrite II ( $\text{CaSO}_4\text{II}$ ) และ Anhydrite I ( $\text{CaSO}_4\text{I}$ ) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับดัง รูปที่ 2-13 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนเฟส ดังนี้

#### Calcium Sulfate Dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

เป็นเฟสที่คงตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $40^\circ\text{C}$  เมื่อความดันปกติและจะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น เมื่อมีความชื้น

#### Calcium Sulfate Hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ )

เป็นเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อ Calcium Sulfate Dihydrate ได้รับความร้อน ดังสมการ



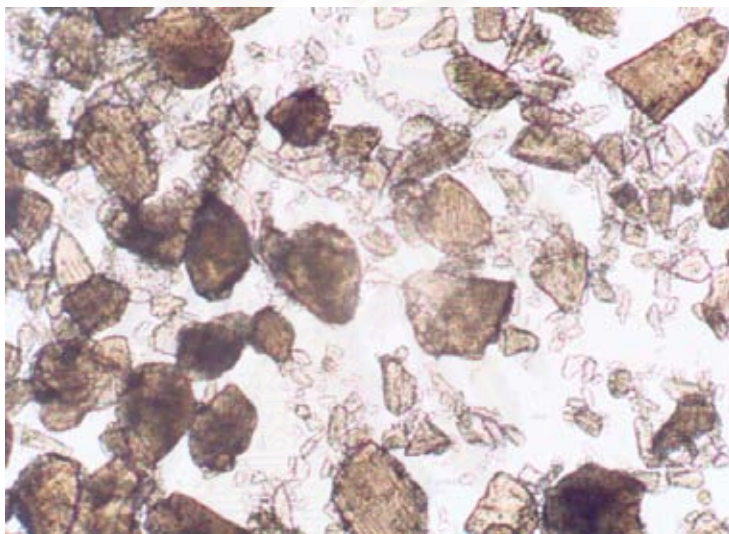
รูปที่ 2-13 แสดงการเปลี่ยนเฟสระบบของยิปซัม  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

(ที่มา : Supatra Jinawath, 2005)



### $\beta$ -Hemihydrate หรือ Plaster of Paris

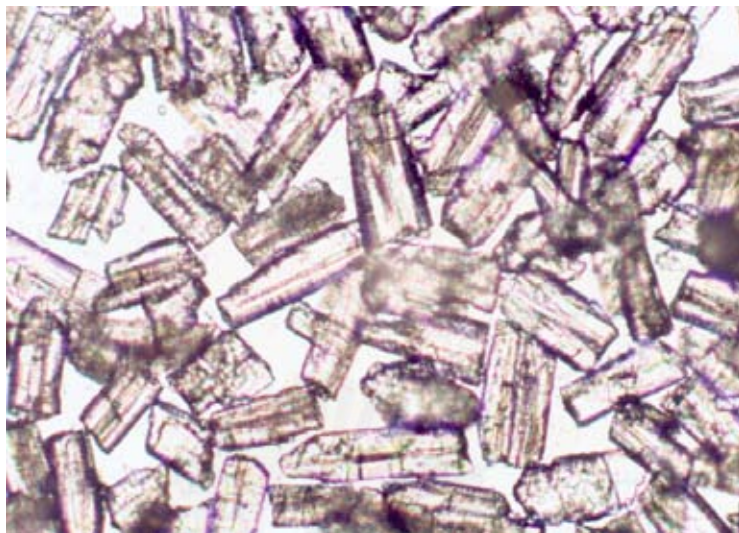
เกิดขึ้นเมื่อเผาิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ในเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $120 - 160^\circ\text{C}$   $\beta$ -Hemihydrate ดังแสดงในรูปที่ 2-14 ซึ่งประกอบด้วยผลึกไม่เป็นระเบียบจับตัวกันอย่างหลวมๆ เป็นก้อนขนาดหนาคลายฟองน้ำ มีรูพรุน มีลักษณะเป็นรอยแยก (Fissure) มีความหนาแน่นน้อยมักมีการกระจายขนาดอนุภาคในช่วงกว้างและมีรูปผลึกอยู่ในระบบผลึก Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับ  $\alpha$ -Hemihydrate แล้ว  $\beta$ -Hemihydrate จะมีความสามารถในการละลายสูงกว่า (High Solubility)



รูปที่ 2-14  $\beta$ -Hemihydrate  
(ที่มา : Supatra Jinawath, 2005)

### $\alpha$ -Hemihydrate

ประกอบด้วยผลึกที่เป็นระเบียบ อยู่ในระบบ Trigonal มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มดังแสดงในรูปที่ 2-15 จับตัวกันอย่างหนาแน่น จึงมีความหนาแน่นมากกว่า  $\beta$ -Hemihydrate ดังนั้นในการใช้งาน  $\alpha$ -Hemihydrate จึงใช้ปริมาณน้ำในการผสมน้อยกว่า และมีความแข็งแรงมากกว่า



รูปที่ 2-15  $\alpha$ -Hemihydrate  
(ที่มา : Supatra Jinawath, 2005)

การผลิต  $\alpha$ -Hemihydrate สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้คือ

- นำยิปซัมมาแคลไซน์ (Calcine) ภายใต้ความดันไอน้ำในหม้ออบความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 120-150°C
- นำยิปซัมมา Dehydrate ในหม้ออบความดัน (Autoclave) โดยใช้ Sodium Succinate 0.5% หรือน้อยกว่า
- นำยิปซัมมา Dehydrate ในหม้อต้ม (Kettle) ที่มี 30% แคลเซียมคลอไรด์ในน้ำ
- เตรียมจาก Calcium Sulphate Hemihydrate โดยการให้ความร้อนที่ความดันปกติในสารละลายของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1-7 N เป็นเวลา 5-120 นาทีจนถึงจุดเดือด ต้องกวนสารละลายและเป่าลมผ่านสารละลายตลอดเวลา

## 2.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528

โดยปกติยิปซัมจะกำหนดมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528 ดังตารางที่ 2-2 ได้จัดไว้ว่ามาตรฐานยิปซัมชั้นคุณภาพที่หนึ่งนั้นต้องมีเกณฑ์ของยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) มากกว่าร้อยละ 95 ซิลิกอนไดออกไซด์และสารที่ไม่ละลายอื่น ๆ น้อยกว่าร้อยละ 1 เกณฑ์คุณภาพที่สองต้องมีเกณฑ์ของยิปซัมมากกว่าร้อยละ 90 ซิลิกอนไดออกไซด์และสารที่ไม่ละลายอื่น ๆ น้อยกว่าร้อยละ 3

### ตารางที่ 2-2 สมบัติที่ต้องการของยิปซัมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม

เลขที่ มอก. 595-2528

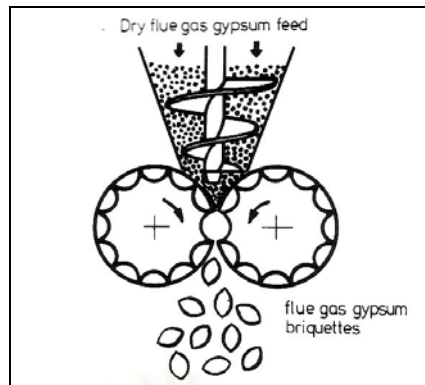
(ที่มา : สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2528)

รายการ ที่	คุณลักษณะ(ร้อยละ)	เกณฑ์ที่กำหนด สำหรับชั้นคุณภาพ			
		1	2	3	4
1	ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	>95	>90	>80	>70
2	ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และสารที่ไม่ละลายอื่น ๆ	<1.0	<3.0	-	-

## 2.7 การทำ Agglomeration (Zisselmar, 1985: 243-249)

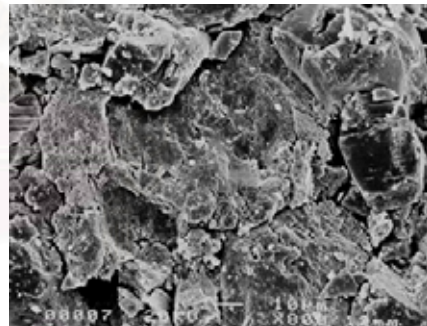
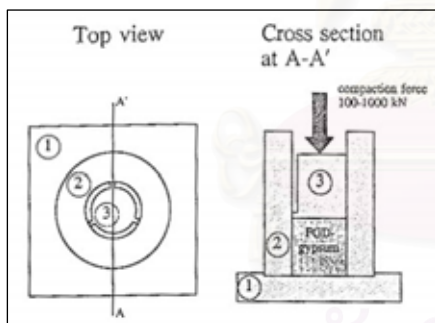
จากลักษณะรูปร่างของยิปซัมฟลูเก็สซึ่งมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันมากตั้งแต่ที่มีรูปร่างเป็นก้อน (Aspect Ratio=1) จนถึงลักษณะเป็นแท่ง (Rod shape, Aspect Ratio>1) ทำให้เกิดปัญหาการไหลตัว (Rheology) เมื่อนำยิปซัมฟลูเก็สไปใช้ประโยชน์ จึงได้มีการศึกษาและพบว่าปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการอัดซึ่ง เรียกว่าการทำ "Agglomeration" วัตถุประสงค์การทำ Agglomeration นี้ก็เพื่อให้ยิปซัมฟลูเก็สมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติ

การทำ Agglomeration สามารถทำได้หลายวิธีแต่ในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้กันมากคือการอัดแท่งเป็นก้อน Briquette ทั้งนี้เนื่องจากการทำเป็น Briquette จะทำให้ยิปซัมฟลูเก็สมีความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) สูงกว่าวิธีอื่น สะดวกในการเก็บ ทั้งยังสามารถทำได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องเติมสารจำพวก Bonding Agent ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงอีกด้วย นอกจากนี้การทำเป็น Briquette จะสามารถทำได้โดยใช้ Roller Press ดังแสดงรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 แสดงการทำเป็น Briquette โดยใช้ Roller Press  
(ที่มา : Zisselmar, 1985)

ยิปซัมฟลูแก๊สยังสามารถทำได้โดยการอัดแบบ Uniaxial Press ดังแสดงในรูปที่ 2-17 ได้วิธีหนึ่ง และเมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำเป็น Briquette แล้วไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังแสดง ในรูปที่ 2-18 จะเห็นว่าไม่มีอนุภาครูปแท่งของยิปซัมฟลูแก๊สในตอนแรกปรากฏให้เห็น



รูปที่ 2-17 แสดงรูปภาพการอัดก้อน  
Briquette แบบ Uniaxial Press  
(ที่มา : Zisselmar, 1985)

รูปที่ 2-18 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัม  
ฟลูแก๊สที่อัดที่แรงดัน 200 บาร์  
(ที่มา : วิชิต ประกายพรรณ, 2540)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ยิปซัมฟลูแก๊สจากเหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง
- กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 98%
- โซดาไฟ (NaOH)

#### 3.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับปรุงยิปซัมฟลูแก๊ส

สมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับปรุงยิปซัมฟลูแก๊สที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่

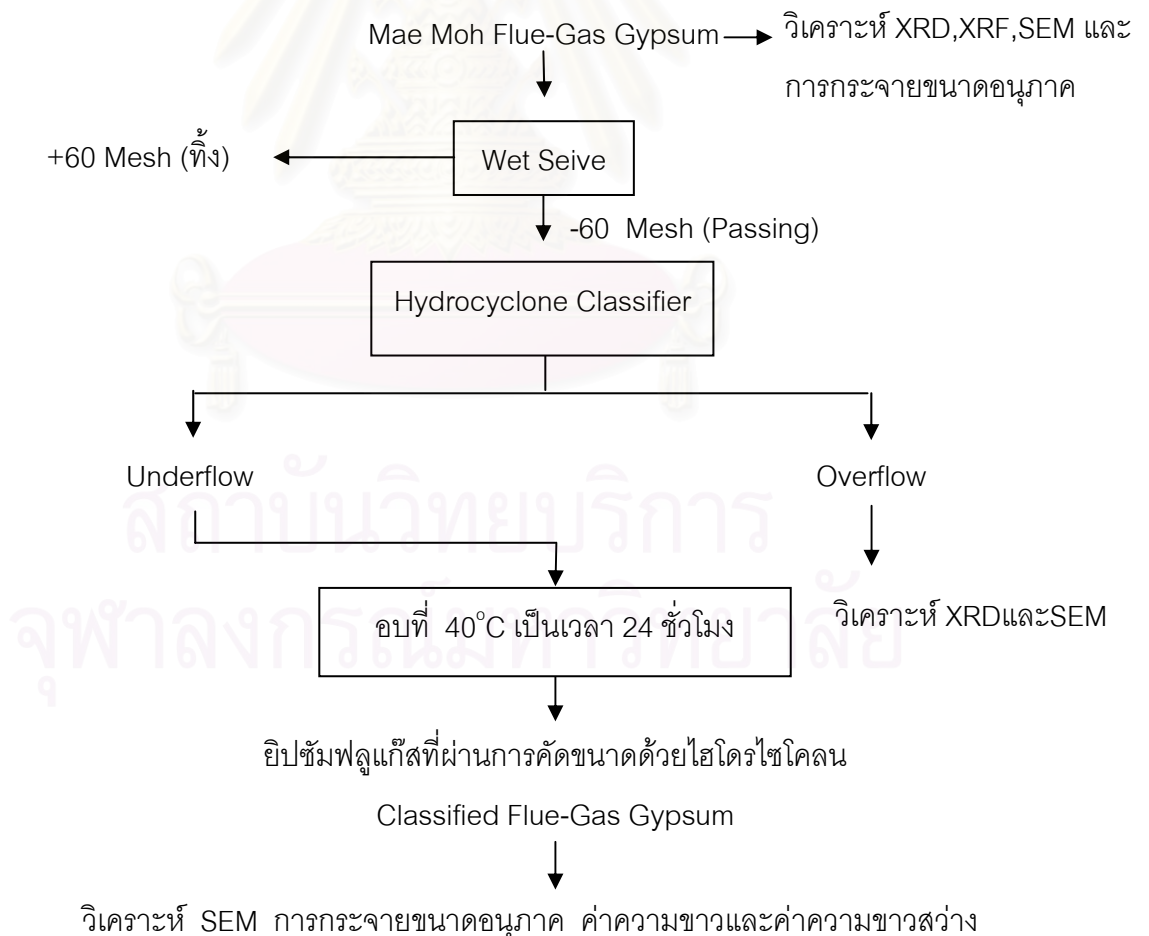
- องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) จากการวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง X-Ray Florescence (Phillips PW 2404) (ดูรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ในภาคผนวก ก)
- แร่องค์ประกอบ (Mineral Phase) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (D8 Advance) ในช่วง 0-80 องศา โดยใช้ความยาวคลื่น  $CuK_{\alpha}$  และใช้นิเกิลฟิลเตอร์ที่ Time Constant เท่ากับ 1 วินาที และ Scanning Speed เท่ากับ 1 องศาต่อนาที (ดูรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ในภาคผนวก ข)
- การกระจายขนาดอนุภาควิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค (Lazer Particle Size Analyzer) ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น LS 13320 (ดูรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ในภาคผนวก ค)
- ลักษณะรูปร่างของอนุภาคจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM 5800 LV (ดูรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ในภาคผนวก ง)
- ค่าความขาวสว่าง (Whiteness) และค่าความสว่าง (Brightness) ด้วยเครื่อง Technidyne รุ่น Color Touch PC (ดูรายละเอียดเครื่องมือวิเคราะห์ในภาคผนวก ช)

#### 3.3 การศึกษาการคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างเช่น ทำหน้าที่กำจัดฝุ่นละออง (Desliming) และทำหน้าที่คัดขนาด (Classification) โดยการศึกษาการคัดขนาดไฮโดรไซโคลนนี้ ทำไปเพื่อทำหน้าที่ชะล้าง (Washing) แร่ยิปซัมฟลูแก๊สให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น

หลักการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนคือการใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) ในการเพิ่มอัตราการตกตัวของอนุภาคโดยแรงที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนมี 2 แรง คือ แรงเหวี่ยงกับแรงจุด (Drag Force) ประสิทธิภาพการแยกนั้นจะขึ้นกับขนาด และความถ่วงจำเพาะของอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ความถ่วงจำเพาะสูงจะตกตัวเนื่องจากการกระทำของแรงจุด เรียกว่าส่วนหยาบ (Underflow) อนุภาคที่มีขนาดเล็กความถ่วงจำเพาะต่ำจะถูกพาออกเรียกว่าส่วนละเอียด (Overflow)

ขั้นตอนการทดลองคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สจากเหมืองแม่เมาะจังหวัดลำปาง โดยทำการคัดขนาดแบบเปียกที่ตะแกรงเบอร์ 60 เมชเพื่อที่กำจัดมลทินเช่น เศษไม้ ใบไม้และกรวด ที่มากับยิปซัมฟลูแก๊ส นำส่วนที่ผ่านการคัดขนาดที่เล็กกว่า -60 เมช มาผสมกับน้ำที่ 5 และ 10 % solid ต่างๆกัน ทำการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลน (KREB Hydrocyclone, diameter 1 " ) (ดูรายละเอียดเครื่องมือในภาคผนวก จ) ที่ความดันลด 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกิดการแยกส่วนที่ส่วนละเอียด (Overflow) และส่วนหยาบ (Underflow) ออกจากกัน หลังจากนั้นนำไปอบที่ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำไปศึกษาการกระจายขนาดอนุภาค ลักษณะรูปร่างของอนุภาค ค่าความขาวและค่าความขาวสว่าง โดยขั้นตอนศึกษาแสดงในรูปที่ 3-1

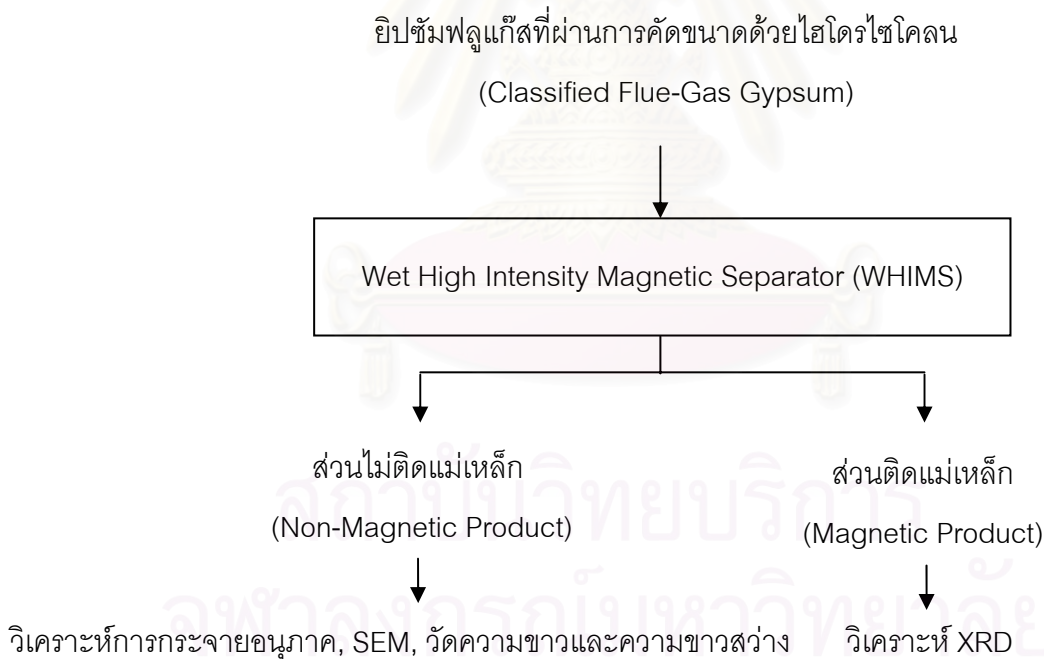


รูปที่ 3-1 แผนผัง (Flow Sheet) การคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน

### 3.4 การศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator : WHIMS) ในการแยกส่วนติดแม่เหล็กออก

หลังจากผ่านไฮโดรไซโคลอนที่สภาวะการทดลองซึ่งนำเอาขี้ผึ้งแก๊สจากส่วนหยาบ (Underflow) ที่ผ่านการคัดขนาด (Classified Flue-Gas Gypsum) มาเข้าเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator) (ดูรายละเอียดเครื่องมือในภาคผนวก ข) เพื่อจะแยกแร่ส่วนติดแม่เหล็กและส่วนไม่ติดแม่เหล็กออกจากกัน

การทดลองหาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูงที่ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าในขนาดที่แตกต่างๆกัน เพื่อที่จะหาปริมาณมลทินที่เก็บได้ในแผ่นกรอง (Matrix) โดยมีแร่ป้อนคือขี้ผึ้งแก๊สที่ผ่านการคัดขนาด หลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูงนำมาส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) มาวิเคราะห์เครื่องการกระจายขนาดอนุภาค ลักษณะรูปร่างของอนุภาค (SEM) เครื่องวัดความขาวและความขาวสว่าง ในส่วนแร่ติดแม่เหล็ก (Magnetic Product) นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยขั้นตอนการศึกษาแสดงใน รูปที่ 3-2

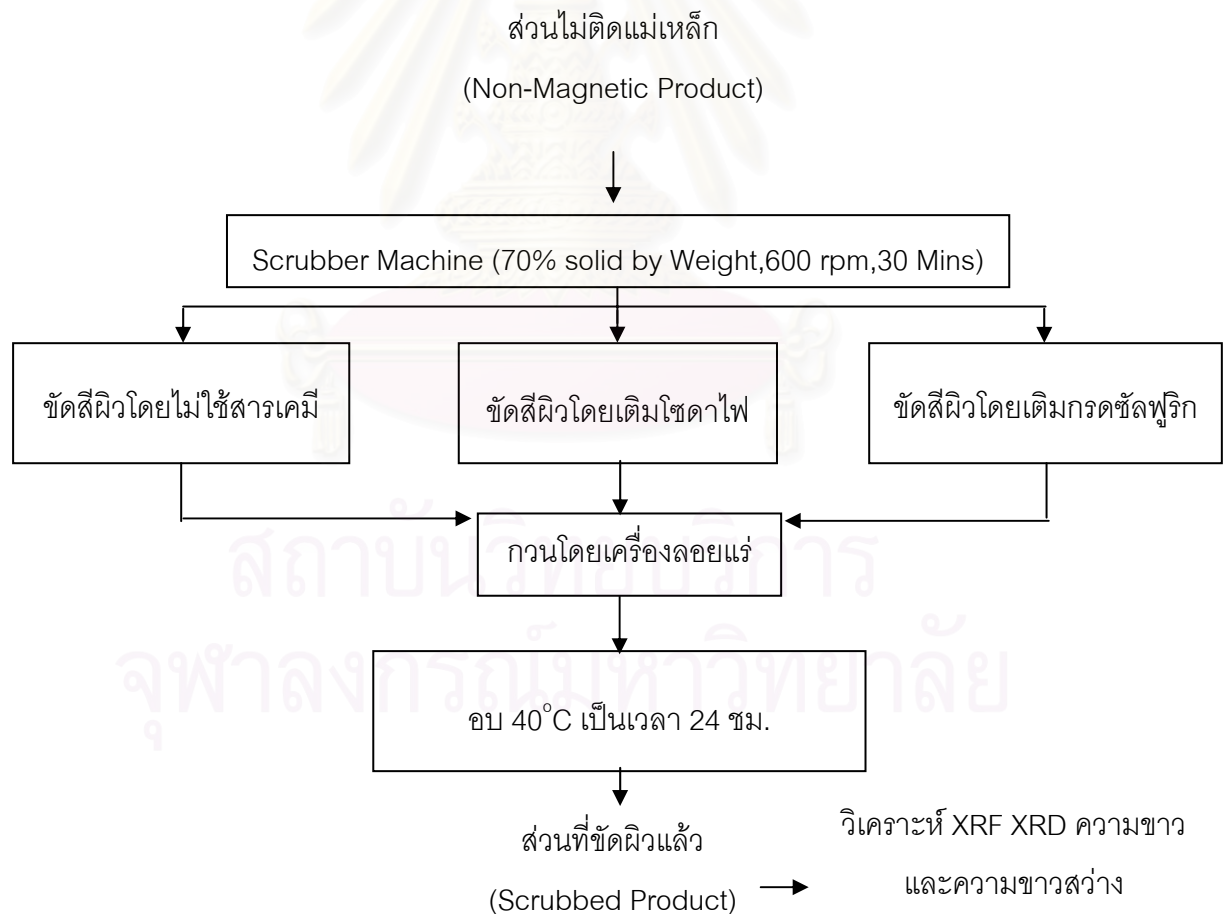


รูปที่ 3-2 แผนผัง (Flow Sheet) การศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียก (Wet High Intensity Magnetic Separator) ในการแยกส่วนไม่ติดแม่เหล็กและส่วนติดแม่เหล็กออกมา

### 3.5 การศึกษาผลของเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ในการปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness)

หลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกที่สภาวะการทดลองต่างๆกันแล้วนำเอาส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) มาเข้าเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) เพื่อที่จะทำให้แร่ นั้นเกิดการขัดสีผิวกันเพื่อปรับปรุงคุณภาพความขาวและความขาวสว่าง

การทดลองการขัดสีผิวโดยใช้เครื่องขัดสีผิวจะใช้ความเข้มข้นของแร่ป้อนที่ 70%solid โดย น้ำหนักที่ความเร็วในการกวนรอบ 600 รอบต่อนาที โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสามการทดลอง การทดลองที่หนึ่งขัดสีผิวขัดโดยไม่ใช้สารเคมี การทดลองที่สองขัดสีผิวขัดโดยการเติมโซดาไฟ และการทดลองที่สามขัดสีผิวโดยการเติมกรดซัลฟูริก โดยทุกการทดลองนั้นทำการขัดสีผิวเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำมาทำความสะอาดด้วยการกวนกับเครื่องลอยแร่ (Flotation Cell) เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปอบที่ 40°C เป็นเวลา 24 ชม. จะได้ส่วนที่ขัดสีผิวแล้ว (Scrubbed Product) นำไปวิเคราะห์ XRF ความขาว ความขาวสว่างและคำนวณเฟสองค์ประกอบ โดยมีแผนการทดลองดัง รูป 3-3



รูปที่ 3-3 แผนผัง (Flow Sheet) การทดลองนำเอาส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ผ่านเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) เพื่อปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness)



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองการใช้เทคโนโลยีการแต่งแร่โดยการใช้เทคนิคการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนกับยิปซัมฟลูแก๊ส

ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้รับมาจากเหมืองแม่เมาะที่จังหวัดลำปางนั้นมีสีน้ำตาลแดงดังรูปที่ 4-1 ซึ่งต่างจากสีของยิปซัมธรรมชาติมากเพราะยิปซัมธรรมชาติเป็นสีขาวดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้รับมาจากเหมืองแม่เมาะ

รูปที่ 4-2 ยิปซัมธรรมชาติ

จากตารางที่ 4-1 ซึ่งแสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมียิปซัมฟลูแก๊สด้วยเครื่อง XRF แสดงให้เห็นว่ามีสิ่งเจือปน ซึ่งได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ มากกว่ายิปซัมธรรมชาติ ซึ่งสิ่งที่เป็นมลทินเหล่านี้อาจส่งผลต่อยิปซัมฟลูแก๊ส ทำให้ไม่ขาวเหมือนยิปซัมธรรมชาติ

จากการคำนวณเฟสองค์ประกอบ แสดงในตารางที่ 4-2 พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ จากการคำนวณพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมียิปซัม (Gypsum) ร้อยละ 78.47 แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) อยู่ร้อยละ 6.65 มีซิลิกอนไดออกไซด์ (Quartz, SiO<sub>2</sub>) และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ อยู่ร้อยละ 14.88

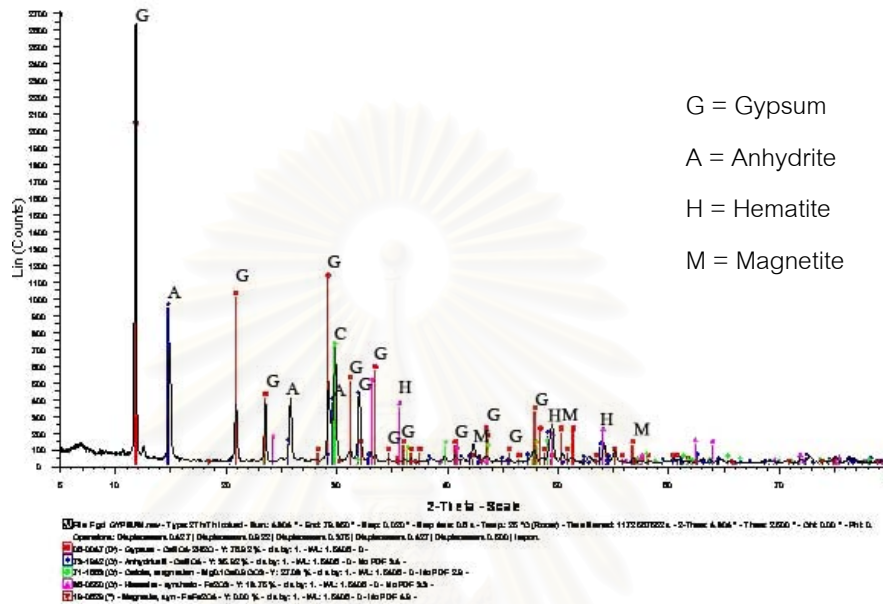
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมฟลูแก๊สวิเคราะห์โดยวิธี XRF

ยิปซัมฟลูแก๊ส	
ส่วนประกอบ	องค์ประกอบ wt%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.97
SiO <sub>2</sub>	9.53
SO <sub>3</sub>	37.82
K <sub>2</sub> O	0.41
CaO	27.28
TiO <sub>2</sub>	0.15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03
MnO	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14
NiO	0.01
CuO	0.03
ZnO	0.19
SrO	0.03
ZrO <sub>2</sub>	0.04
PbO	0.02

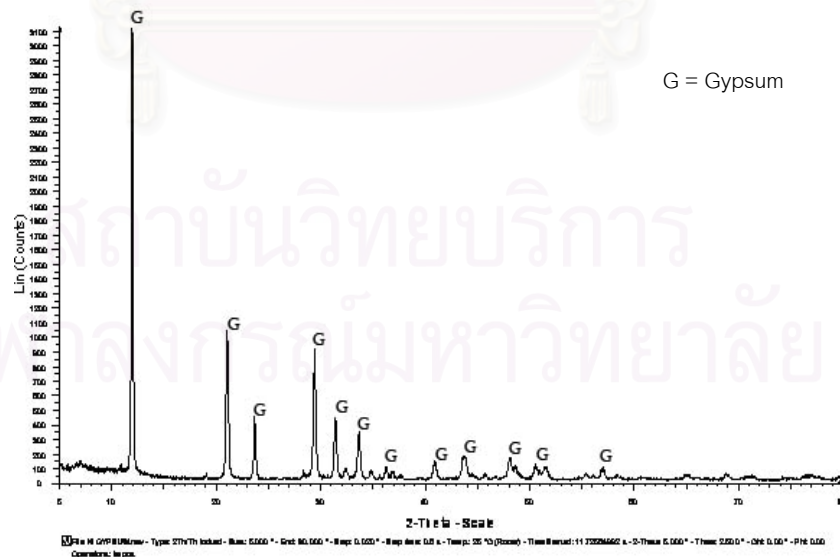
ตารางที่ 4-2 เฟสองค์ประกอบของยิปซัมธรรมชาติกับยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษานี้

ชนิดของแร่	เฟส (คำนวณ ร้อยละ)		
	ยิปซัม (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	แอนไฮไดรต์ (Anhydrite)	ซิลิกอนไดออกไซด์ และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ
ยิปซัมธรรมชาติ	94.94	0.90	0.36
ยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษานี้	78.47	6.65	14.88

ผลวิเคราะห์ XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4 ของยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ โดยยิปซัมฟลูแก๊สจะพบสิ่งเจือปนต่างๆที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แร่แอนไฮไดรต์ แร่ฮีมาไทต์ และแร่แมกนีไทต์ (รูปที่ 4-3) แต่ยิปซัมธรรมชาติไม่พบสิ่งเจือปนใดๆ (รูปที่ 4-4)



รูปที่ 4-3 แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมฟลูแก๊ส



รูปที่ 4-4 แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมธรรมชาติ

ตารางที่ 4-3 แสดงความชื้นแฉะ (Free Moisture) ของยิปซัมฟลูแก๊สพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีความชื้นร้อยละ 14.63

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย(ไมโครเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าอยู่ที่ 62.28 ไมโครเมตร

สีของแร่ยิปซัมธรรมชาติเปรียบเทียบกับสีแร่ยิปซัมฟลูแก๊สที่มองด้วยตาเปล่าดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่ายิปซัมธรรมชาติมีขาว (ดูรูปที่ 4-2) และยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษามีสีน้ำตาลแดง (ดูรูปที่ 4-1) โดยสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแสดงคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ

ตารางที่ 4-3 ความชื้นแฉะ (Free Moisture) ของยิปซัมฟลูแก๊ส (หน่วยร้อยละ)

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ยิปซัมฟลูแก๊ส	14.75	14.50	14.65	14.63

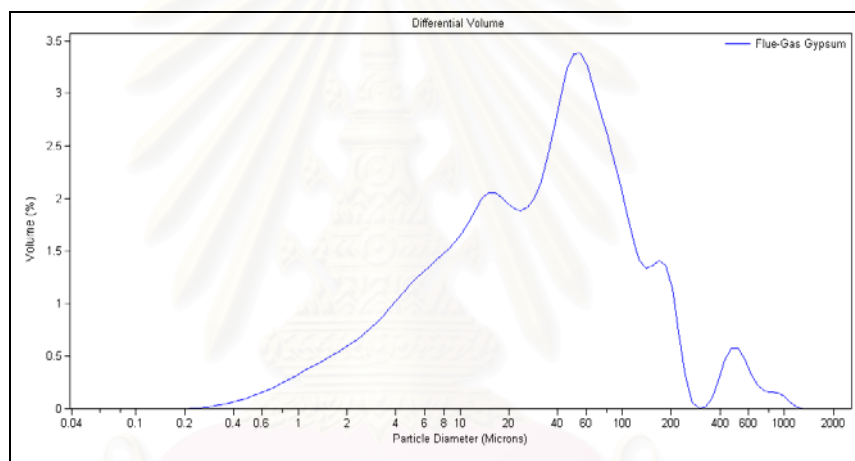
ตารางที่ 4-4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ของยิปซัมฟลูแก๊สวิเคราะห์โดย Laser Diffraction Particle Size Analyzer

	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
ยิปซัมฟลูแก๊ส	67.54	60.35	58.95	62.28

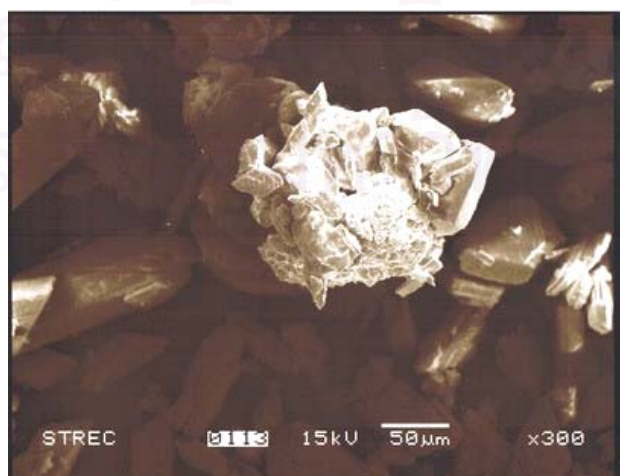
ตารางที่ 4-5 สีของแร่ยิปซัมธรรมชาติกับแร่ยิปซัมฟลูแก๊สที่มองด้วยตาเปล่า (ดูรูปที่ 4-1 และ 4-2 ประกอบ)

ชนิดของยิปซัม	สี
ยิปซัมธรรมชาติ	ขาว
ยิปซัมฟลูแก๊สที่ใช้ในการศึกษา	น้ำตาลแดง

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊สด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (ดูภาคผนวก ค) ดังแสดงในรูปที่ 4-5 กราฟกระจายขนาดอนุภาคแสดงให้เห็นว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีขนาดการกระจายตัวในช่วงที่กว้างมาก สามารถแบ่งการกระจายตัวของยิปซัมฟลูแก๊สได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร 10 ถึง 200 ไมโครเมตร และที่มีขนาดใหญ่กว่า 200 ไมโครเมตร ซึ่งในแต่ละช่วงของการกระจายขนาดจะมีปริมาณเท่ากับ 5.9%, 87.85% และ 6.25% โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยอนุภาคส่วนใหญ่ (87.85%) จะมีขนาดอยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ไมโครเมตร และจากรูปที่ 4-6 ซึ่งแสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ (SEM) ยิปซัมฟลูแก๊สจะเห็นว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีขนาดแตกต่างกันมากและมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันมาก มีอนุภาคบางส่วนเกาะกันเป็นก้อน



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊ส



รูปที่ 4-6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยิปซัมฟลูแก๊ส

จากผลวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อนแบบเปียกดังรูปที่ 4-7 พบว่าขนาดตะแกรงที่เหมาะสมในการคัดแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งมีขนาดใหญ่ เช่น กววด ทรายและเศษหิน ออกจากยิปซัมพลูแก๊ส คือตะแกรงเบอร์ 60 เมช (250ไมโครเมตร) และเมื่อพิจารณาสีของยิปซัมพลูแก๊สที่ร่อนผ่านตะแกรงหลายขนาดพบว่าสีนั้นยังคงใกล้เคียงกับสีของยิปซัมพลูแก๊สที่ยังไม่ร่อนแบบเปียกแสดงให้เห็นว่าสีน้ำตาลที่ปรากฏในยิปซัมพลูแก๊สนั้นเป็นผลมาจากสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กกว่า 60 เมช ด้วยเหตุนี้ในการคัดขนาดยิปซัมพลูแก๊สจึงต้องผ่านการร่อนแบบเปียกด้วยตะแกรงเบอร์ 60 เมช เพื่อคัดเอาขนาดหยาบ ซึ่งได้แก่ กววด ทราย และเศษหิน ทิ้งออกไปก่อน



#### รูปที่ 4-7 มลทินที่อยู่ในยิปซัมพลูแก๊ส

การทดลองการคัดขนาดยิปซัมพลูแก๊สด้วยไฮโดรไซโคลน ยี่ห้อ KREBS Model UI1763 ขนาด 1 นิ้ว (ดูรายละเอียดเครื่องมือที่ภาคผนวก จ) ดังซึ่งผังการทดลองได้อธิบายมาตามรูปที่ 3-1 ในหัวข้อที่ 3.3 บทที่ 3 โดยกำหนดตัวแปรความดันที่แตกต่างกันคือ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและความเข้มข้นที่ 5 และ 10% solid โดยน้ำหนักและมีแผนผังการทดลอง (Flow Sheet) ตามรูปที่ 3-1 ซึ่งจากผลวิเคราะห์การนำส่วนที่เล็กกว่า -60 เมช มาผสมกับน้ำที่ 5% และ 10% solid โดยน้ำหนักมาทำการทดลองคัดขนาดไฮโดรไซโคลน

การทำงานของไฮโดรไซโคลน (แสดงในรูปที่ 4-8) ที่ลักษณะการทำงานคือไฮโดรไซโคลนที่มีทางออกส่วนหยาบ (Apex หรือ Spigot) ขนาด 3 มิลลิเมตรและทางออกส่วนละเอียด (Vortex Finder) ขนาด 8 มิลลิเมตร ที่สภาพการณ์ทดลองต่างกันที่ความดัน 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วตามลำดับและที่ความเข้มข้นของแร่ป้อนที่ 5 และ 10% solid โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4-8 แสดงไฮโดรไซโคลน (KREB Hydrocyclone) ขณะทำงาน

จากการทดลองพบว่ามียิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดออกมาในส่วนหยาบ (Underflow) มีปริมาณมากเมื่อเทียบกับในส่วนละเอียด (Overflow) โดยแร่ที่ออกมาทางส่วนหยาบ (Underflow) นั้นมีสีเหลืองอ่อนและสีขาวเปลี่ยนไปแดงไปตามความดันของไฮโดรไซโคลนดังแสดงในรูปที่ 4-9 และในส่วนละเอียด (Overflow) แสดงในรูปที่ 4-10 จะเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดง ซึ่งเมื่อแยกออกมาจะทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดในส่วนหยาบ (Underflow) นั้นขาวขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

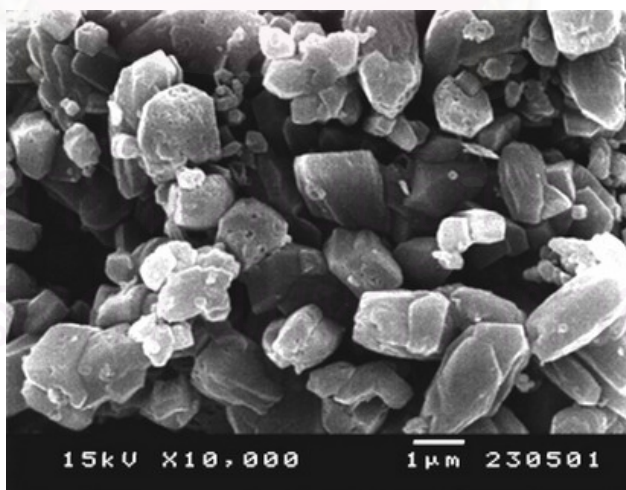


รูปที่ 4-9 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนในส่วนหยาบ (Underflow) โดยการป้อนแร่ที่ 5% solid โดยน้ำหนักและ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดันที่ 10, 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



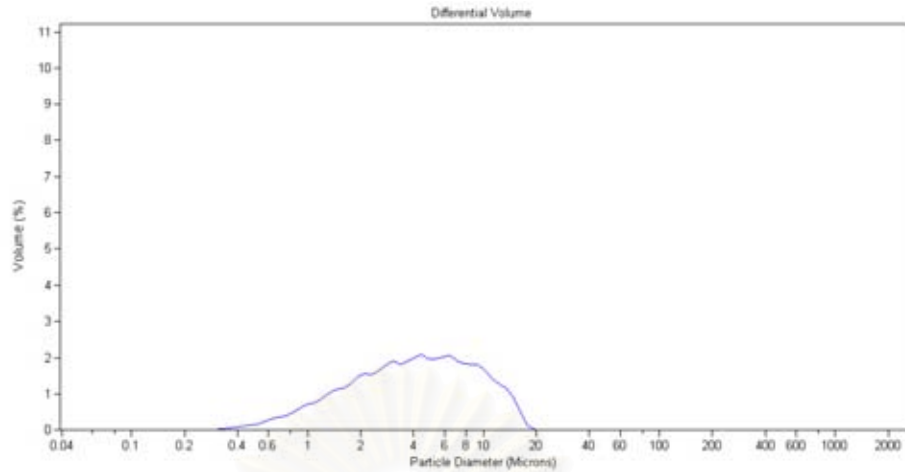
รูปที่ 4-10 ส่วนล้นเอียง (Overflow) ซึ่งประกอบด้วยตะกอนสีน้ำตาลแดง

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของส่วนล้นเอียง (Overflow) หรือตะกอนสีน้ำตาลแดงดังแสดงในรูปที่ 4-11 พบว่ามีอนุภาคที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป และรูปที่ 4-12 เป็นกราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคในส่วนล้นเอียงของตะกอนสีน้ำตาลแดงซึ่งมีขนาด ระหว่าง 0.4 ถึง 20 ไมโครเมตร ซึ่งจากงานวิจัยของ สุพัตรา จินาธิวัฒน์ (2005) ได้กล่าวไว้ว่าอนุภาคเหล่านี้เป็นอนุภาคของเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งยับยั้งฟลูเก็สหลังจากผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนแล้วจะมีสีอ่อนลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับยับยั้งฟลูเก็สก่อนทำการคัดขนาดเนื่องจากส่วนล้นเอียงได้ถูกแยกออกไป



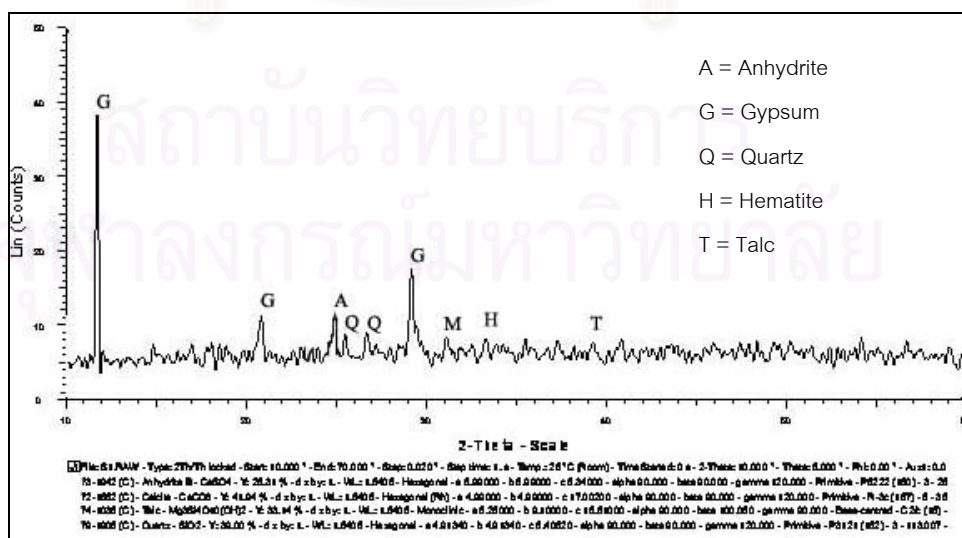
รูปที่ 4-11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนอนุภาคเถ้าลอยที่อยู่ในตะกอนสีน้ำตาลแดงซึ่งเป็นส่วนล้นเอียง(Overflow)



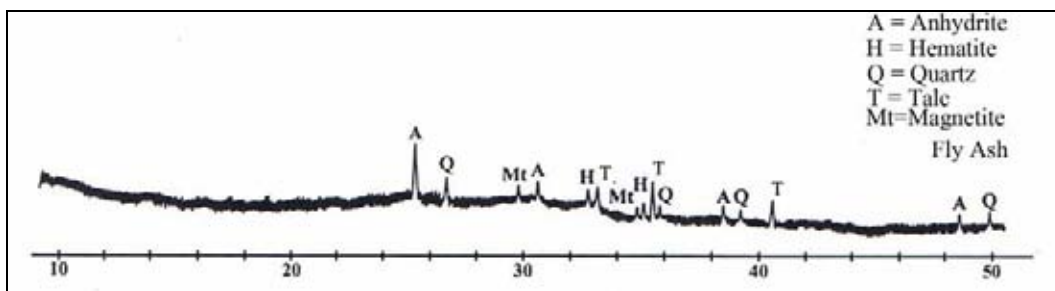


รูปที่ 4-12 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคในส่วนละเอียด (Overflow) ซึ่งเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดง

จากการวิเคราะห์ส่วนละเอียด (Overflow) หรือตะกอนสีน้ำตาลแดงด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4-13 พบว่า ประกอบไปด้วย แร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite) และทัลก์ (Talc) ซึ่งตรงกับส่วนประกอบของเถ้าลอยที่ได้จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษามาแล้วของ Supatra Jinawath (2005) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4-14 และยังตรวจพบตำแหน่งของ Peak ยิปซัมซึ่งบอกได้ว่าส่วนละเอียดซึ่งถูกไฮโดรไลต์โคลนคัดขนาดขึ้นมาซึ่งมีแร่ยิปซัมขนาดละเอียดติดมาบางส่วนรวมทั้งแร่แอนไฮไดรต์ จึงกล่าวได้ว่าในส่วนละเอียดที่แยกได้ (Overflow) นั้นคือ เถ้าลอยกับแร่ยิปซัมขนาดละเอียดบางส่วนรวมถึงแร่แอนไฮไดรต์มีขนาดเล็ก แร่ควอตซ์ แร่ฮีมาไทต์ และแร่ทัลก์ ที่ถูกคัดขนาดออกมาอยู่ในส่วนละเอียด (Overflow) ด้วย



รูปที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์ XRD ของส่วนละเอียด (Overflow)



รูปที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ XRD ของ Fly Ash แหล่งแม่เมาะจังหวัดลำปาง

(ที่มา : Supatra Jinawath, 2005)

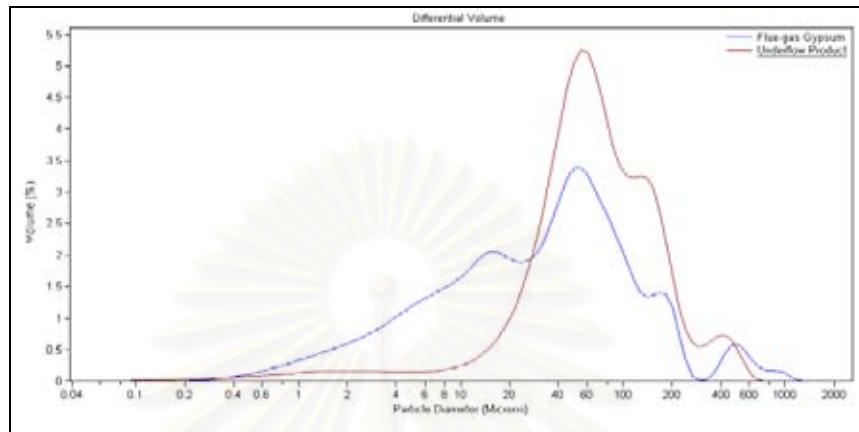
จากการทดลองพบว่า ปริมาณที่เก็บในส่วนหยาบ (Yield) มากถึงร้อยละ 90 ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการทดลองการคัดขนาดยิปซัมโดยใช้ไฮโดรไซโคลน

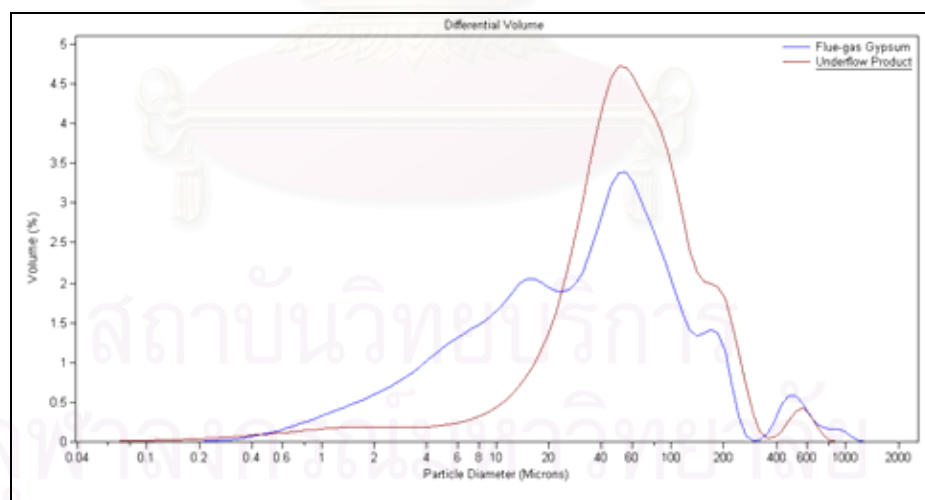
สภาวะการทดลอง	Underflow		Overflow	
	ปริมาณน้ำพริกที่เก็บได้(ร้อยละ)	สี	ปริมาณน้ำพริกที่เก็บได้(ร้อยละ)	สี
	(% Yield)		(% Yield)	
ความเข้มข้น 5% by wt ความดัน 10psi	92.81	เหลืองอ่อน	7.19	น้ำตาลแดง
ความเข้มข้น 5% by wt ความดัน 20psi	93.05	เหลืองอ่อน	6.95	น้ำตาลแดง
ความเข้มข้น 5% by wt ความดัน 30psi	92.15	ขาวเหลือง	7.85	น้ำตาลแดง
ความเข้มข้น 10% by wt ความดัน 10psi	93.25	เหลืองอ่อน	6.75	น้ำตาลแดง
ความเข้มข้น 10% by wt ความดัน 20psi	92.25	เหลืองอ่อน	7.75	น้ำตาลแดง
ความเข้มข้น 10% by wt ความดัน 30psi	93.28	ขาวเหลือง	6.72	น้ำตาลแดง

รูปที่ 4-15 ถึง รูปที่ 4-20 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดการกระจายอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาคพบว่าหลังจากผ่านไฮโดรไซโคลนที่ความเข้มข้นและความดันในแต่ละการทดลองพบว่าส่วนละเอียด (Overflow) ซึ่งประกอบด้วยตะกอนสีน้ำตาลแดง ได้ถูกแยกออกไปด้วยไฮโดรไซโคลน พบว่า แร่ยิปซัมฟลูแก๊สนั้นมีสีเปลี่ยนไปเป็นสีขาว เมื่อเปรียบเทียบกับแร่ป้อนที่เป็นสีน้ำตาลแดง จากกราฟเหล่านั้นแสดงให้เห็นว่าการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนสามารถทำ

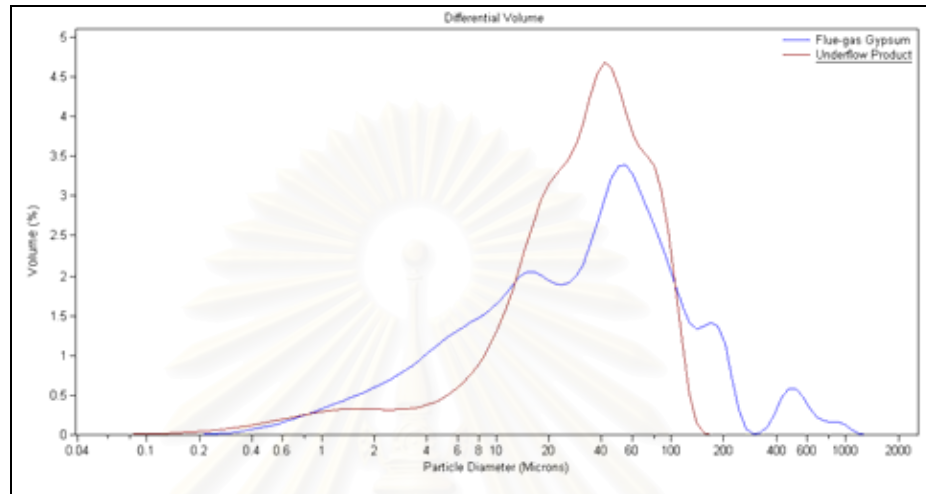
การคัดขนาดยิปซัมฟลูแก๊สให้ไปอยู่ในส่วนหยาบ (Underflow) ทำให้ยิปซัมที่ได้มีขนาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10-200 ไมครอน



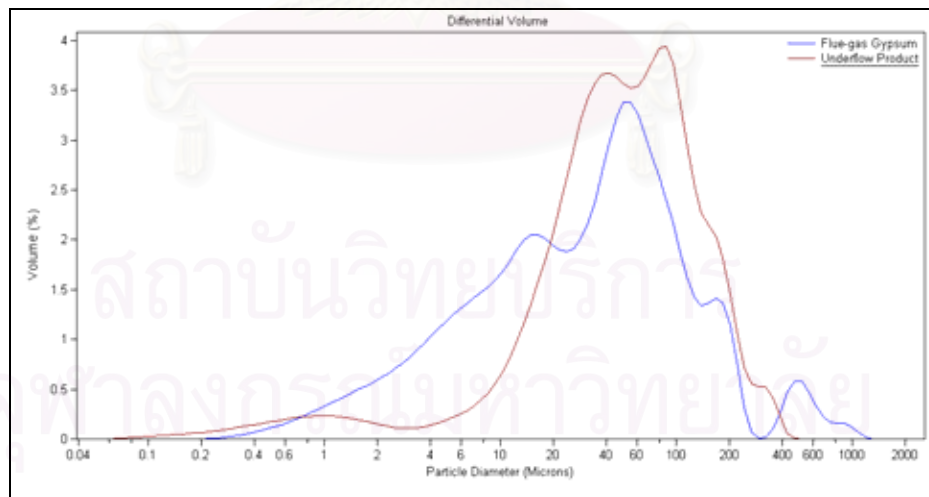
รูปที่ 4-15 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



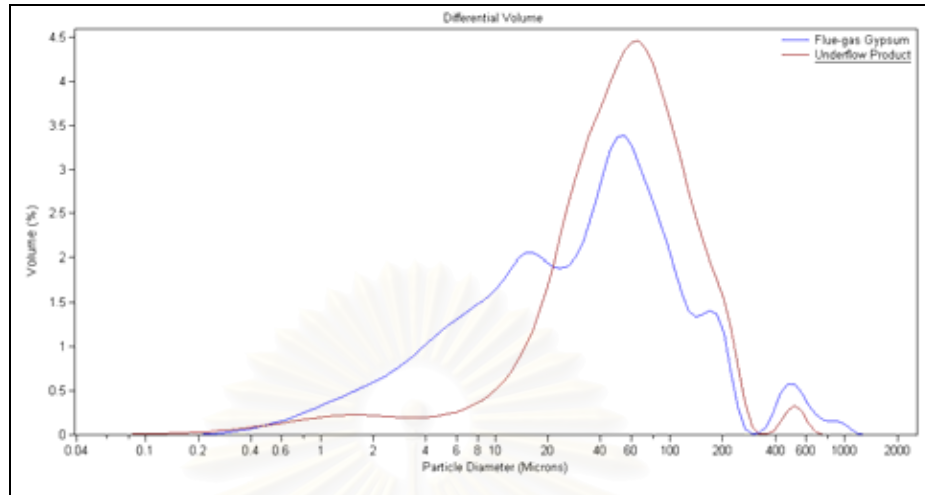
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



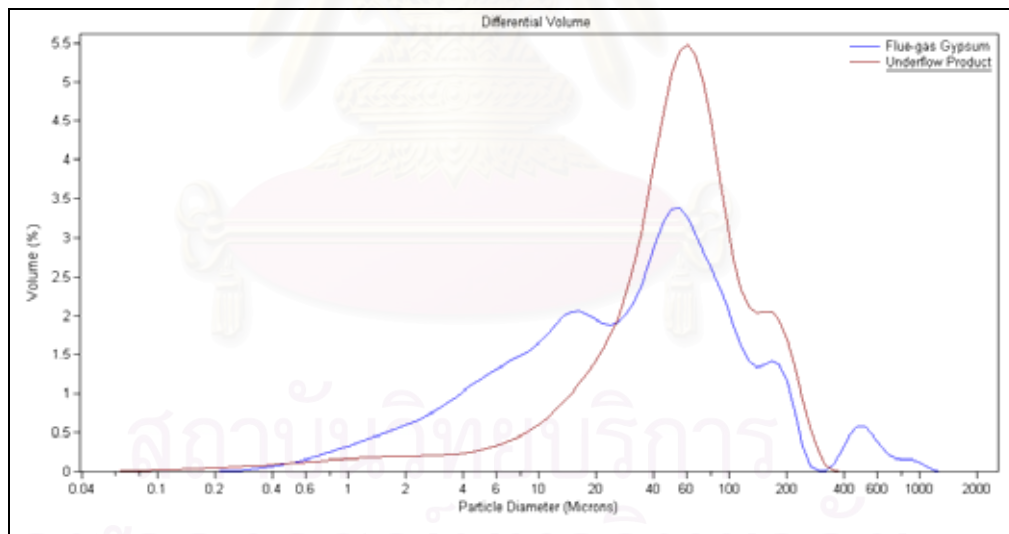
รูปที่ 4-17 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 5% solid โดย น้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4-18 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อน 10% solid โดย น้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่แร่ป้อน 10% solid โดย น้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4-20 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคในส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่แร่ป้อน 10% solid โดย น้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

#### 4.2 ผลการทดลองการศึกษาความเหมาะสมเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator) ในการแยกส่วนติดแม่เหล็กออกมา

หลังจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ นั้น จึงนำยิปซัมที่ผ่านการคัดขนาด (Classified FGD Gypsum) มาผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง (Wet High Intensity Magnetic Separator : WHIMS) รุ่น Eriez Magnetics (ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก ข) ที่ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นแม่เหล็กขนาดต่างๆ ซึ่งแผนผังการทดลองได้อธิบายมาแล้วตามรูปที่ 3-2 ในหัวข้อ 3.4 บทที่ 3 โดยใช้ตัวอย่างแร่ป้อนซึ่งเป็นแร่ที่เป็นส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน มาทดลองครั้งละ 0.5 กิโลกรัมโดยการป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักและที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด (Optimum Condition) มาผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงปริมาณส่วนที่ติดแม่เหล็กที่ค้างในแผ่นกรองในแต่ละความต่างศักย์ขนาดต่างๆ

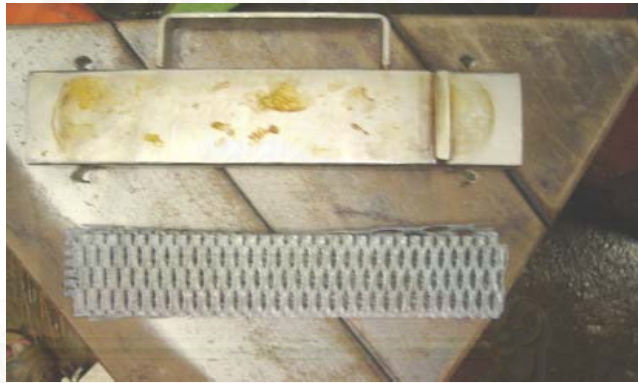
ค่าความต่างศักย์ (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	Percentage of Maximum Output Voltage (%)	ปริมาณมลทินที่ค้างอยู่ในแผ่นกรอง หลังผ่านการอบแห้ง (ร้อยละ)			เฉลี่ย
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
			20	4	15	
30	6	20	2.50	2.67	2.75	2.64
40	8	27	2.89	2.70	2.65	2.75
50	10	30	3.25	3.14	3.33	3.24
60	11	40	3.85	3.70	3.95	3.83
70	14	50	4.55	4.35	4.25	4.38

จากผลการทดลองพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ 70 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 14 แอมแปร์ และ Percentage of Maximum Output Voltage ที่ 50% สามารถเก็บมลทินที่ติดมากับแผ่นกรองดังแสดงในรูปที่ 4-21 และแผ่นกรองที่ใช้เป็นดังรูปที่ 4-22 โดยทำการแยกเอาส่วนที่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ออกมาได้มากที่สุดที่ร้อยละ 95.62 โดยน้ำหนักและส่วนติดแม่เหล็ก (Wet-Magnetic Product) ออกมาได้มากที่สุดที่ร้อยละ 4.38 โดยแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณมลทินติดแม่เหล็กที่ค้างในแผ่นกรองที่ความต่างศักย์ต่างๆกัน และแสดงด้วยกราฟดังรูปที่

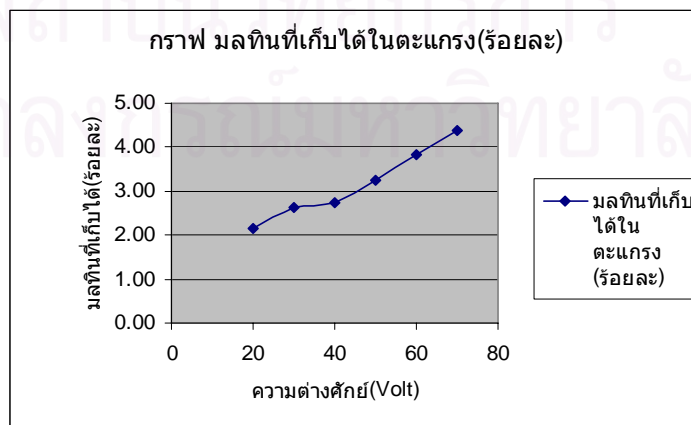
4-23 ส่วนเครื่องป้อน (Feeding Device) ของเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเป็ยกความเข้มสูง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-21 มลทินที่ค้างในแผ่นกรอง



รูป 4-22 แผ่นกรองในเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเป็ยกความเข้มสูง

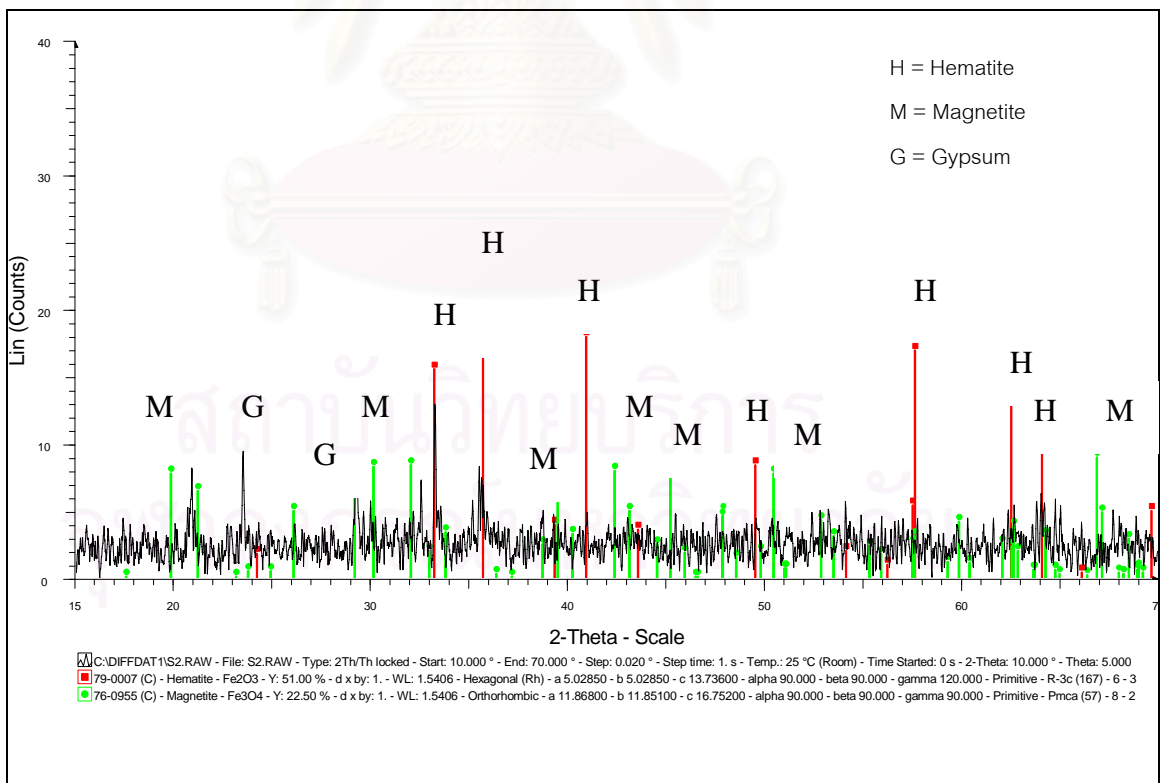


รูปที่ 4-23 กราฟแสดงปริมาณมลทินที่ค้างในแผ่นกรองเมื่อความต่างศักย์เปลี่ยนไป



รูป 4-24 เครื่องป้อน (Feeding Device) ทำการป้อนแร่ยิปซัมที่ผ่านการคัดขนาด  
เข้าเครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูงแบบเปียก

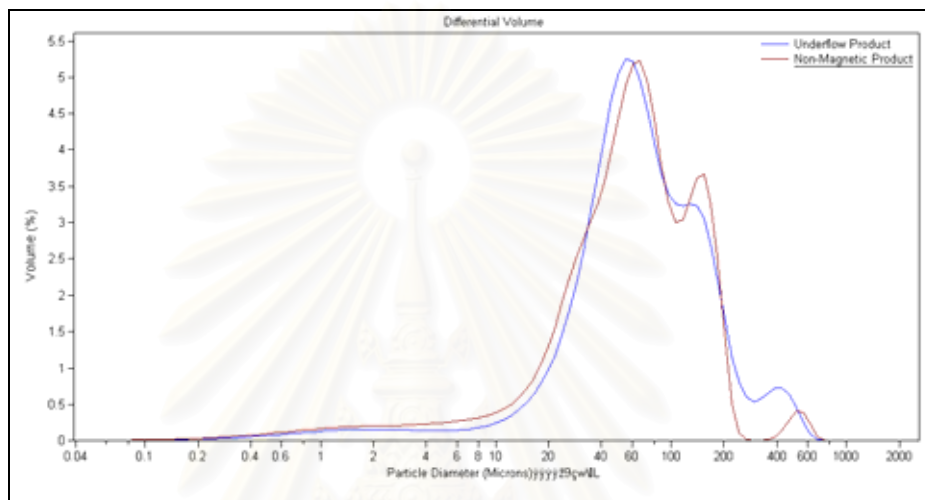
จากนั้นนำมลทินติดแม่เหล็กที่ติดอยู่ในแผ่นกรองไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4-25 ซึ่งพบว่าในส่วนของแร่ติดเหล็กนั้นสารประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ฮีมาไทต์ (Hematite :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแร่แมกนีไทต์ (Magnetite :  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) เป็นส่วนใหญ่



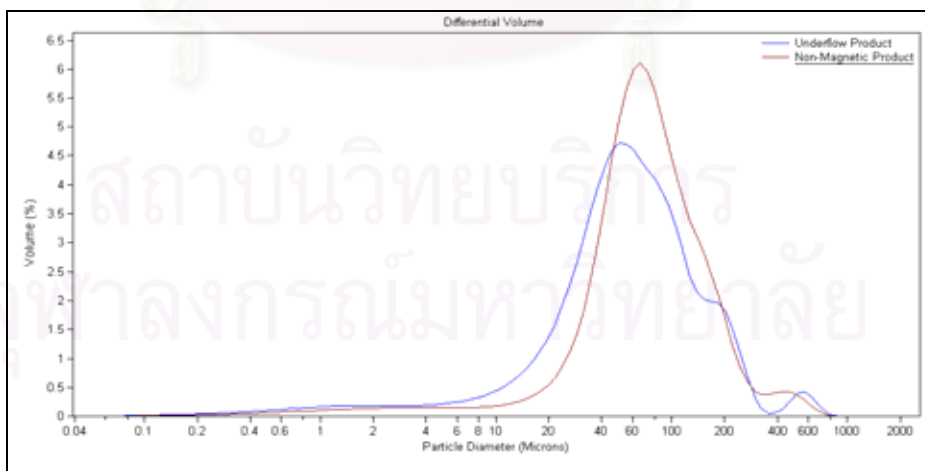


รูปที่ 4-25 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของมลทินติดแม่เหล็กที่ค้างในแผ่นกรอง (Matrix) แสดงสารประกอบเป็นแร่ฮีมาไทต์ แร่แมกนีไทต์ และแร่ลิปซัม(เล็กน้อย)

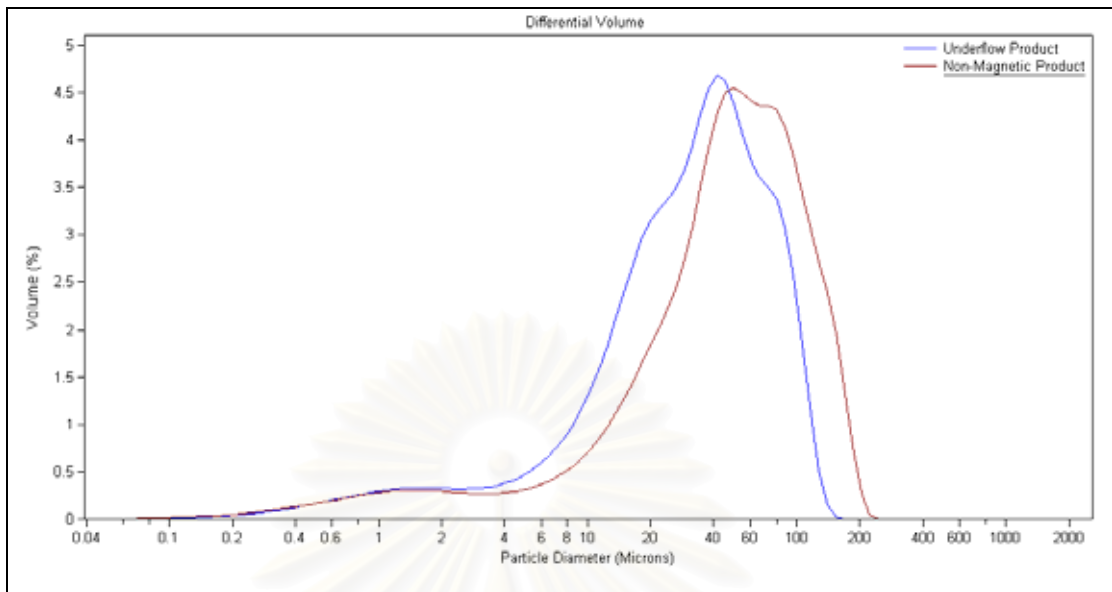
ผลการวิเคราะห์ขนาดการกระจายอนุภาค แสดงดังรูปที่ 4-26 ถึง 4-31 พบว่าหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง พบว่าอนุภาคบางส่วนได้หายไป อย่างไรก็ตามจากผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการกระจายขนาดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากปริมาณแร่ฮีมาไทต์และแร่แมกนีไทต์มีปริมาณไม่มากนักเมื่อเทียบกับแร่ป้อน



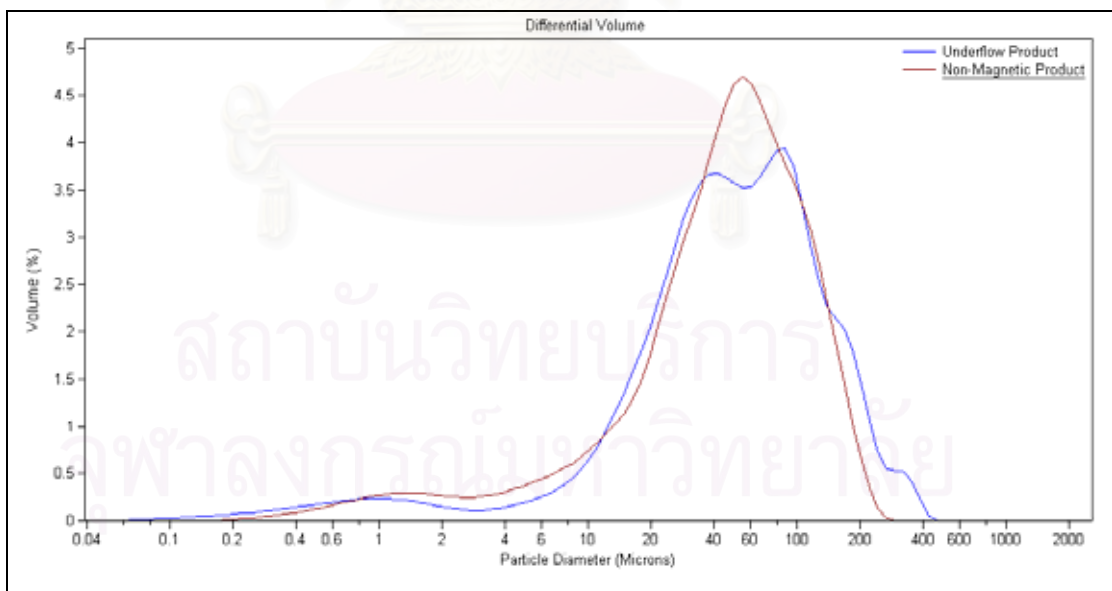
รูปที่ 4-26 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาด (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอน โดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



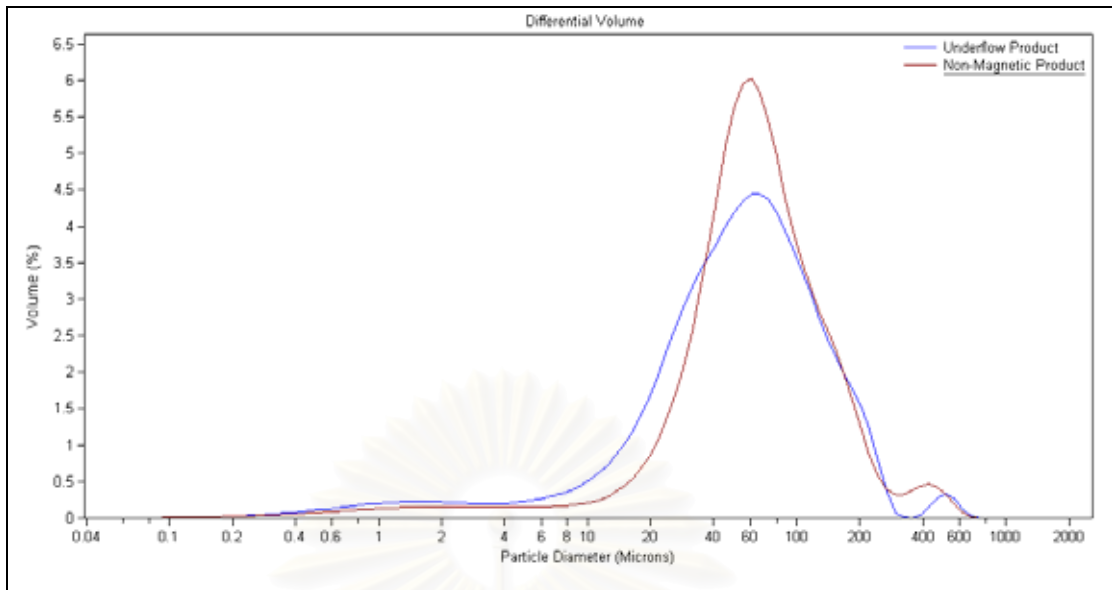
รูปที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาด (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอน โดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



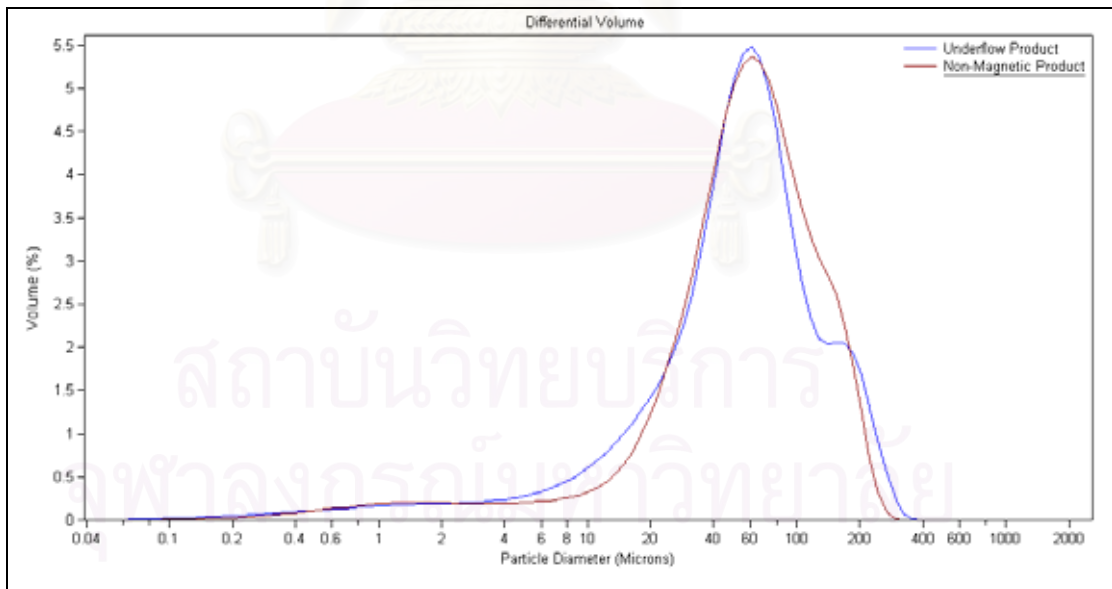
รูปที่ 4-28 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4-29 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



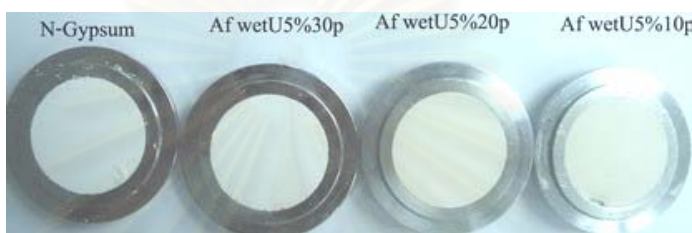
รูปที่ 4-30 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4-31 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคก่อนและหลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงโดยนำส่วนหยาบ (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนโดยป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

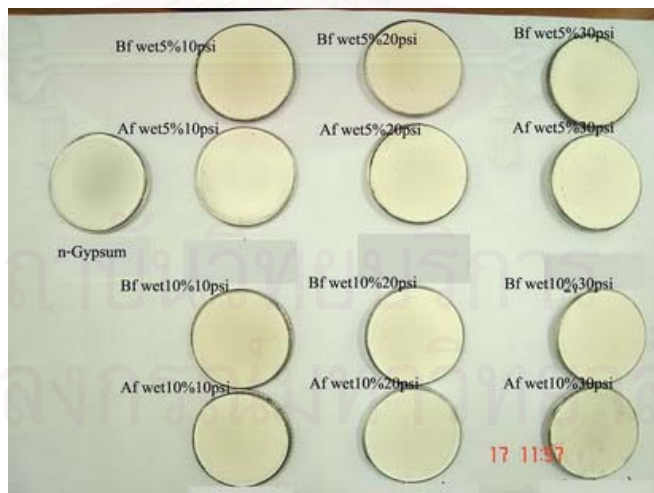
หลังจากผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเป็ยกความเข้มข้น พบว่าแร่ยิปซัมฟลูออไรด์ซึ่งไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) นั้นมีความขาวเพิ่มขึ้น เพราะแร่ฮีมาไทต์และแร่แมกนีไทต์ที่ทำให้สีของยิปซัมฟลูออไรด์เป็นสีน้ำตาลแดงนั้นได้ถูกแยกออกไป

การวัดความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brithness) ทำได้โดยใช้เครื่องวัด Technidyne รุ่น Colour Touch PC (รายละเอียดเครื่องมือดูในภาคผนวก ข) ซึ่งวัดค่าความขาวและความขาวสว่าง โดยวิธีการเตรียมตัวอย่างที่จะเข้าเครื่อง Technidyne แสดงดังรูปที่ 4-32 โดยการเติมผงยิปซัมขนาดละเอียดเข้าไปในภาชนะเพื่อจะนำไปวัดค่าความขาวและความขาวสว่าง



รูปที่ 4-32 การเตรียมตัวอย่างที่จะเข้าเครื่อง Technidyne

ตัวอย่างรูป 4-33 เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้แรงกด 20 บาร์ ก่อนเข้าเครื่องวัด Technidyne รุ่น Colour Touch PC ซึ่งสามารถวัดค่าความขาวและความขาวสว่างได้



รูปที่ 4-33 ตัวอย่างที่เตรียมด้วยแรงกด 20 บาร์ เพื่อที่จะสังเกตสีจากตาเปล่า

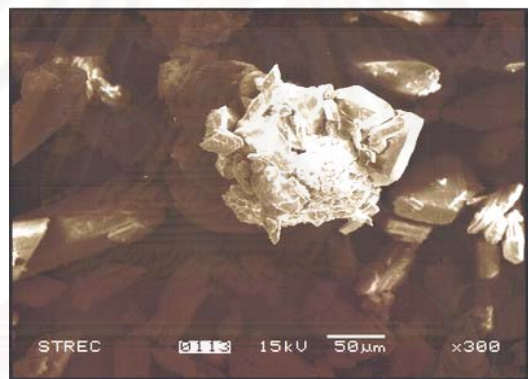
ผลการทดลองวัดค่าความขาวพบว่าค่าความขาว (Whiteness) และค่าความขาวสว่าง (Brightness) พบว่ามีค่าความขาวและค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นทุกการทดลองและหลังจากผ่าน

เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ กัน พบว่าเมื่อนำเอาส่วน  
 หยาบ (Underflow) ของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน (ด้วยการป้อนแร่ 5% solid โดยน้ำหนักที่  
 ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ซึ่งจะได้ % Yield = 92.15 แล้วนำเอาส่วนดังกล่าวไปผ่านเครื่อง  
 แยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูงที่ค่าความต่างศักย์ 70 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 14 แอมแปร์  
 และที่ Percentage of Maximum Output Voltage = 50 % ซึ่งจะแยกเอาส่วนไม่ติดแม่เหล็ก  
 (Non – Magnetic Product) ออกมาได้มากที่สุด 95.62% โดยน้ำหนักของแร่ป้อนเข้าเครื่องแยก  
 แม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง และพบว่าค่าความขาวของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีค่า = 54.83 และ  
 ค่าความขาวสว่างมีค่า = 72.20 ซึ่งใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติที่มีค่า 57.55 และ 66.95  
 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ค่าความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) ที่อ่านได้จาก  
 เครื่อง Technidyne ของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากการทดลอง

	ความขาวสว่าง(Brightness)				ความขาว(Whiteness)			
	ครั้งที่			เฉลี่ย	ครั้งที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
Natural Gypsum	66.9	66.85	67.1	<b>66.95</b>	57.2	57.35	58.1	<b>57.55</b>
Flue-Gas Gypsum	23.07	22.85	23.45	<b>23.12</b>	-86.5	-87.52	-86.75	<b>-86.92</b>
Feed Underflow 5%solid 10psi	60.58	61.2	59.5	60.43	26.72	26.85	27.2	26.92
After Pass Wet Magnetic U5% 10psi	73.1	72.25	73.24	72.86	52.68	51.23	50.15	51.35
Feed Underflow 5%solid 20psi	61.14	61.2	60.25	60.86	27.13	28.15	27.25	27.51
After Pass Wet Magnetic U5% 20psi	67.2	67.85	67.25	67.43	40.35	39.78	41.25	40.46
Feed Underflow 5%solid 30psi	70.85	71.2	69.75	70.60	47.87	46.95	45.28	46.70
After Pass Wet Magnetic U5% 30psi	73.55	72.1	70.95	<b>72.20</b>	54.59	54.65	55.25	<b>54.83</b>
Feed Underflow 10%solid 10psi	65.58	67.25	65.52	66.12	41.93	42.35	39.85	41.38
After Pass Wet Magnetic U10% 10psi	71.5	70.15	72.15	71.27	48.27	49.36	48.28	48.64
Feed Underflow 10%solid 20psi	68.01	68.05	68.28	68.11	46.18	47.89	47.48	47.18
After Pass Wet Magnetic U10% 20psi	70.79	71.05	69.85	70.56	48.27	47.21	48.96	48.15
Feed Underflow 10%solid 30psi	64.26	63.25	65.26	64.26	34.71	35.62	34.98	35.10
After Pass Wet Magnetic U10% 30psi	71.04	70.28	72.15	71.16	48.8	47.95	46.02	47.59

เมื่อแร่ยิปซัมฟลูแก๊สผ่านไฮโดรไซโคลนและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง โดยนำแร่ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่ได้มาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังแสดงในรูป 4-34 พบว่าภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่ 5% solid โดยน้ำหนัก ความดันที่ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง พบว่าแร่ยิปซัมฟลูแก๊สจะไม่เกาะกันเป็นก้อน มีการกระจายตัวดีขึ้น ยังพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้การทดลองนี้มีค่าความขาวมากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้นั้นคาดว่า การคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนจะทำให้พื้นผิวของยิปซัมฟลูแก๊สได้เกิดการขัดสีอย่างแรงด้วยน้ำเป็นตัวกลาง (Medium) ภายในเครื่องคัดขนาดไฮโดรไซโคลนทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีความขาวมากขึ้นคล้ายกับการทำความสะอาดผิวของยิปซัมนั้นซึ่งอาจมีอนุภาคของมลทินอื่นเกาะบริเวณพื้นที่ผิวของยิปซัม นอกจากนั้นแล้วหากนำเอาส่วนดังกล่าวมาแยกด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง จะสามารถแยกเอาแร่เหล็กฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแร่เหล็กแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่งเป็นมลทินที่ทำให้ยิปซัมน้ำตาลแดงออกไป ทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สนั้นขาวเพิ่มขึ้นไปได้อีก



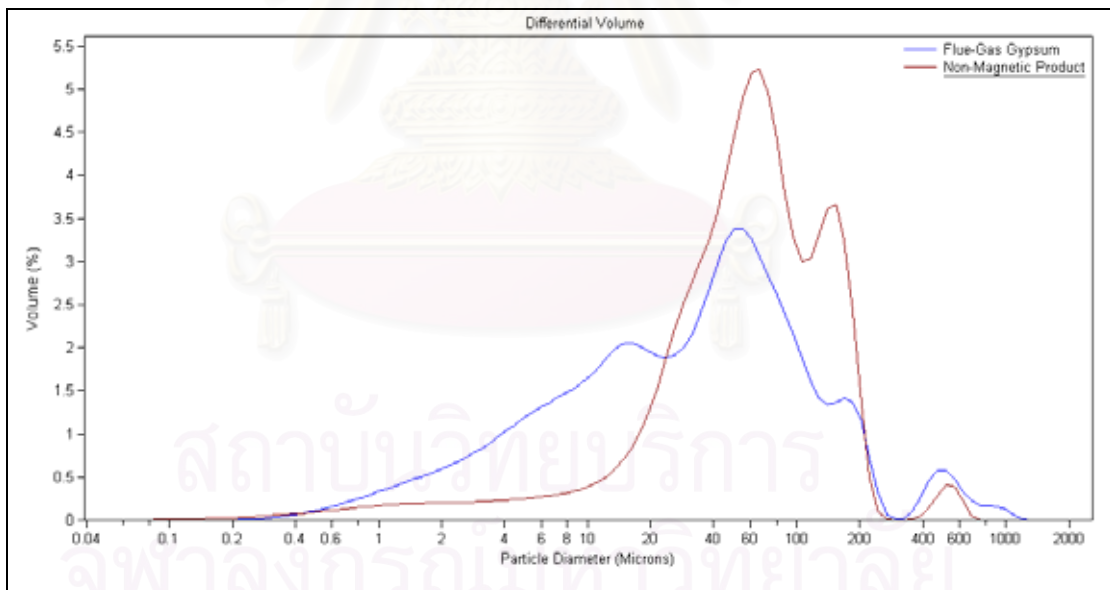
รูปที่ 4-34 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊ส



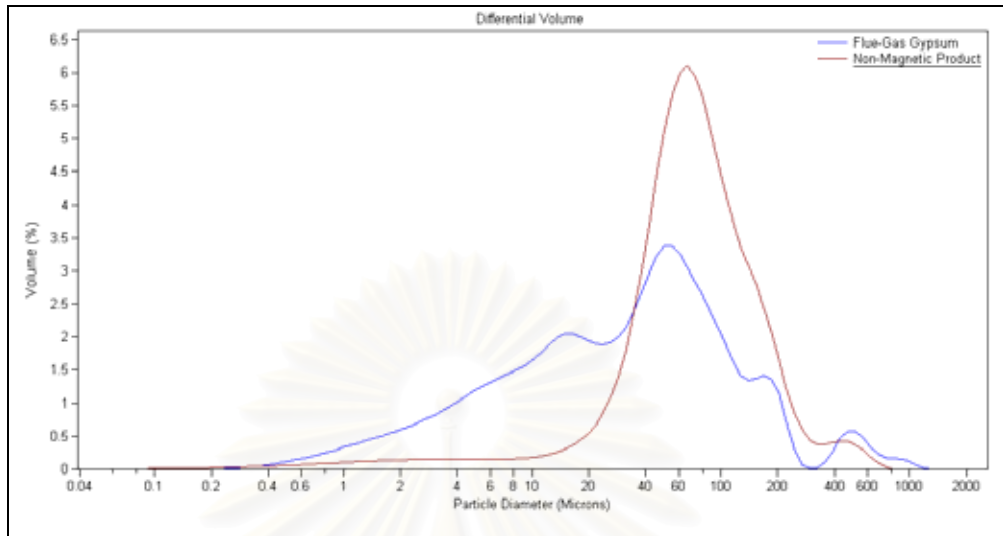
รูปที่ 4-35 ภาพถ่าย SEM ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่ป้อนแร่ ที่ความเข้มข้น 5%

solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

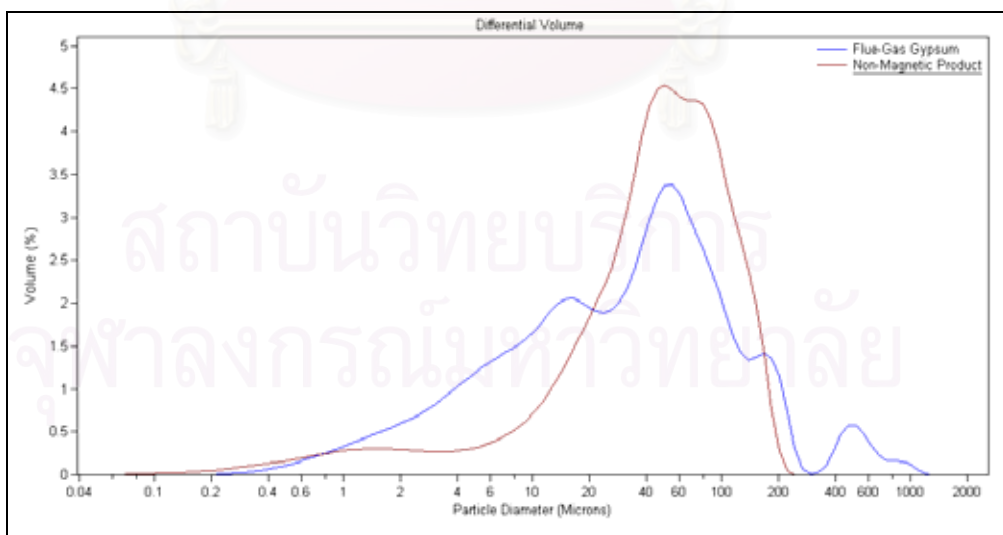
หลังจากผ่านการทดลองที่ไฮโดรไซโคลนและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงนำแร่ยิปซัมฟลูแก๊สซึ่งไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่ได้มาตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (ดูภาคผนวก ค) ดังแสดงในรูปที่ 4-36 ถึงรูปที่ 4-41 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคเมื่อเทียบกับยิปซัมฟลูแก๊สนั้นเปลี่ยนไป โดยส่วนละเอียดตั้งแต่ 0-10 ไมโครเมตร (ละเอียด) ส่วนใหญ่ได้ถูกกำจัดออกไป และส่วนที่ขนาดตั้งแต่ 200 ไมโครเมตร (หยาบ) ได้ถูกกำจัดออกไปโดยใช้ตะแกรงเปียกขนาด 60 เมช (250 ไมครอน) ทำการคัดขนาดเอากววด ทราาย และเศษหินทิ้งออกไปก่อน ซึ่งมีผลให้ผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ได้มานั้นมีความขาวขึ้น เนื่องจากเกิดการคัดขนาดส่วนละเอียด (ซึ่งประกอบด้วยแก้วลอย แร่ฮีมาไทต์บางส่วนและมลทินอื่นๆ ที่จะทำให้เกิดสีน้ำตาลแดงแก่ยิปซัมฟลูแก๊สได้ถูกคัดขนาดออกไป) อีกทั้งแร่ฮีมาไทต์ส่วนที่เหลือและแร่แมกนีไทต์ซึ่งเป็นแร่ที่ทำให้สีของยิปซัมฟลูแก๊สเป็นสีน้ำตาลแดงนั้นได้ถูกแยกออกในส่วนแร่ติดแม่เหล็กในขบวนการแยกด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง



รูปที่ 4-36 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง)



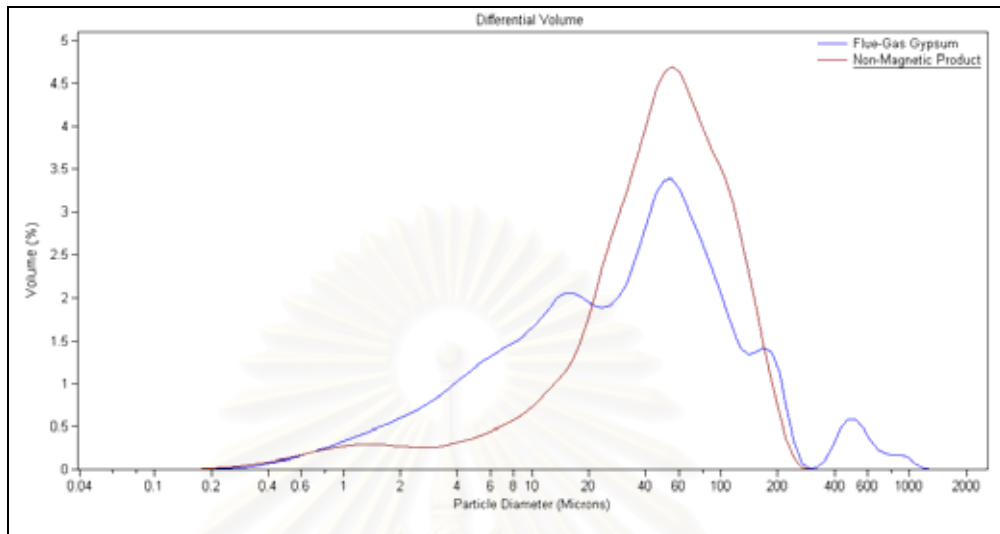
รูปที่ 4-37 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูเอ็กส์เปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง)



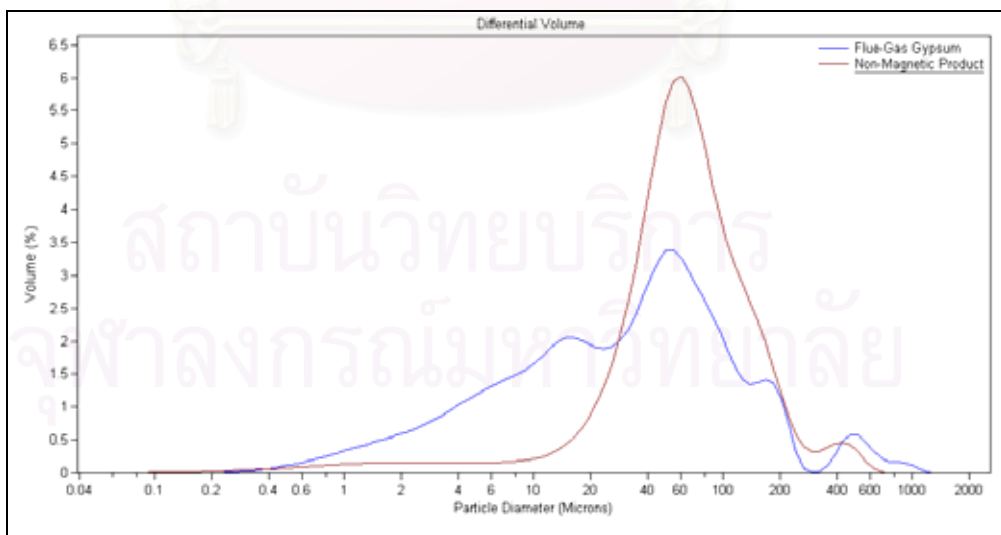
รูปที่ 4-38 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแร่ยิปซัมฟลูเอ็กส์เปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่



ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความ  
เข้มข้นสูง)

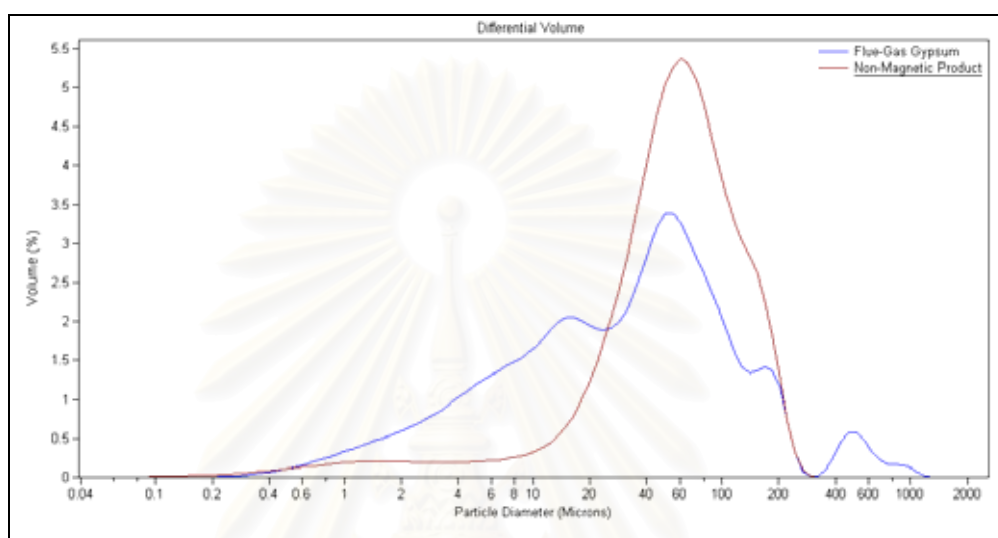


รูปที่ 4-39 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแรยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ  
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ใน  
การคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก  
ที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความ  
เข้มข้นสูง)



รูปที่ 4-40 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแรยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ  
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ใน  
การคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก

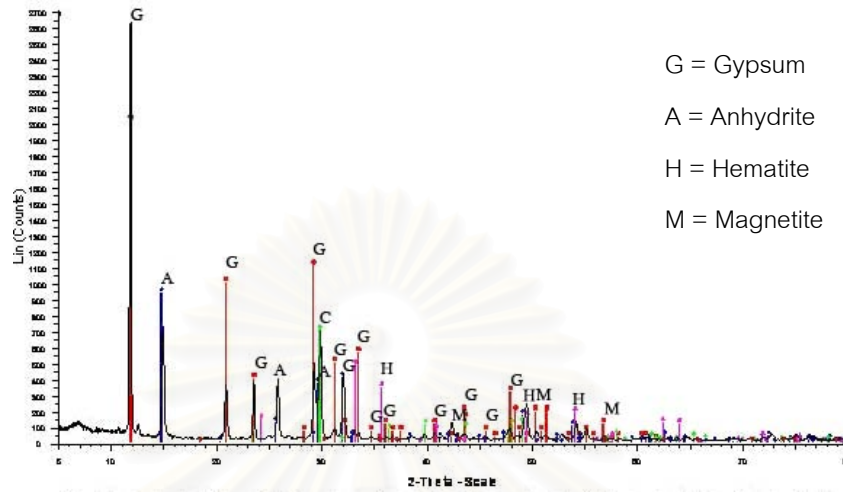
ที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง)



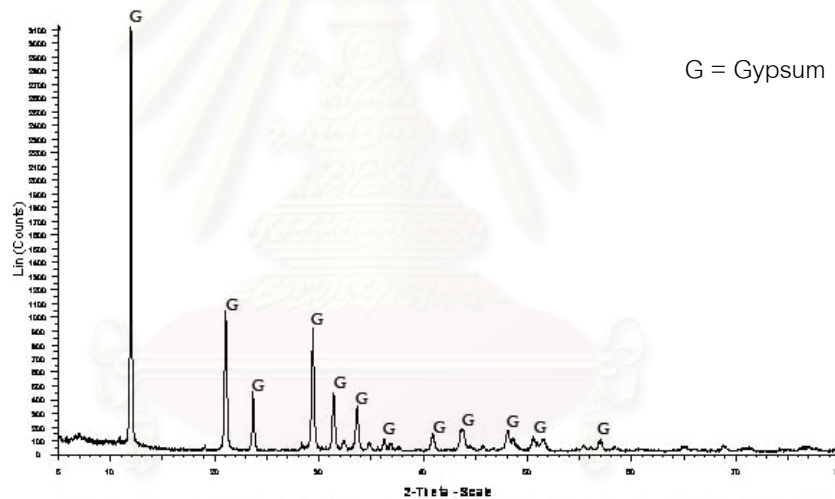
รูปที่ 4-41 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของแรียิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) (ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก ที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง)

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non – Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ที่ได้จากการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่มีการแร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลการวิเคราะห์ XRD ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด (Optimum Condition) ดังรูปที่ 4-42 พบว่าผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ได้ในสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดนั้นมีความบริสุทธิ์ขึ้น ใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติ (รูปที่ 4-4) โดยที่สามารถกำจัดมลทินอื่นๆ เช่นแร่แอนไฮไดรต์ รวมทั้งแร่เหล็กฮีมาไทต์และแร่เหล็กแมกนีไทต์ (ซึ่งทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสีน้ำตาลแดง แสดงดังรูปที่ 4-3) ออกไป อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าส่วนไม่ติด

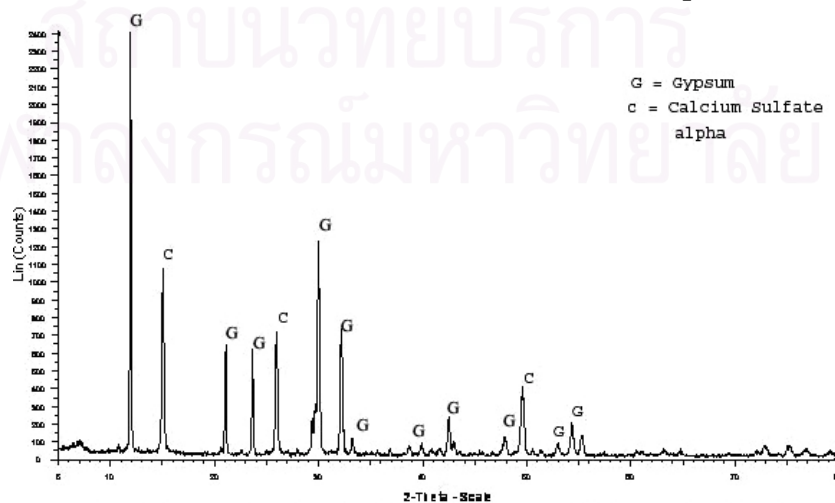
แม่เหล็ก ในสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดพบว่าจะประกอบไปด้วยยิปซัมเป็นส่วนใหญ่และยังพบ Alpha Calcium Sulfate ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อย



แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมฟลูแก๊ส (รูปที่ 4-3)



แสดงผลวิเคราะห์ผล XRD ของยิปซัมธรรมชาติ (รูปที่ 4-4)



**รูปที่ 4-42 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่สภาวะการทดลองดีที่สุด (Optimum Condition) เมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ XRD ของ ยิปซัมฟลูแก๊สและยิปซัมธรรมชาติ**

จากผลการวิเคราะห์ XRF ของยิปซัมฟลูแก๊สในส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ที่เกิดจากการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่สภาวะการทดลองต่างๆกัน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 พบว่าส่วนไม่ติดแม่เหล็กของส่วนหยาบในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักและที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ซึ่งให้ค่าความขาว = 54.83 และค่าความขาวสว่าง = 72.20 ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดนั้น) มีปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ต่ำที่สุด (ค่า  $Fe_2O_3$  = 0.04%) ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนนี้มีสีขาวยามากเมื่อเปรียบเทียบกับยิปซัมฟลูแก๊ส (มีค่า  $Fe_2O_3$  = 1.14%) ซึ่งมีสีน้ำตาลแดง

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความขาวและความขาวสว่างของแร่ยิปซัมจะขึ้นอยู่กับปริมาณ  $Fe_2O_3$  กล่าวคือ เมื่อทำการแยกมลทินในยิปซัมฟลูแก๊สซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่เหล็กฮีมาไทต์ ( $Fe_2O_3$ ) และแร่เหล็กแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) ออกไปกับยิปซัมฟลูแก๊สก็จะทำให้สีของยิปซัมฟลูแก๊สจากสีน้ำตาลแดงกลายเป็นสีขาวของยิปซัมที่บริสุทธิ์ขึ้น

**ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ XRF ของส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่ความเข้มข้น 5% solid และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10,20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว**

ส่วนประกอบ	องค์ประกอบ (wt%)						
	ยิปซัม ฟลูแก๊ส	ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนัก			ความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนัก		
		ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)			ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
		10 psi	20 psi	30 psi	10 psi	20 psi	30 psi
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.97	0.29	0.27	0.19	0.43	0.26	0.00
SiO <sub>2</sub>	9.53	0.27	0.26	0.21	0.35	0.30	0.21
SO <sub>3</sub>	37.82	44.39	45.91	46.95	44.97	46.40	46.46
K <sub>2</sub> O	0.41	0.25	0.23	0.22	0.21	0.21	0.21
CaO	27.28	31.05	32.60	32.76	32.52	32.63	32.48
TiO <sub>2</sub>	0.15	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1.14</b>	<b>0.36</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>
NiO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CuO	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
ZnO	0.19	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
SrO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
ZrO <sub>2</sub>	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PbO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

จากผลการวิเคราะห์ XRF ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะการทดลองต่างๆกัน ในตารางที่ 4-9 มาคำนวณเฟสองค์ประกอบของแร่ยิปซัม โดยวิธีการคำนวณน้ำผลึก (Combined Water) ที่หายไป (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ในภาคผนวก ซ) พบว่าผลิตภัณฑ์เหล่านั้นมีคุณภาพต่างๆกัน ซึ่งสามารถเข้าเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม (ดูรายละเอียดที่ หัวข้อที่ 2.6 ตารางที่ 2-2 ของบทที่ 2) โดยส่วนหยาบของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนซึ่งป้อนแร่วัดที่ความเข้มข้น 5% และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมีปริมาณยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) สูงเกินกว่าร้อยละ 95.00 ซึ่งเข้าเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัมขั้นที่หนึ่ง ขณะที่ส่วนหยาบของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนซึ่งป้อนแร่วัดที่ความเข้มข้น 5% และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมีปริมาณยิปซั่มมากกว่าร้อยละ 90 แต่ไม่เกินร้อยละ 95.00 ซึ่งเข้าเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัมขั้นที่สอง

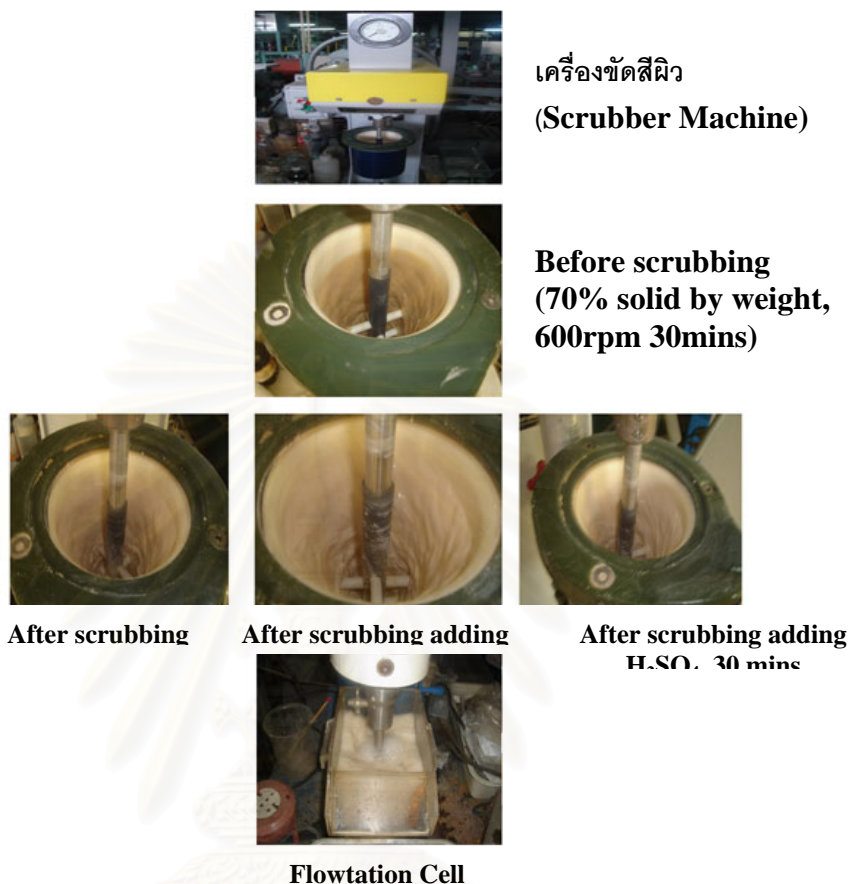
ตารางที่ 4-10 แสดงเฟสองค์ประกอบของส่วนไม่ติดแม่เหล็กที่ผ่านการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนและเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นและความดันต่างๆกัน

การทดลอง	ปริมาณ ยิปซัม (ร้อยละ)	ซิลิกอนไดออกไซด์ และสารไม่ละลาย อื่นๆ (ร้อยละ)	เข้าเกณฑ์มาตรฐาน อุตสาหกรรมยิปซัม (มอก.595-2528) ชั้นคุณภาพที่
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	92.5	1.02	2
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	95.26	0.64	1
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	97.42	0.51	1
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	93.31	0.91	2
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	96.28	0.63	1
ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง	96.4	0.49	1

#### 4.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ในการปรับปรุงคุณภาพความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness)

การทดลองการขัดสีผิว โดยใช้เครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5 บทที่ 3 มีขั้นตอนการทดลอง คือนำส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด (Optimum Condition) มาเข้าเครื่องขัดสีผิวโดยใช้ความเข้มข้นของแร่ป้อนที่ 70% solid โดยน้ำหนักที่ความเร็วในการกววนรอบ 600 รอบต่อนาที และใช้น้ำเป็นสื่อกลางในการขัดสีผิวโดยใช้เวลา 30 นาที โดยแบ่งสภาวะการทดลองเป็นการขัดสีผิวโดยไม่ใช้สารเคมีการขัดสีผิวโดยการเติมโซดาไฟ (1.43 กิโลกรัมต่อตันแร่ป้อน) และการขัดสีผิวโดยการเติมกรดซัลฟูริก (0.02 กิโลกรัมต่อตันแร่ป้อน) เพื่อจะเปรียบเทียบกับ การขัดสีผิวโดยไม่ใช้สารเคมี หลังจากการขัดสีผิวแล้วนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องลอยแร่ ( Flotation Cell ) ที่รอบ 1,000 รอบต่อ นาที เพื่อเพิ่มความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brightness) มากขึ้น โดยมีแผนผังการ

ทำงานดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-3 ในบทที่ 3 และมีรูปภาพแสดงการทดลองการขัดสีผิวแสดง ดังรูปที่ 4-43



รูปที่ 4-43 ขณะทำการขัดสีผิวและหลังผ่านกระบวนการขัดสีผิวที่สภาวะการทดลองต่างๆ จากผลการทดลองการขัดสีผิว ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าหลังผ่านการขัดสีผิวที่สภาวะการทดลองต่างๆ พบว่ามีค่าความขาวและความขาวสว่างเพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดลอง และในการทดลองการขัดสีผิวโดยใช้โซดาไฟ (NaOH) ที่ 1.43 กิโลกรัมต่อตันแร่ป้อน ซึ่งเดิมเข้าไปในขณะการขัดสีผิว ใช้เวลานาน 30 นาที พบว่าสามารถวัดความขาวของผลิตภัณฑ์ที่ได้มากที่สุด = 61.25 และวัดค่าความขาวสว่างได้มากที่สุด = 80.65 เพิ่มจากแร่ป้อน โดยแร่ป้อนคือส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวนี้อ่านค่าความขาว = 54.83 และค่าความขาวสว่าง = 72.2

ตารางที่ 4-11 แสดงค่าความขาว (Whiteness) และค่าความขาวสว่าง (Brightness) ก่อนและหลังเข้าเครื่องขัดสีผิว (Scrubber Machine) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

	Natural-Gypsum		Non-Magnetic Product Optimum Condition	
ค่าความขาว (Brightness)	66.95		72.2	
ค่าความขาว (Whiteness)	57.55		54.83	
After Scrubbing 70% solid by weight without adding reagent at 600 rpm for 30 mins				
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
ค่าความขาว (Brightness)	75.37	76.39	75.39	75.72
ค่าความขาว (Whiteness)	57.24	58.01	57.25	57.5
After Scrubbing 70% solid by weight adding 1.43 kg/ton feed of NaOH at 600 rpm for 30 mins				
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
ค่าความขาว (Brightness)	80.10	<b>80.65</b>	78.72	79.82
ค่าความขาว (Whiteness)	60.83	<b>61.25</b>	59.78	60.62
After Scrubbing 70% solid by weight adding 0.02 kg/ton feed of H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> at 600 rpm for 30 mins				
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
ค่าความขาว (Brightness)	78.42	76.7	76.31	77.14
ค่าความขาว (Whiteness)	59.55	58.25	57.95	58.58

น้ำแร่ที่ผ่านการขัดสีผิว (Scrubbed Product) มาคำนวณเฟสองค์ประกอบของยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) โดยวิธีการหาน้ำผลึกที่หายไป (ดูภาคผนวก ข) แล้วคำนวณหาปริมาณยิปซัม ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 เฟสองค์ประกอบของแร่ที่ผ่านการขัดสีผิว (Scrubbed Product) ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

เฟส (คำนวณ ร้อยละ)	ผลิตภัณฑ์ก่อนขัดสีผิว	ผลิตภัณฑ์ขัดสีผิวที่ไม่เติมสารเคมี	ผลิตภัณฑ์ขัดสีผิวโดยเติมโซดาไฟ	ผลิตภัณฑ์ขัดสีผิวโดยเติมกรดซัลฟูริก
ยิปซัม (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	97.42	97.30	<b>97.45</b>	97.00
ซิลิกอนไดออกไซด์ SiO <sub>2</sub> และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ	0.51	0.49	<b>0.11</b>	0.35



หลังจากผ่านการขัดสีที่สภาวะการทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า การคำนวณเฟสองค์ประกอบโดยวิธีหาน้ำผลึกที่หายไป (ดูภาคผนวก ข) นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเฟสองค์ประกอบจากการคำนวณก่อนเข้าเครื่องขัดสีผิว เพราะเนื่องจากการขัดสีผิวมีผลกับมลทินที่ยังมีอยู่ โดยถ้าเพิ่มสารเคมีโซดาไฟ (NaOH) ซึ่งเป็นสารเคมีใช้เป็นตัวขัดสีผิวทำให้มลทินต่างๆ ที่เคลือบผิวแร่ยับซึมฟุ้งแก๊สอยู่ จากตอนก่อนเข้าเครื่องขัดสีผิว ฉะนั้นการขัดสีผิวช่วยเพิ่มความขาวและค่าความขาวสว่าง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อเฟสองค์ประกอบของแร่ยับซึมโดยการขัดสีผิวของแร่ยับซึมจะช่วยให้มลทินต่างๆ ที่เคลือบผิวของแร่ยับซึมเกิดการขัดสีกัน จนทำให้หลุดออกมาจากผิวยับซึม ทำให้ยับซึมขาวขึ้นโดยการเติมโซดาไฟ (หรือกรดซัลฟูริก) จะช่วยให้การขัดสีผิวเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น

เมื่อผ่านขั้นตอนทุกกระบวนการนั้น แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความขาวและความสว่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-44



รูปที่ 4-44 แสดงค่าความขาวและความสว่างเปรียบเทียบในทุกสภาวะการทดลอง

หลังจากผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ พบว่าสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดคือ ที่การทดลองการขัดสีผิวโดยการเติมโซดาไฟ ที่ 1.43 กิโลกรัมต่อตันแร่ป้อน โดยใช้ความเข้มข้นของแร่ป้อนที่ 70% solid โดยน้ำหนักที่ความเร็วในการกววนรอบ 600 รอบต่อนาที และใช้เวลา 30 นาทีในการขัดสีผิว โดยผลิตภัณฑ์ที่การทดลองที่ดีที่สุดโดยใช้ตัวอย่างแร่ป้อนซึ่งเป็นแร่ที่เป็นส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอน โดยการป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วแล้วผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นที่ค่าความต่างศักย์ 70 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 14 แอมแปร์ และ Percentage of Maximum Output Voltage ที่ 50 % ซึ่งเป็นสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถวัดค่าความขาว 61.25 และค่าความสว่าง 80.65 ซึ่งสูงกว่าค่าของแร่ยับซึมธรรมชาติซึ่งมีค่าความขาว 57.55 และค่าความขาวสว่าง 66.95

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เกาะโดยเทคโนโลยีการแต่งแร่เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับยิปซัมฟลูแก๊ส สามารถนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนและอาจเป็นวัตถุดิบทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมยิปซัมหรืออุตสาหกรรมอื่นๆในอนาคต โดยจากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีสิ่งเจือปน ซึ่งได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ โดยเฟสองค์ประกอบยิปซัมฟลูแก๊สมียิปซัม (Gypsum) ร้อยละ 78.47 แอนไฮไดรต์ อยู่ร้อยละ 6.65 มีซิลิกอนไดออกไซด์และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ อยู่ร้อยละ 14.88 จากผลวิเคราะห์ XRD พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีองค์ประกอบของ แร่ยิปซัม แร่แอนไฮไดรต์ แร่ฮีมาไทต์ แร่แมกนีไทต์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ เป็นต้น ขนาดอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊สแบ่งการกระจายตัวเป็น 3 ช่วง คือช่วงที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร 10 ถึง 200 ไมโครเมตร และที่มีขนาดใหญ่กว่า 200 ไมโครเมตร ซึ่งในแต่ละช่วงของการกระจายขนาดจะมีปริมาณเท่ากับ 5.9%, 87.85% และ 6.25% โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยอนุภาคส่วนใหญ่ (87.85%) จะมีขนาดอยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ไมโครเมตร นอกจากนี้จากผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของยิปซัมฟลูแก๊สมีขนาดแตกต่างกันมากและมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน มีอนุภาคบางส่วนเกาะกันเป็นก้อน

เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สมาผ่านการคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดไฮโดรไซโคลอน พบว่าไฮโดรไซโคลอนสามารถคัดแยกส่วนหยาบ (Underflow) โดยมี Yield มากกว่าร้อยละ 90 ในทุกสภาวะการทดลอง เมื่อนำอนุภาคในส่วนละเอียด (Overflow) ที่คัดแยกไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าอนุภาคที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป และมีการกระจายขนาดอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 20 ไมโครเมตร ซึ่งจากผลของ XRD พบว่าประกอบไปด้วย เถ้าลอย (Fly ash) แร่แอนไฮไดรต์ แร่ควอตซ์ แร่ฮีมาไทต์ และแร่ทัลก์ ซึ่งหลังจากผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนแล้วส่วนหยาบ (Underflow) จะมีสีอ่อนลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้การคัดขนาดทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีขนาดที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10-200 ไมครอน

เมื่อนำแร่ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนจากส่วนหยาบที่ได้จากการป้อนแร่เข้าไฮโดรไซโคลอนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมาผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ที่ค่าความต่างศักย์ 70 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 14

แอมแปร์ และ Percentage of Maximum Output Voltage ที่ 50% สามารถเก็บมลทินที่ติดมากับแผ่นกรองออกมาได้มากที่สุดที่ร้อยละ 4.38 โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ที่ออกมาได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 95.62 โดยน้ำหนัก (95.62% Yield) ซึ่งจากผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาค พบว่าขนาดไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อนำแร่ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) มาทดสอบความขาวและความขาวสว่าง พบว่าแร่ที่มีความขาวและความสว่างเพิ่มขึ้นทุกการทดลอง โดยที่ การทดลองที่นำเอาส่วนหยาบ (Underflow) ที่ได้จากการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่ทำการป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักและความดันที่ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มาวัดความขาวพบว่ามีค่า 54.83 และค่าความขาวสว่างมีค่า 72.20 ซึ่งใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติที่วัดได้ 57.55 และ 66.95 ตามลำดับ แล้วนำส่วนติดแม่เหล็ก (Magnetic Product) ไปวิเคราะห์ XRD พบว่าเป็นแร่ฮีมาไทต์ (Hematite :  $Fe_2O_3$ ) และแร่แมกนีไทต์ (Magnetite :  $Fe_3O_4$ ) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อนำเอาส่วนที่ไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าแร่ยิปซัมฟลูแก๊สจะไม่เกาะกันเป็นก้อน มีการกระจายตัวดีขึ้น และพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้รับการทดลองนี้มีค่าความขาวและความขาวสว่างมากที่สุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนจะทำให้พื้นผิวของยิปซัมฟลูแก๊สได้เกิดการขัดสีผิวอย่างแรงด้วยน้ำเป็นตัวกลาง (Medium) ภายในเครื่องคัดขนาด ไฮโดรไซโคลอนทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีความขาวและความขาวสว่างมากขึ้นคล้ายกับการทำความสะอาดผิวของแร่ยิปซัมที่มีอนุภาคของมลทินอื่นซึ่งอาจเกาะบริเวณพื้นที่ผิวของแร่ยิปซำนอกจากนั้นแล้วหากนำเอาส่วนดังกล่าวมาแยกด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงอีกก็จะสามารถแยกเอาแร่เหล็กฮีมาไทต์ และแร่เหล็กแมกนีไทต์ซึ่งเป็นแร่ที่ทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสีน้ำตาลแดงออกไปซึ่งจะทำให้ยิปซัมขาวเพิ่มขึ้นได้อีก นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ขนาดพบว่า ส่วนละเอียดตั้งแต่ 0-10 ไมโครเมตร (ละเอียด) และส่วนที่ขนาดตั้งแต่ 200 ไมโครเมตร (หยาบ) ได้ถูกกำจัดออกไป หรือ อนุภาคเถ้าลอย แร่ฮีมาไทต์ แร่เหล็กแมกนีไทต์ และมลทินอื่นๆ ที่จะทำให้เกิดสีแดงแก่ยิปซัมฟลูแก๊ส ได้ถูกกำจัดออกไป ซึ่งมีผลทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สที่ออกมาที่มีความขาวมากขึ้น

เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านไฮโดรไซโคลอนและเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงไปวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีความบริสุทธิ์ขึ้น ใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติ เนื่องจากผลการวิเคราะห์ XRD ที่แสดงนั้นไม่พบมลทินจากแร่อื่นๆ ยกเว้นมีส่วนผสมของ Alpha Calcium Sulfate และจากผลวิเคราะห์ด้วย XRF พบว่าปริมาณของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ลดลงในทุกสภาวะการทดลอง โดยส่วนไม่ติดแม่เหล็กของส่วนหยาบที่เกิดจากการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลอนที่ป้อนแร่ที่ความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ให้ค่า

ความขาวและความขาวสว่างมากที่สุดผลวิเคราะห์ค่าเหล็กออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับแร่ป้อนซึ่งคือยิปซัมฟลูแก๊สมีค่าเหล็กออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 1.14 โดยน้ำหนัก

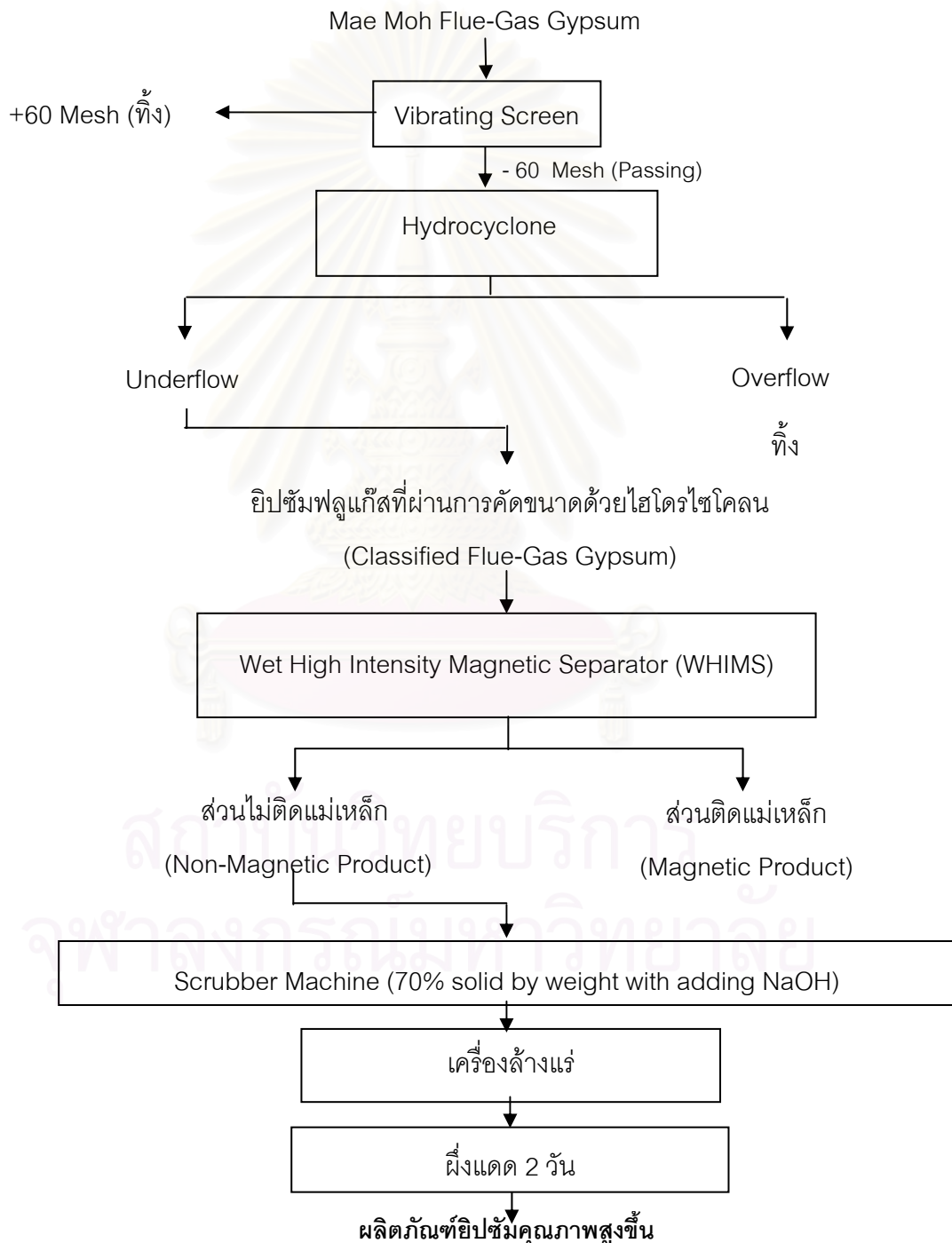
เมื่อนำเอาผลิตภัณฑ์ส่วนหยาบของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนและเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูงไปคำนวณเฟสองค์ประกอบโดยวิธีคำนวณน้ำผลึกที่หายไป พบว่าผลิตภัณฑ์เหล่านั้นมีคุณภาพต่างๆกัน ซึ่งสามารถเข้าเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม โดยส่วนหยาบของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนซึ่งป้อนแร่ที่มีความเข้มข้น 5% และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 และ 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมีปริมาณยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) สูงเกินกว่าร้อยละ 95.00 ซึ่งเข้าเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัมขั้นที่หนึ่ง ขณะที่ส่วนหยาบของการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนซึ่งป้อนแร่ที่มีความเข้มข้น 5% และ 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วมีปริมาณยิปซัมมากกว่าร้อยละ 90 แต่ไม่เกินร้อยละ 95.00 ซึ่งเข้าเกณฑ์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัมขั้นที่สอง

ผลการทดลองการปรับปรุงคุณภาพความขาวและความขาวสว่างพบว่าหลังผ่านการขัดสีผิวที่สภาวะการทดลองต่างๆ พบว่ามีค่าความขาวและความขาวสว่างเพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดลองและในการทดลองการขัดสีผิวโดยใช้โซดาไฟ (NaOH) ที่ 1.43 กิโลกรัมต่อตันแร่ป้อนซึ่งเติมเข้าไปในขณะการขัดสีผิว ซึ่งพบว่าหลังการขัดสีผิวสามารถวัดค่าความขาวได้มากที่สุดคือ 61.25 และวัดค่าความขาวสว่างได้มากที่สุดคือ 80.65 เพิ่มจากแร่ป้อน โดยแร่ป้อนคือส่วนไม่ติดแม่เหล็กของส่วนหยาบในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แร่ป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง ซึ่งอ่านค่าความขาวได้ 54.83 และค่าความขาวสว่าง 72.2 ตามลำดับ จากการคำนวณเฟสองค์ประกอบโดยวิธีหาน้ำผลึกที่หายไปหลังจากผ่านการขัดสีผิวที่สภาวะการทดลองต่างๆ นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเฟสองค์ประกอบจากการคำนวณก่อนเข้าการขัดสีผิว เพราะเนื่องจากการขัดสีผิวมีผลกับมลทินที่ยังมีอยู่ โดยถ้าเพิ่มสารเคมี โซดาไฟ ซึ่งเป็นสารเคมีใช้เป็นตัวช่วยขัดมลทินต่างๆ ที่เคลือบผิวของแร่ยิปซัมให้หลุดออกมาได้ง่าย ดังนั้นการขัดสีผิวช่วยเพิ่มความขาวและค่าความขาวสว่าง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อเฟสองค์ประกอบของแร่ยิปซัมฟลูแก๊ส

จากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีความขาว = -86.92 และค่าความขาวสว่าง = 23.12 จะสามารถปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ยิปซัมขั้นสุดท้ายที่มีความขาว = 61.25 และค่าความขาวสว่าง = 80.65 โดยผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายจะมีคุณภาพสูงกว่าแร่ยิปซัมธรรมชาติ (ที่มีความขาว = 57.55 และค่าความขาวสว่าง = 66.95 )

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนพบว่าสามารถคัดแยกส่วนละเอียด คือ etailoy ส่วนใหญ่ ส่วนมลทินซึ่งเป็นแร่เหล็กสามารถถูกแยกออกไปได้ด้วยเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสูง โดยผลการขัดสีผิวพบว่าไซดาไฟช่วยทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีการปรับปรุงคุณภาพความขาวและความสว่างเพิ่มขึ้น ผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สจากแหล่งแม่เมาะที่เหมาะสมได้แสดงให้เห็นตามรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 ผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สจากแหล่งแม่เมาะที่เหมาะสม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- สำนักงานวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การศึกษากาการใช้ประโยชน์ จาก ยิปซัมฟลูแก๊ส. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2541.
- สำนักงานวิจัยและพัฒนาการการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. เครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539.
- กรมทรัพยากรธรณี. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย (Fly Ash) และยิปซัมสังเคราะห์ที่เกิดจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : กรมทรัพยากรธรณี, 2541.
- นิคม โชติกานนท์. การแต่งแร่. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2536.
- วิจิต ประกายพรรณ. การผลิตยิปซัมพลาสเตอร์จากยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีเซรามิก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. สมบัติที่ต้องการของยิปซัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528 , 2528

### ภาษาอังกฤษ

- Wirsching F. The Chemistry and Technololy of Gypsum. In R.A. Kuntze (ed.) ASTM Special Technical Publication 861, pp. 160-172, 1983.
- Supatra Jinawath. Gypsum Technology. Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University, 2005.
- Zisselmar , R. Agglomeration of Flue Gas Gypsum with Roller Presses . ZKG International 39 No.5 :243-249, 1985

## ภาคผนวก ก

### เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Florescence) รุ่น Philips PW2404



ขีดความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารที่อยู่ในตัวอย่าง (ธาตุ O-U, 100 ppm - 100%) วิเคราะห์หาปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$  ในวัสดุดิบทาง Ceramic โดย Fused Cast Bead Method สถานะของวัสดุที่รับทดสอบตัวอย่างงานวัสดุดิบเซรามิกส์ ชิ้นงานโลหะ ตะกอน เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ เรียกสั้นๆว่า XRF เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูง ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อย Photon ออกมา (Fluoresced) เนื่องจาก Photon ที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงาน จะมี ความยาวคลื่นและพลังงานต่างกัน และเนื่องจากปริมาณของ Photon ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของ ธาตุนั้นในสารนั้นๆ ข้อมูลนี้จึงสามารถ นำมาวิเคราะห์หา ปริมาณของธาตุ และธาตุองค์ประกอบ ในสารตัวอย่างได้

### เครื่องเตรียมตัวอย่างที่แรงกดสูงสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF



เครื่องเตรียมตัวอย่างนี้ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ XRF โดยเตรียมตัวอย่าง ที่แรงกดที่ 20 -30 bars เป็นอย่างน้อย

## ภาคผนวก ข

### เครื่องวัดเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (X-Ray Diffraction) รุ่น D8 Advance



เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการทำการศึกษา วิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานโดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึก และจะถูกบันทึกค่าแล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นโดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของBragg

เทคนิค XRD นี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและทางด้านเคมีชีวภาพโดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ดีเอ็นเอโปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติและรวมถึงวัสดุชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น

XRD เป็นเทคนิคที่คอยเสริมเทคนิค Spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence; XRF ) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร หลักการพื้นฐาน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์,

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ  $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก



ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะไปลด Radiation Damage ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการเคลื่อนไหวของอนุภาคภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง Diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า Diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด

ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย

### ข้อดีและข้อจำกัด

เทคนิค XRD นั้นเป็นเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงาน สามารถใช้งานได้ง่าย ใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2 มิลลิกรัม) แต่เดิมนั้นแม้ว่าเทคนิคนี้จะมีข้อดีหลายอย่าง แต่ด้วยผลข้อมูลที่ช้าและในการใช้งานจำเป็นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ทำให้เทคนิคนี้ยังไม่ค่อยเป็นที่แพร่หลายมากนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

เครื่องวัดขนาดการกระจายอนุภาค (Laser Diffraction Particle Size analyzer)

ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น LS 13320



การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิคทางแสง (Optical Techniques) เป็นเทคนิคที่สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณน้อย และผลการวิเคราะห์มีความเชื่อถือได้สูง เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้หลายครั้ง ผลการทดสอบในแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน (Reproducibility) ความสามารถของเทคนิคนี้คือ สามารถวัดขนาดของอนุภาคในช่วง 0.1 – 1000 ไมครอนได้

หลักการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค โดยใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction) ซึ่งแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียมนีออน (He-Ne Gas Laser) มีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน เมื่อมีลำแสงส่องกระทบอนุภาคจะเกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งจะเป็นไปตามสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer Approximation) ที่ว่า ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่ขนาดของมุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ แต่สิ่งที่ต้องระลึกละเอมคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินช่วงความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก

## ภาคผนวก ง

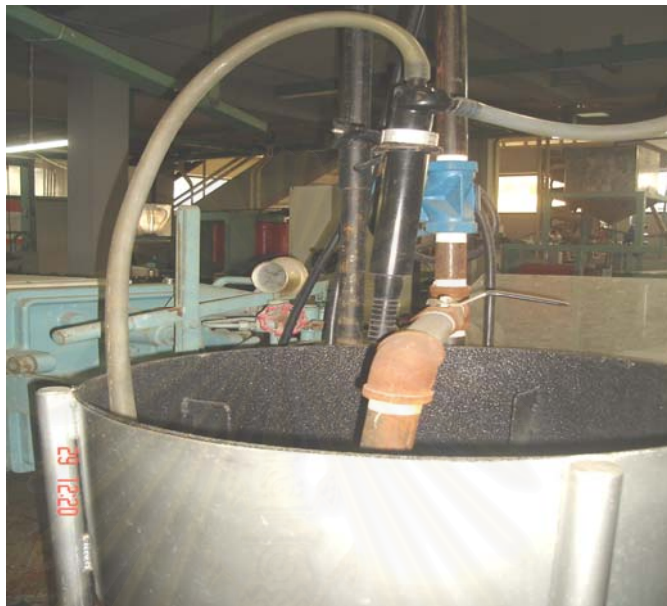
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope )  
รุ่น JSM 5800 LV

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุโดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่าจนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไปและยังมีอุปกรณ์ Energy Dispersive System (EDS) สำหรับช่วยวิเคราะห์ ธาตุองค์ประกอบของวัสดุ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณอีกด้วยใช้ในการศึกษาวัสดุได้หลายชนิดทั้งโลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และสิ่งทอ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone KREBS Model UI1763 Diameter 1 Inch)



เครื่องมือไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) คิดขึ้นมาเพื่อใช้แยก พวกแร่ กรวด หิน ดินทราย โคลน ออกจากน้ำ ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ นอกจากไฮโดรไซโคลนจะใช้แยกของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวแล้ว ยังสามารถแยกของผสมระหว่าง ของเหลวกับของเหลวเช่น น้ำกับน้ำมันดิบได้อีกด้วย รวมทั้งของแข็งที่มีขนาด และน้ำหนักต่างกัน ปัจจุบันไฮโดรไซโคลนได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี อาหารและยา ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบ แยกกรวดทรายออกจากน้ำอ้อย ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมการผลิตยีสต์ น้ำมันพืช รวมถึงการแยกสารกัดกร่อนในโรงงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### เครื่องแยกแม่เหล็กความเข้มสูงแบบเปียก (ERIEZ Wet High Intensity Magnetic Separator)



เครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ส่วนใหญ่ใช้ในการแยกแร่ติดแม่เหล็กอย่างอ่อน (Paramagnetic Mineral) ออกในแร่ไม่ติดแม่เหล็กในสภาพของเหลวหรือสารแขวนลอย เครื่องแยกรุ่นใหม่พัฒนาให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงถึง 20,000 เกาส์ ซึ่งเป็นค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของเหล็กอ่อนที่ใช้ทำเป็นเมทริกซ์ (Matrix) ในเครื่องแยก โดยใช้เมทริกซ์ที่มีรูปร่างต่างๆกัน เช่น แผ่นเหล็กรูปตาราง (Expanded Steel) แผ่นที่เป็นร่อง (Grooved Plate)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช

### เครื่องวัดความขาวสว่าง Technidyne รุ่น Colour Touch PC



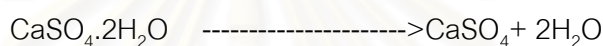
เครื่องวัดความขาวสว่าง Technidyne รุ่น Colour Touch PC เป็นเครื่องมือวัดสมบัติเชิงแสงในเชิงของความขาวสว่างใหญ่เน้นใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษโดยสามารถบอกได้ถึงค่าใกล้เคียงในด้านความสว่างความมืด โทนสีน้ำเงิน โทนสีเหลือง โทนสีแดงและโทนสีเขียว นอกจากนี้ยังสามารถบ่งบอกถึงเฉดสี ความอิ่มตัวของสี ความเหลือง (Yellowness) ความขาว (Whiteness) และความขาวสว่าง (Brithness)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ซ

#### การหาปริมาณยิปซัม (Gypsum) โดยวิธีการคำนวณน้ำผลึกที่หายไป (Combined Water)

วิธีการหาเฟสองค์ประกอบ ทำได้โดยการคำนวณน้ำผลึก (Combine by water or Crystal Water) ที่หายไป โดยนำแร่ยิปซัมไปไล่ความชื้นที่ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเข้าเตาเผาที่ อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้เย็นในตู้ไล่ความชื้น ดังแสดงในรูป 4-45 เพื่อที่จะหาน้ำผลึกและนำไปคำนวณย้อนกลับไปหาเฟสของยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) ที่มีอยู่ได้จากรสมการ เพื่อที่จะคำนวณหาเฟสองค์ประกอบของยิปซัม ดังแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ซ และรูปขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ ซ



ตารางที่ ซ แสดงเฟสองค์ประกอบของส่วนไม่ติดแม่เหล็กที่ผ่านการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลอนและเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นและความดันต่างๆกัน

การทดลอง	ก่อน เผา (กรัม)	หลัง เผา (กรัม)	น้ำ ผลึก (กรัม)	น้ำผลึก (ร้อยละ)	ปริมาณ ยิปซัม (ร้อยละ)	ซิลิกอนไดออกไซด์ และสารไม่ละลาย อื่นๆ (ร้อยละ)
1	100.00	80.64	19.36	19.36	92.50	1.02
2	101.50	81.26	20.24	19.94	95.26	0.64
3	102.30	81.44	20.86	20.39	97.42	0.51
4	101.40	81.60	19.80	19.53	93.31	0.91
5	100.50	80.25	20.25	20.15	96.28	0.63
6	102.10	81.50	20.60	20.18	96.40	0.49



### รูปที่ ๗1 การทดลองหาเฟสองค์ประกอบ โดยการเผาเพื่อหาน้ำผลึก

#### โดยที่

การทดลองที่ 1 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

การทดลองที่ 2 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

การทดลองที่ 3 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 5% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

การทดลองที่ 4 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

การทดลองที่ 5 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง

การทดลองที่ 6 คือ ส่วนไม่ติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic Product) ของส่วนหยาบ (Underflow) ในการคัดขนาดด้วยไฮโดรไซโคลนที่แรบป้อนความเข้มข้น 10% solid โดยน้ำหนักที่ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและผ่านเครื่องแยกแม่เหล็กแบบเปียกความเข้มข้นสูง



## ประวัติผู้วิจัย

นายวิชา ประกายพรรณ เกิดวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาใน ภาคปลาย ปีการศึกษา 2549 ประสบการณ์ทำงานเป็นผู้ช่วยสอนในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยวิจัยเรื่องน้ำบาดาล คลองพระยาบวรลือ จังหวัดอยุธยา ขณะนี้ศึกษาอยู่ในหลักสูตรบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาการตลาด มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร และกำลังเข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สาขาวิศวกรรมเคมี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย