การผลิตตัวเติมแอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊ส

นาย นารถพล บัวอำไพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0567-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF FILLER ANHYDRITE FROM FLUE-GAS GYPSUM

Mr. Natapol Buaumpai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2001
ISBN 974-03-0567-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตตัวเติมแอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊ส
โดย	นาย นารถพล บัวอำไพ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นารถพล บัวอำไพ : การผลิตตัวเติมแอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊ส (Production of Filler Anhydrite from Flue-Gas Gypsum) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์, 71 หน้า. ISBN 974-03-0567-9.

การสังเคราะห์แอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊ส ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (waste product) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ก่อนการสังเคราะห์ ยิปซัมฟลูแก๊สถูกทำให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นโดยการล้างด้วยไฮโดรไซโคลน ตามด้วยการชะด้วยกรดและตกตะกอน นำยิปซัมที่ผ่านการล้างแล้วไปสังเคราะห์เป็นแอนไฮไดรต์โดยกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite พบว่าภาวะการสังเคราะห์ที่ดีที่สุด คือ เผาแคลไซน์ (calcine) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง โดยใช้ยิปซัมฟลูแก๊ส (แห้ง) 200 กรัม : น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร : กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร แอนไฮไดรต์ที่ได้ต้องผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นก่อนทำเป็นกลาง เพื่อกำจัดสารประกอบของเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสีของแอนไฮไดรต์ และลดปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ทำเป็นกลางได้ 8 เท่า หลังทำเป็นกลางแอนไฮไดรต์มีลักษณะผลึกเป็นแท่ง (prismatic) ขนาดเล็ก มีขนาดเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร มีความบริสุทธิ์สูง (แอนไฮไดรต์สอง 97 เปอร์เซ็นต์) และมีค่าความขาวสว่าง (brightness) 80 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการทำกระดาษ การเติมแอนไฮไดรต์ในกระดาษ (50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) จะทำให้ความทึบแสงของกระดาษเพิ่มขึ้น การบดเยื่อที่ 6000 รอบ จะทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด ความทนแรงดันทะลุของกระดาษดีที่สุด นอกจากนั้นยังทำการศึกษาผลของการเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ในพลาสติกชนิด LLDPE และ HDPE อีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2544	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4272317123 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD : FLUE-GAS GYPSUM/ ANHYDRITE/ FILLER/ SULPHURIC ACID/ PAPER

NATAPOL BUAUMPAI : PRODUCTION OF FILLER ANHYDRITE FROM FLUE-GAS GYPSUM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUPATRA JINAWATH, Ph. D. 71 pp. ISBN 974-03-0567-9.

Anhydrite was synthesized from Flue-gas gypsum (FGD gypsum), a waste product from the Mae Moh Power Plant. FGD gypsum was precleaned by a hydrocyclone classifier, acid leaching and sedimentation, respectively. After that, the precleaned FGD gypsum was transformed to anhydrite by Semidry Acid-Anhydrite method. It was found that the optimal condition for synthesis was to calcine at 100^{O}C for 5 hours using the ratio of dried FGD gypsum : distilled water : 3 M sulphuric acid equal to 200 g : 100 ml : 100 ml, respectively. Before neutralization, the obtained anhydrite was washed with distilled water to get rid of iron compounds, which would affect its color. Consequently this also reduced the content of $CaCO_3$ neutralizer to about 8 times. After neutralization, anhydrite consisted of small prismatic crystals having an average size of 2 μm high purity (AII 97%), and high brightness (80%). In the paper processing, addition of anhydrite (50% of oven dry pulp weight) increased opacity of paper. At the optimal condition of refining pulp, 6,000 rev, mechanical properties such as tensile strength, tear strength and burst strength were maximum. Furthermore the effect of adding anhydrite to polyethylene plastics, LLDPE and HDPE was also investigated.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Materials Science	Student's signature……
Field of study Ceramic Technology	Advisor's signature……
Academic year 2001	Co-advisor's signature……..

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณ จรวย ธงไชย กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้คำแนะนำเป็นแนวทางการทำวิจัยนี้ และอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือทดสอบจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ธนากร วาสนาเพียรพงษ์ คุณวิชิต ประกายพรรณ และคุณสมพงษ์ ชุติกุลสวัสดิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณ สิรินทร ลิ่มปนาท ที่กรุณาวิเคราะห์ตัวอย่างและให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณพี่ๆทุกคน ที่ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆทุกคนที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งให้ความรัก ความเข้าใจเป็นกำลังใจ และสนับสนุนในด้านกำลังทรัพย์ ให้การศึกษากับผู้วิจัยตลอดมา จนสำเร็จการศึกษาลุล่วงลงได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฎ
สารบัญรูป.....ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....1
บทที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้น.....3
2.1 ระบบกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue-Gas Desulphurization or FGD) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....3
2.1.1 ระบบเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation System).....3
2.1.2 ระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorber System).....3
2.1.3 ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม (Gypsum Dewatering System).....5
2.2 ยิปซัมฟลูแก๊ส.....5
2.3 การล้างยิปซัมฟลูแก๊ส.....8
2.3.1 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....8
2.3.2 การชะด้วยกรดและตกตะกอน (Acid Leaching and Sedimentation).....10
2.4 กระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite.....11
2.5 ตัวเติม (Filler).....13
2.5.1 ตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ.....15
2.5.2 ตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก.....15
2.6 กระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ.....16
2.6.1 การผลิตเยื่อ (Pulping).....16
2.6.2 การเตรียมน้ำเยื่อ (Stock Preparation).....18
2.6.3 การทำแผ่นกระดาษ (Papermaking).....18
2.6.4 การปรับปรุงสมบัติกระดาษในขณะเดินแผ่น (Web Modification).....20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.5 การแปรรูปกระดาษ (Converting)..... 20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 21
3.1 วัตถุดิบและสารเคมี..... 21
3.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊ส..... 21
3.3 การศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน..... 21
3.4 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลนและการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite..... 23
3.5 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบดความเร็วสูง (Planetary Mill)..... 25
3.6 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบด Vibratory Mill..... 26
3.7 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเครื่องบด Vibratory Mill..... 26
3.8 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่ไม่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 26
3.9 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 27
3.10 การศึกษาสมบัติของพลาสติกชนิด LLDPE เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 30
3.11 การศึกษาสมบัติของพลาสติกชนิด HDPE เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 31
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 32
4.1 ผลการศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธีไฮโดรไซโคลน..... 32
4.2 ผลการศึกษาการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite..... 37
4.3 ผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบด Planetary Mill และ Vibratory Mill 44
4.4 ผลการศึกษาสมบัติของกระดาษเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 47
4.5 ผลการศึกษาสมบัติของพลาสติกเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์..... 55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....57
รายการอ้างอิง.....60
ภาคผนวก.....63
ประวัติผู้วิจัย.....71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงลักษณะจำเพาะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊ส.....6
ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนและหลังล้างด้วยวิธีชะด้วยกรดและตกตะกอน.....10
ตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite.....12
ตารางที่ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของตัวเติมแต่ละชนิด.....13
ตารางที่ 2-5 แสดงเกณฑ์มาตรฐานคุณลักษณะของดินขาวตาม มอก. 74-2529.....15
ตารางที่ 2-6 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิด Low Density Polyethylene เมื่อเติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ.....16
ตารางที่ 3-1 แสดงสูตรที่ใช้สังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite.....23
ตารางที่ 4-1 แสดงสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ.....32
ตารางที่ 4-2 แสดงปริมาณของยิปซัมที่ได้และปริมาณเถ้าลอยที่ปนอยู่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการล้างไฮโดรไซโคลน.....35
ตารางที่ 4-3 แสดงผลการศึกษาปริมาณแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำเป็นกลางโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต.....37
ตารางที่ 4-4 แสดงผลการศึกษาแอนไฮไดรต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างน้ำกลั่นแล้วทำเป็นกลาง.....38
ตารางที่ 4-5 แสดงผลความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่ได้จากน้ำล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลางและน้ำหลังทำแอนไฮไดรต์เป็นกลาง.....39
ตารางที่ 4-6 แสดงปริมาณเฟสองค์ประกอบของระบบแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต และสมบัติความขาวของแอนไฮไดรต์ที่เป็นกลาง.....41
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของแผ่นกระดาษที่เติมและไม่เติมแอนไฮไดรต์โดยผ่านการบดเยื่อด้วย PFI Mill ณ จำนวนรอบการบดต่างๆกัน.....48
ตารางที่ 4-8 แสดงผลวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของพลาสติกเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์.....55

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 แสดงกระบวนการการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ……4
รูปที่ 2-2 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ……..6
รูปที่ 2-3 แสดงภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง……7
รูปที่ 2-4 แสดงกระบวนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน……..……..8
รูปที่ 2-5 แสดงการทำงานของไฮโดรไซโคลน……9
รูปที่ 2-6 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ได้จากการไฮโดรไซโคลน……..9
รูปที่ 2-7 แผนภาพความสัมพันธ์ของ $CaSO_4$ ในระบบ $CaSO_4 . H_2SO_4 . H_2O$……..11
รูปที่ 2-8 ภาพถ่าย SEM ของผลึกแอนไฮไดรต์ที่เกิดบนอนุภาคยิปซัม……12
รูปที่ 2-9 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคแอนไฮไดรต์ที่ได้จากวิธี Semidry Acid-Anhydrite……..14
รูปที่ 2-10 แสดงภาพกระบวนการสังเคราะห์ตัวเติมชนิดแอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊สในระดับอุตสาหกรรม……..14
รูปที่ 2-11 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตกระดาษ……17
รูปที่ 2-12 แสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ…… 19
รูปที่ 2-13 แสดงการแปรรูปกระดาษ……..20
รูปที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยไฮโดรไซโคลน……22
รูปที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สและการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์โดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite…… 24
รูปที่ 3-3 แสดงขั้นตอนการทำแอนไฮไดรต์ให้เป็นกลางด้วยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต…….25
รูปที่ 3-4 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของกระดาษที่ไม่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์……..28
รูปที่ 3-5 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของกระดาษที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์……..29
รูปที่ 3-6 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพลาสติกชนิด LLDPE……30
รูปที่ 3-7 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพลาสติกชนิด HDPE……..31
รูปที่ 4-1 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของยิปซัมฟลูแก๊สเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ……..33
รูปที่ 4-2 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊ส……33

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะของเหล็กที่แยกได้จากยิปซัมฟลูแก๊สและตะกอนสีน้ำตาลแดง Overflow..... 34
รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลนในรอบต่างๆ.....34
รูปที่ 4-5 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ.....34
รูปที่ 4-6 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน.....36
รูปที่ 4-7 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ.....36
รูปที่ 4-8 แสดงลักษณะของแอนไฮไดรต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทำเป็นกลาง.....38
รูปที่ 4-9 แสดงลักษณะของผลึกที่ตกออกมาจากน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลาง.....40
รูปที่ 4-10 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของผลึกที่ตกออกมาจากน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์.....40
รูปที่ 4-11 แสดงลักษณะของแอนไฮไดรต์แต่ละสูตรที่เป็นกลางแล้ว.....41
รูปที่ 4-12 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของแอนไฮไดรต์สูตร H1A H2A และ H3A ที่ผ่านการทำเป็นกลางแล้ว..... 42
รูปที่ 4-13 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของแอนไฮไดรต์สูตร H1B H2B และ H3B ที่ผ่านการทำเป็นกลางแล้ว..... 43
รูปที่ 4-14 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อบดด้วย Planetary Mill.....45
รูปที่ 4-15 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อบดด้วย Vibratory Mill..... 45
รูปที่ 4-16 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วบดด้วย Vibratory Mill.....45
รูปที่ 4-17 ภาพถ่าย SEM ของแอนไฮไดรต์ก่อนบด.....46
รูปที่ 4-18 ภาพถ่าย SEM ของผลึกแอนไฮไดรต์ก่อนบด เมื่อทำให้กระจายตัว.....46
รูปที่ 4-19 ภาพถ่าย SEM ของแอนไฮไดรต์ที่ผ่านการบดด้วย Planetary Mill นาน 60 นาที.....46
รูปที่ 4-20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (freeness test)..... 50
รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นเสมือน (apparent density)..... 50
รูปที่ 4-22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง (tensile strength)..... 50
รูปที่ 4-23 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงดึง (tensile index)..... 51
รูปที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์การยืดตัวของกระดาษ (stretch)..... 51
รูปที่ 4-25 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงฉีกขาด (tear strength).....51

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงฉีกขาด (tear index)..... 52
รูปที่ 4-27 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงดันทะลุ (burst strength)..... 52
รูปที่ 4-28 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงดันทะลุ (burst index)..... 52
รูปที่ 4-29 แสดงผลการวิเคราะห์ความทึบแสงของกระดาษ (opacity)..... 53
รูปที่ 4-30 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของกระดาษ (ash content)..... 53
รูปที่ 4-31 แสดงลักษณะชิ้นตัวอย่างพลาสติก.....55

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันในหลายๆประเทศได้ให้ความสนใจถึงสภาพสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงได้มีการควบคุมการปล่อยมลพิษออกสู่บรรยากาศ โดยเฉพาะมลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินหรือลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมา ทำให้เกิดสภาวะฝนกรดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีระบบกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสีย (flue gas) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยกระบวนการกำจัดนี้เรียกว่า “ฟลูแก๊สดีซัลฟูไรเซชัน (flue gas desulphurization)” ซึ่งใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นตัวดูดซับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในกระบวนการนี้เองที่ทำให้เกิด “ยิปซัมฟลูแก๊ส (flue-gas gypsum)” หรือ “ยิปซัมเอฟจีดี (FGD Gypsum)” เป็นของเหลือทิ้ง (waste product) ปริมาณมาก

ในประเทศไทยที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้มียิปซัมฟลูแก๊สผลิตออกมาเป็นจำนวนมากถึงปีละประมาณ 3 ล้านตัน[1,2] ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการกำจัด ดังนั้นจึงได้มีการศึกษานำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด แต่จะมีปัญหาในเรื่องความบริสุทธิ์ของยิปซัม รูปร่างอนุภาค และสี ทำให้ยากต่อการนำมาใช้ประโยชน์

จากการศึกษาปรับปรุงสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่า การแยกเหล็ก การล้างด้วยวิธีไฮโดรไซโคลน และวิธีการชะด้วยกรดและตกตะกอน จะช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์และทำให้สีของยิปซัมฟลูแก๊สอ่อนลงได้[3,4] จึงได้นำมาใช้ผลิตเป็นแผ่นยิปซัม (gypsum board) และ พลาสเตอร์โปรเจคชันหรือพลาสเตอร์ฉาบผนัง (projection plaster) นอกจากนั้นยังสามารถนำมาสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยผ่านกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite[3,5] แอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดอนุภาคเล็กและมีสีขาว จึงน่าจะนำไปใช้เป็นตัวเติม (filler) ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น พลาสติก กระดาษ หรือสีได้

ในต่างประเทศได้มีการนำแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้จากยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติกและกระดาษแล้ว[6,7] โดยจะใช้เพื่อทดแทนตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม (talc) และดินขาว (kaolin) แต่ในประเทศไทยยังไม่มีการนำแอนไฮไดรต์มาใช้เป็นตัวเติม เพราะว่าต้องใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์สูงประมาณ 300-700 องศาเซลเซียส ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะนำยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาสังเคราะห์เป็นแอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำ และนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเติม เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการนำยิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ประโยชน์มากขึ้น

วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการปรับปรุงการล้างยิปซัมฟลูแก๊สด้วยวิธีไฮโดรไซโคลน และการชะด้วยกรดและตกตะกอน
- เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้เป็นตัวเติมและศึกษาสมบัติของแอนไฮไดรต์ที่เตรียมได้
- เพื่อศึกษาการนำตัวเติมแอนไฮไดรต์มาใช้ในการผลิตกระดาษ และพลาสติก

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สทั้งวิธีการไฮโดรไซโคลน และการชะด้วยกรดและตกตะกอน จากนั้นจะนำยิปซัมฟลูแก๊สมาสังเคราะห์เป็นแอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้น้อยที่สุด และศึกษาสมบัติของแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้ นอกจากนั้นยังทำการศึกษาการนำแอนไฮไดรต์มาใช้เป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษและพลาสติก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ลดปริมาณของเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า
- มีการนำยิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆมากขึ้น
- เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สให้ดียิ่งขึ้น
- สามารถนำไปใช้เป็นตัวเติมในระดับอุตสาหกรรมได้ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ หรือพลาสติก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ระบบการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue-Gas Desulphurization or FGD) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

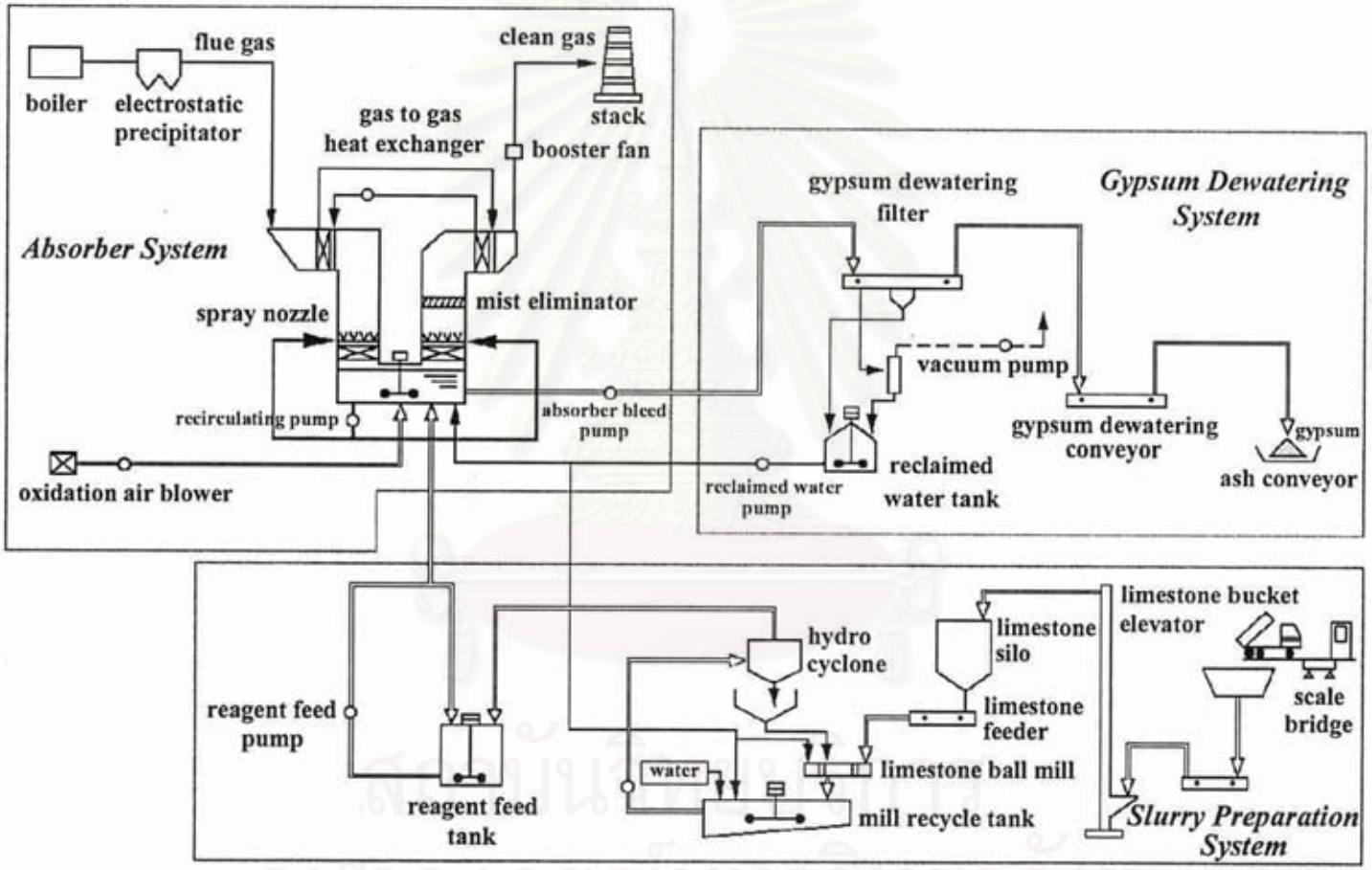
ในโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะจะมีระบบการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสีย (flue gas) ที่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงลิกไนต์ ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ โดยใช้หินปูน (calcium carbonate – $CaCO_3$) เป็นตัวดูดซับ (absorbent) ทำให้เกิดยิปซัม (calcium sulfate dihydrate – $CaSO_4.2H_2O$) ที่เรียกว่า ยิปซัมฟลูแก๊ส ในระบบเอฟจีดีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ **(รูปที่ 2-1)** แบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ๆ[3,8] คือ

2.1.1 **ระบบเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation System)** จะมีการลำเลียงหินปูนมาทำการชั่งน้ำหนัก (scale bridge) ก่อนจะถูกส่งไปเก็บในยุ้งหินปูน (limestone silo) หลังจากนั้นหินปูนจะถูกป้อนเข้าสู่โม่บด (ball mill) บดผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม จนเป็นน้ำหินปูนไหลลงสู่ถังพัก (mill recycle tank) จากนั้นน้ำหินปูน (slurry) จะถูกสูบไปยังชุดไฮโดรไซโคลนแยกขนาด (hydrocyclone) เพื่อแยกเอาขนาดที่เหมาะสมไปเก็บยังถังป้อนน้ำหินปูน (reagent feed tank) เพื่อใช้ในระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อไป ส่วนหินปูนที่ไม่ได้ขนาดจะไหลกลับไปยังโม่บดอีกครั้ง

2.1.2 **ระบบจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Absorber System)** จะประกอบด้วยอุปกรณ์จับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีลักษณะคล้ายหอคอย ด้านบนจะติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (gas to gas heat exchanger) อยู่ทั้งทางด้านเข้าและออกของอุปกรณ์จับแก๊ส หลังจากที่ผ่านเครื่องจับฝุ่น (electrostatic precipitator) แล้ว แก๊สเสียจากหม้อน้ำซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 163 องศาเซลเซียส จะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้แก๊สเสียมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 145 องศาเซลเซียส แก๊สดังกล่าวจะปะทะและคลุกเคล้ากับน้ำหินปูนที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด (nozzle) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะละลายออกจากแก๊สเสียผสมกับน้ำหินปูนตกลงมายังบ่อที่อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์จับแก๊ส สารละลายจะถูกเติมออกซิเจนด้วยเครื่อง Oxygen Air Blower เพื่อให้สารละลายเปลี่ยนเป็นยิปซัมซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดจะแบ่งเป็น 3 ขั้นดังนี้[9,10]

ขั้นที่ 1. กำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

$$SO_2\ (g) + CaCO_3\ (s) + 1/2H_2O \rightarrow CaSO_3.1/2H_2O\ (s) + CO_2\ (g)$$



รูปที่ 2-1 แสดงกระบวนการการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ[8]

ขั้นที่ 2. เปลี่ยนแคลเซียมซัลไฟต์ ($CaSO_3.1/2H_2O$) เป็น แคลเซียมไบซัลไฟต์ ($Ca(HSO_3)_2$)

$$2CaSO_3.1/2H_2O\ (s) + 2SO_2\ (g) + H_2O \rightarrow 2Ca(HSO_3)_2\ (sol)$$

ขั้นที่ 3. แคลเซียมไบซัลไฟต์ถูกออกซิไดซ์ โดยออกซิเจนได้เป็นยิปซัมฟลูแก๊ส

$$Ca(HSO_3)_2\ (sol) + O_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O\ (s) + H_2SO_4$$

กรดซัลฟูริกที่ได้สามารถทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลือได้เป็นยิปซัมฟลูแก๊สเพิ่มขึ้นดังสมการ

$$H_2SO_4 + CaCO_3\ (s) + H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O\ (s) + CO_2\ (g)$$

ปฏิกิริยารวมคือ

$$SO_2\ (g) + CaCO_3\ (s) + 2H_2O + 1/2O_2\ (g) \rightarrow CaSO_4.2H_2O\ (s) + CO_2\ (g)$$

แก๊สเสียที่ไหลออกจากอุปกรณ์จัดแก๊สจะผ่านไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียสก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2.1.3 **ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม** (Gypsum Dewatering System) ยิปซัมจากอุปกรณ์จับแก๊สจะถูกส่งไปยังเครื่องแยกน้ำซึ่งมีลักษณะเป็นสายพานและบนสายพานจะมีผ้ากรอง (gypsum dewatering filter) ส่วนใต้ของสายพานจะติดอยู่กับปั๊มสูญญากาศ เพื่อดูดน้ำให้แยกออกจากยิปซัม น้ำจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนยิปซัมจะไหลลงสู่สายพานส่ง (ash conveyor) เพื่อนำไปทิ้งหรือใช้งานต่อไป

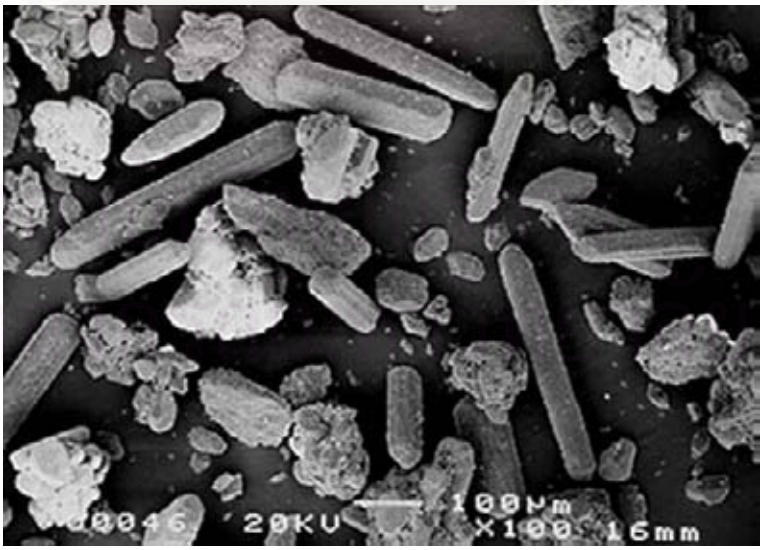
2.2 ยิปซัมฟลูแก๊ส

ยิปซัมฟลูแก๊สหรือยิปซัมเอฟจีดี (FGD gypsum) จัดเป็นยิปซัมสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวก น้ำมัน ถ่านหิน และลิกไนต์ โดยเฉพาะจากโรงไฟฟ้า ในแต่ละปีตั้งแต่ ค.ศ. 1989 ประเทศเยอรมันมีปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากข้อมูลในปี ค.ศ. 1996 ประเทศในกลุ่มยุโรปมีปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สประมาณ 8.2 ล้านตัน นอกจากนั้นประเทศอุตสาหกรรมอื่น เช่น สหรัฐอเมริกา แคนนาดา ญี่ปุ่น และไต้หวัน มีปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สรวมกันประมาณ 5.3 ล้านตัน[11] ส่วนในประเทศไทยยิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปีละประมาณ 3 ล้านตัน[1,2] และคาดการว่าในปี ค.ศ. 2000 ประเทศในกลุ่มยุโรปจะมีปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สประมาณ 14.5 ล้านตัน[12] จึงได้มีการวิจัยพัฒนาคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สให้ดีและบริสุทธิ์ขึ้นให้ได้ตามเกณฑ์คุณภาพ ดัง**ตารางที่ 2-1** ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางแร่ของยิปซัมฟลูแก๊สของแต่ละแหล่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงและสภาวะของการเผาไหม้ ในปัจจุบันยิปซัม

ฟลูแก๊สไม่จัดเป็นของเหลือทิ้ง ตามข้อกำหนดของ European Waste Catalogue (EWC) และ OECD แต่เป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์หนึ่ง[13]

ตารางที่ 2-1 แสดงลักษณะจำเพาะที่ต้องการของยิปซัมฟลูแก๊ส[3,10]

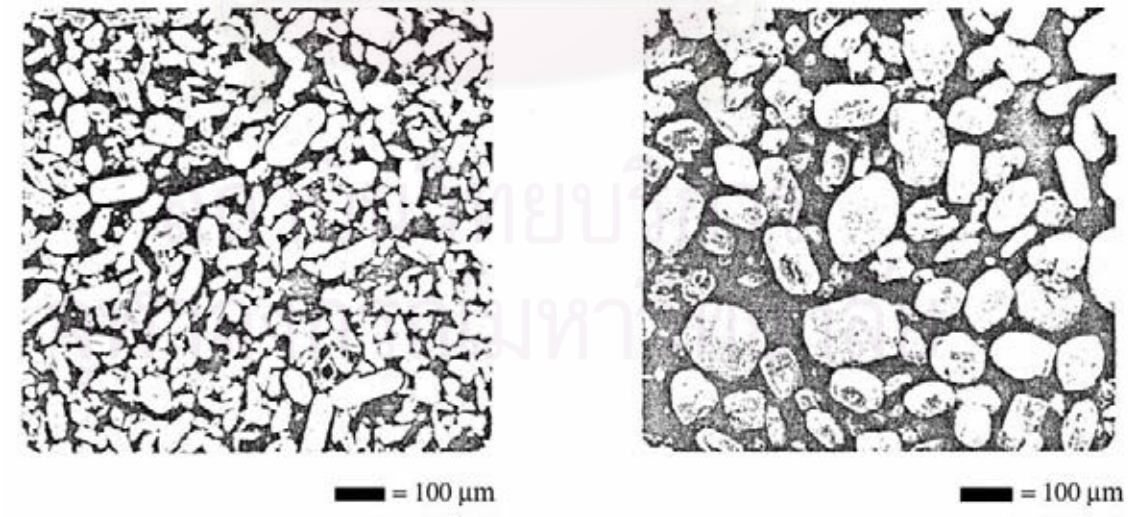
ลักษณะจำเพาะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	10
แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ร้อยละ (น้ำหนักแห้ง) มากกว่า	95
แมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ (น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.1
คลอไรด์ ร้อยละ (น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.01
โซเดียมออกไซด์ ร้อยละ (น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.06
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ร้อยละ (น้ำหนักแห้ง) ไม่เกิน	0.25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



รูปที่ 2-2 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ[4]

จากรายงานการศึกษาขนาดอนุภาคองค์ประกอบและสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่า[3,11] รูปร่างและขนาดอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊สแตกต่างกันมาก ตาม **รูปที่** 2-2 และมีความบริสุทธิ์ (ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ประมาณร้อยละ 88.5 มีสิ่งเจือปน (impurities) ต่างๆ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) เถ้าลอย (fly ash) โดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$) และสารประกอบของเหล็กซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความขาวของยิปซัมฟลูแก๊ส โดยเฉพาะผงละเอียดของเหล็กออกไซด์ที่มีสมบัติไม่ติดแม่เหล็ก (Hematite – Fe_2O_3) ไม่สามารถแยกออกด้วยเครื่องแยกเหล็ก (magnetic separator) นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อความขาวของยิปซัมฟลูแก๊สอีกคือ ปริมาณของเถ้าลอย ชนิดของตัวดูดซับ[16] และชนิดของเชื้อเพลิง[13]

ยิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดจากการใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงจะให้ความขาวน้อยกว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่เกิดจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากระยะเวลาในกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นาน จึงส่งผลให้สารเฉื่อย (inert substance) จำพวกสารประกอบของเหล็ก เข้าไปรวมอยู่ในผลึกยิปซัมได้มากขึ้น และยังส่งผลให้ขนาดผลึกยิปซัมโตขึ้นด้วย[13] ดังแสดงใน**รูปที่** 2-3 ด้วยเหตุผลต่างๆนี้ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการทำยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนยิปซัมธรรมชาติ แต่จากผลการศึกษาวิจัยต่างๆพบว่า เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สมาแยกเหล็ก ผ่านการล้างด้วยวิธีไฮโดรไซโคลน และการชะด้วยกรดและตกตะกอน จะทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสมบิติดีขึ้นทั้งด้านความขาวและความบริสุทธิ์[3,10,13,14]

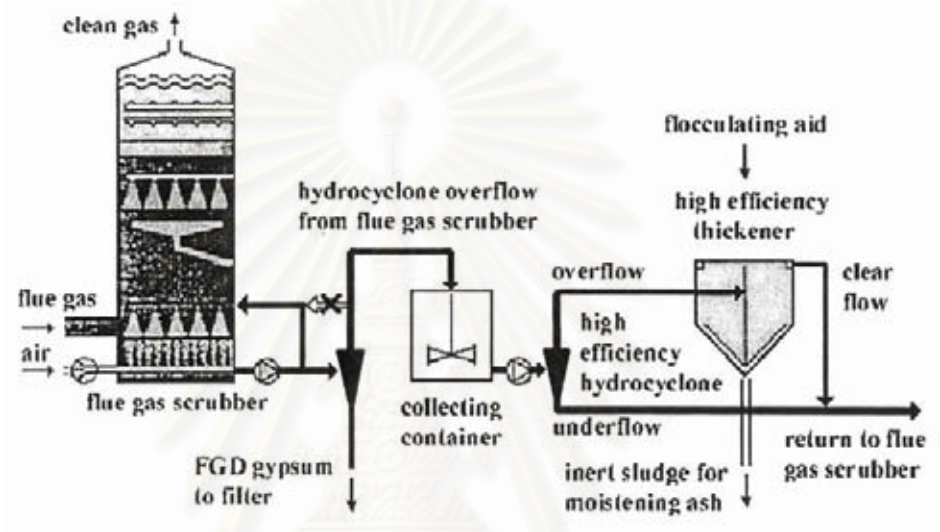


รูปที่ 2-3 แสดงภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง[13]

2.3 การล้างยิปซัมฟลูแก๊ส

การล้างยิปซัมฟลูแก๊สสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

2.3.1 **ไฮโดรไซโคลน** (Hydrocyclone) ปัจจุบันนิยมใช้วิธีนี้เนื่องจากล้างได้ปริมาณมากและต่อเนื่อง ขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สด้วยไฮโดรไซโคลนจะอยู่ก่อนการแยกน้ำออกจากยิปซัม[15] ดัง**รูปที่** 2-4

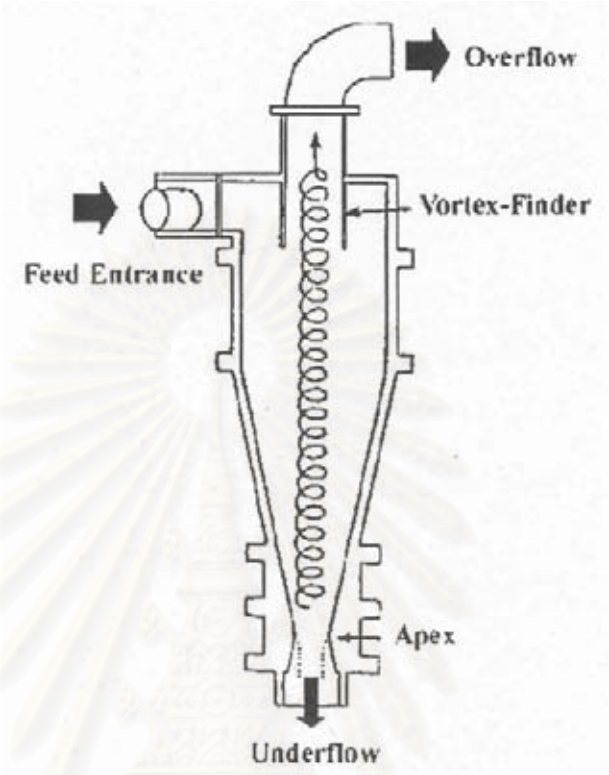


รูปที่ 2-4 แสดงกระบวนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน[15]

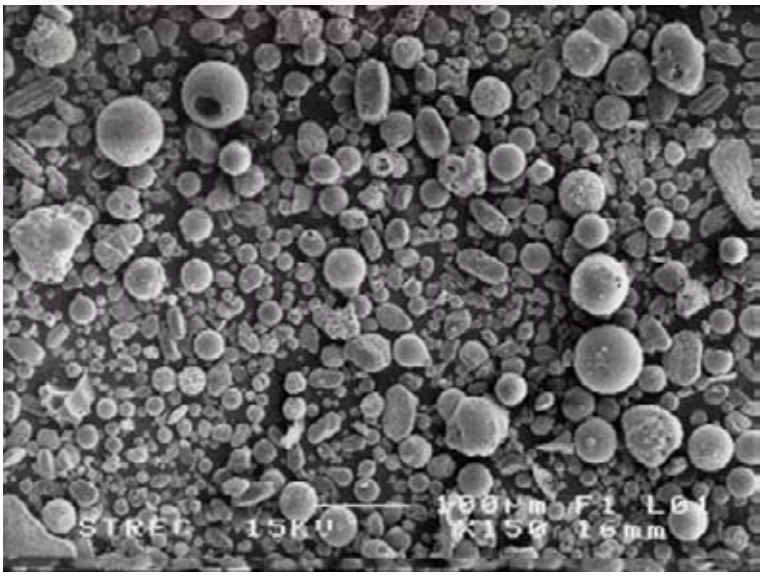
หลักการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลนคือ การใช้แรงหมุน (centrifugal force) ในการเพิ่มอัตราการตกของอนุภาค (แรงที่เกิดขึ้นในไซโคลนมี 2 แรงที่อยู่ตรงข้ามกัน คือ แรงหนึ่งเป็นแรงหมุน อีกแรงหนึ่งซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกัน คือ แรงฉุด (drag force) การแยกของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาด และความถ่วงจำเพาะของอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และความถ่วงจำเพาะสูงซึ่งตกเร็วกว่าจะวิ่งไปที่ผนังของไฮโดรไซโคลนซึ่งมีความเร็วที่ต่ำที่สุด และจะเคลื่อนตัวลงที่ Apex เป็นส่วนที่เรียกว่า “underflow” และเนื่องจากการกระทำของแรงฉุด อนุภาคที่มีขนาดเล็กและความถ่วงจำเพาะต่ำซึ่งตกช้ากว่าจะเคลื่อนตัวเข้าสู่แกนกลางซึ่งเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำ และในที่สุดก็จะถูกพาออกไปที่ Vortex-Finder เป็นส่วนที่เรียกว่า “overflow” (**รูปที่** 2-5)

จากรายงานการศึกษาวิจัย[3]พบว่า การล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลนจะทำให้ได้ยิปซัมกลับประมาณร้อยละ 92 แต่ยิปซัมที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ (เปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ประมาณร้อยละ 91 นอกจากนั้นยังช่วยแยกอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กๆ (ประมาณ 10-80 ไมโครเมตร) คือ เถ้าลอย (fly ash) ที่เกิดในลักษณะเม็ดแก้ว (glassy phase) มี

ความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ายิปซัม ดัง**รูปที่** 2-6 ทำให้สีของยิปซัมฟลูแก๊สอ่อนลง และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 50 ไมโครเมตร



รูปที่ 2-5 แสดงการทำงานของไฮโดรไซโคลน[16]



รูปที่ 2-6 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอยที่ได้จากการไฮโดรไซโคลน[3]

2.3.2 การชะด้วยกรดและตกตะกอน (Acid Leaching and Sedimentation) วิธีนี้ยังเป็นเพียงการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น การล้างวิธีนี้จะใช้กรดซัลฟูริกเพื่อไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปนมากับยิปซัมฟลูแก๊สให้เปลี่ยนเป็นยิปซัมมากขึ้น และเพื่อจะละลายเอาสารประกอบพวกเหล็ก เช่น Fe_2O_3 , Fe_3O_4 และ $Fe(OH_2)$ ออกจากยิปซัมโดยเฉพาะพวกที่เป็นคอลลอยด์ที่ไม่สามารถแยกออกด้วยเครื่องแยกเหล็ก จากนั้นจึงนำไปตกตะกอนแยกยิปซัมออก[3,4]

จากรายงานการศึกษา[3]พบว่า การล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธีชะด้วยกรดและตกตะกอนโดยนำสารละลายมาหมุนเวียนใช้อีกประมาณ 5 ครั้งจะทำให้เหล็กละลายออกมาได้มากที่สุด และทำให้ได้ยิปซัมกลับมาประมาณร้อยละ 80 ยิปซัมที่ได้มีความบริสุทธิ์มากประมาณร้อยละ 95 ซึ่งทำให้สมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สดีขึ้น ดัง**ตารางที่** 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนและหลังการล้างด้วยวิธีชะด้วยกรดและตกตะกอน[3]

	ยิปซัมฟลูแก๊ส (ก่อนล้าง)	**ยิปซัมฟลูแก๊ส(หลังล้าง)**
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)		
น้ำผลึก (Combined Water)	18.52	20.05
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ	1.79	0.55
อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ (R_2O_3)	0.90	0.32
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	32.47	32.01
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	42.30	46.36
เฟส (จากการคำนวณ, ร้อยละ)		
ยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$)	88.49	95.80
แอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$)	1.95	3.08
แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	5.08	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Laser Light Scattering, **ไมครอน**)	47.32	44.55
pH	6.62±0.46	6.93±0.26
ความถ่วงจำเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.3272±0.0065	2.3057±0.0064
สี	น้ำตาลแดง	น้ำตาลอ่อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 กระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite

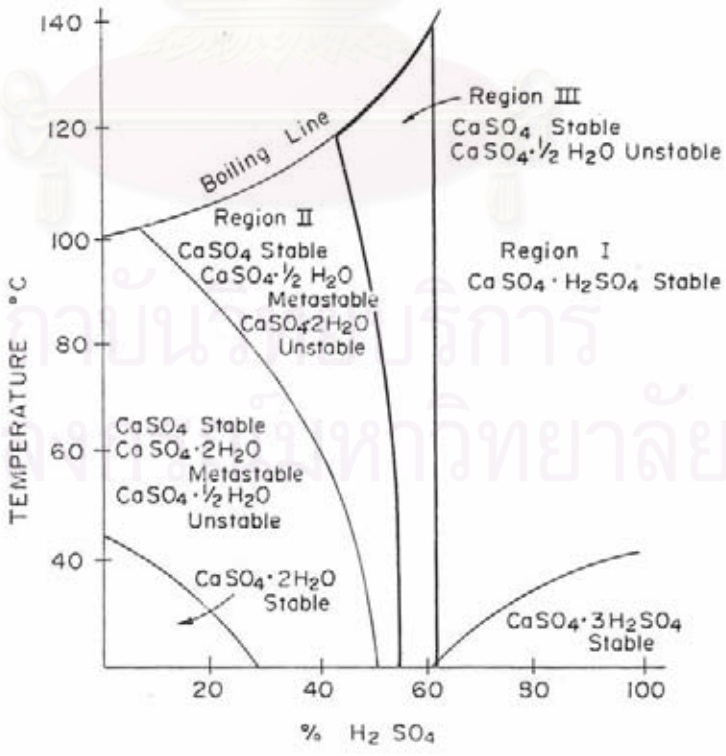
กระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite เป็นกระบวนการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ (Anhydrite – $CaSO_4$) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา[3,5,17,18] ทำให้ยิปซัมเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) ไปเป็นแอนไฮไดรต์สองได้โดยตรง ไม่ต้องเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตและแอนไฮไดรต์สามก่อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้[5]

$$CaSO_4.2H_2O\ (10\%moisture) + small\ quantity\ of\ H_2SO_4 \xrightarrow{100-200\,^{\circ}C} CaSO_4 + 2H_2O$$

ข้อดีของกระบวนการนี้คือ

- ใช้อุณหภูมิต่ำ
- ไม่ต้องเสียเวลาทำให้ยิปซัมแห้งก่อน
- ได้ผงแอนไฮไดรต์ที่ละเอียดและขาว ถ้าสภาวะเหมาะสม

ปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมในการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ ถ้าปริมาณความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและอุณหภูมิสูงเกินไปจะส่งผลให้ แอนไฮไดรต์ไม่เสถียรแล้วเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไบซัลเฟต ดัง**รูปที่** 2-7 และยังทำให้ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์ใหญ่ขึ้นด้วย[17]



รูปที่ 2-7 แผนภาพความสัมพันธ์ของ $CaSO_4$ ในระบบ $CaSO_4$. H_2SO_4 . H_2O[19]

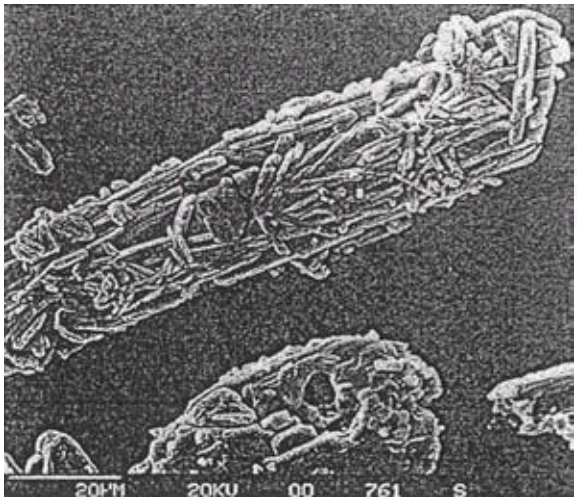
จากรายงานการศึกษาการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ด้วยวิธีดังกล่าว โดยการผสมยิปซัมฟลูแก๊สเข้ากับกรดซัลฟูริก 2 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาต่างๆกันตาม**ตารางที่** 2-3 พบว่าปริมาณแอนไฮไดรต์จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจะลดลงเมื่อเวลาที่ใช้มากขึ้น

ตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite[5]

เวลาที่ใช้(ชั่วโมง)	**เฟส (ร้อยละ)**			
	$CaSO_4.2H_2O$	$CaSO_4.1/2H_2O$	$CaSO_4$	SiO_2
1	84.9	0.9	13.5	0.6
2	51.4	1.0	46.6	1.0
3	37.8	0.7	60.4	1.0
4	18.7	0.2	80.4	0.7
24	0.1	0.0	99.4	0.5

แอนไฮไดรต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องผ่านการทำเป็นกลางก่อนโดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือ แคลเซียมคาร์บอเนต ถึงจะเหมาะนำไปทำเป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษและพลาสติก

ผลึกของแอนไฮไดรต์ที่เกิดขึ้นจะเกาะกลุ่มกันอยู่บนอนุภาคยิปซัมเดิม **(รูปที่** 2-8) โดยอนุภาคของแอนไฮไดรต์จะมีรูปร่างตั้งแต่ที่เป็นแท่ง (prismatic) จนถึงที่มีลักษณะเป็นแผ่น (plate) และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2 ไมโครเมตร[5]



รูปที่ 2-8 ภาพถ่าย SEM ของผลึกแอนไฮไดรต์ที่เกิดบนอนุภาคยิปซัม[5]

2.5 **ตัวเติม** (Filler)

ตัวเติม (filler) เป็นผงแร่ขนาดเล็ก มักจะใช้เติมในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กระดาษ พลาสติก สี กาว เป็นต้น เพื่อปรับสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น ตัวเติมที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ทัลคัม เนื่องจากมีราคาถูกนอกจากนั้นยังได้มีการทดลองนำเอายิปซัมและแอนไฮไดรต์มาใช้เป็นตัวเติมอีกด้วย ซึ่งแร่แต่ละชนิดที่กล่าวมาจะมีสมบัติดัง**ตารางที่** 2-4

ตารางที่ 2-4 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของตัวเติมแต่ละชนิด[6]

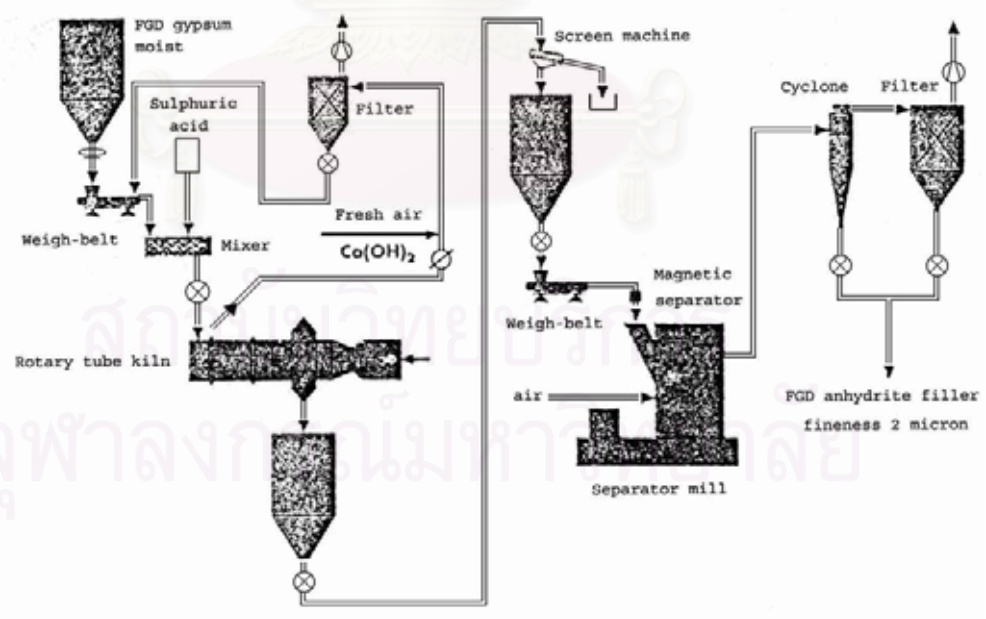
	Gypsum	Anhydrite	Calcite	Kaolin	Talc
Chemical Formula	$CaSO_4.2H_2O$	$CaSO_4$	$CaCO_3$	$Al_2O_2.2SiO_2$ $.2H_2O$	$3MgO.4SiO_2$ $.H_2O$
Density g/cm^3 (DIN ISO 787/10)	2.3	2.9	2.7	2.6	2.7
Hardness (Mohs)	1-2	3-4	3-4	1-2	1
Solubility in water at 23^{O}C g/l	2.1	2.7	0.014	insoluble	insoluble
pH value (DIN ISO 787/9)	6	6	8-9	4-6	6
Colour	white	white	white	white	white

โดยตัวเติมที่ดีควรจะมีลักษณะดังนี้[7]

- มีขนาดเล็ก ผิวเรียบ
- มีการกระจายขนาดของอนุภาคแคบ
- ความสามารถของการละลายในน้ำต่ำ
- มีสีขาว
- กระจายตัวได้ดีในตัวกลางไม่เกาะตัวกัน
- ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

จากรายงานการศึกษา[6,7]พบว่า ตัวเติมชนิดแอนไฮไดรต์สามารถสังเคราะห์ได้จากยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งแอนไฮไดรต์ที่ได้จะมีสีขาวและมีขนาดอนุภาคประมาณ 2 ไมโครเมตร (**รูปที่** 2-9) ปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวได้มีการพัฒนาขึ้นไปในระดับอุตสาหกรรม โดยจะใช้ Co-current Rotary Tube Kiln (**รูปที่** 2-10)

รูปที่ 2.9 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคแอนไฮไดรต์ที่ได้จากวิธี Semidry Acid-Anhydrite[6]



รูปที่ 2-10 แสดงภาพกระบวนการสังเคราะห์ตัวเติมชนิดแอนไฮไดรต์จากยิปซัมฟลูแก๊สในระดับอุตสาหกรรม[7]

อุณหภูมิที่ใช้ 130-170 องศาเซลเซียส หรือใช้ Counter-current Rotary Tube Kiln อุณหภูมิที่ใช้ 430-550 องศาเซลเซียส

2.5.1 **ตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ**[20,21] (หรือเรียกว่า สารเติมเต็ม) ตัวเติมในกระดาษที่นิยมใช้ ได้แก่ ดินขาว ทิทาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต จุดประสงค์ที่ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนศาสตร์และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ เช่น ดูดซับหมึกได้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกระดาษอีกด้วย เพราะตัวเติมส่วนมากจะมีราคาถูกกว่าเส้นใย ตัวเติมที่ดีควรมีขนาด 1-10 ไมโครเมตร ผงแร่ที่มีขนาดเล็กนี้เมื่อเติมลงไปจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวภายในกระดาษ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างผงแร่กับอากาศและผงแร่กับเส้นใย ทำให้เพิ่มค่าการกระเจิงแสง (light scattering) ของกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความขาวสว่างและทึบแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเติมมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยมากยังทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น แต่การเติมผงแร่ลงไปก็มีส่วนทำให้สมบัติด้านความเหนียวของกระดาษลดลงด้วย และเพิ่มความคมของแผ่นกระดาษมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการสึกหรอของเครื่องจักร

ดินขาวที่ใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ จะมีเกณฑ์มาตรฐานดัง**ตารางที่** 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงเกณฑ์มาตรฐานคุณลักษณะของดินขาวตาม มอก.74-2529

คุณลักษณะ	**เกณฑ์ที่กำหนด**
ความขาวสว่าง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	80
กากที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร ร้อยละ ไม่เกิน	0.2
ความหยาบละเอียดของดินขาว	
- ขนาดใหญ่กว่า 5 ไมโครเมตร ร้อยละ ไม่เกิน	30
- ขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ร้อยละ ไม่เกิน	50
ความคมโดยวิธีแวลเลย์ มิลลิกรัม ไม่เกิน	40
ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	3

2.5.2 **ตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก** ตัวเติมในพลาสติกมักนิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนต จุดประสงค์ที่ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มปริมาตร ทำให้ลดปริมาณพอลิเมอร์ลง ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนั้นยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและไฟฟ้าของพอลิเมอร์อีกด้วย การเติมตัวเติมลงในพลาสติกมากขึ้นจะส่งผลให้ ค่า Yield Strength และ Young's Modulus เพิ่มขึ้น แต่ค่า Elongation และค่า Ultimate Tensile Strength จะลดลง[22] ดัง**ตารางที่** 2-6

ตารางที่ 2-6 แสดงสมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิด Low Density Polyethylene เมื่อเติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างๆ[22]

$CaCO_3$ Filler Content (phr)	Ultimate Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	Elongation (%)	Young's Modulus (psi)
0	3336	485	467	27.5
10	3255	545	467	33.4
20	2563	573	483	33.6
40	1905	574	442	33.6

2.6 กระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ

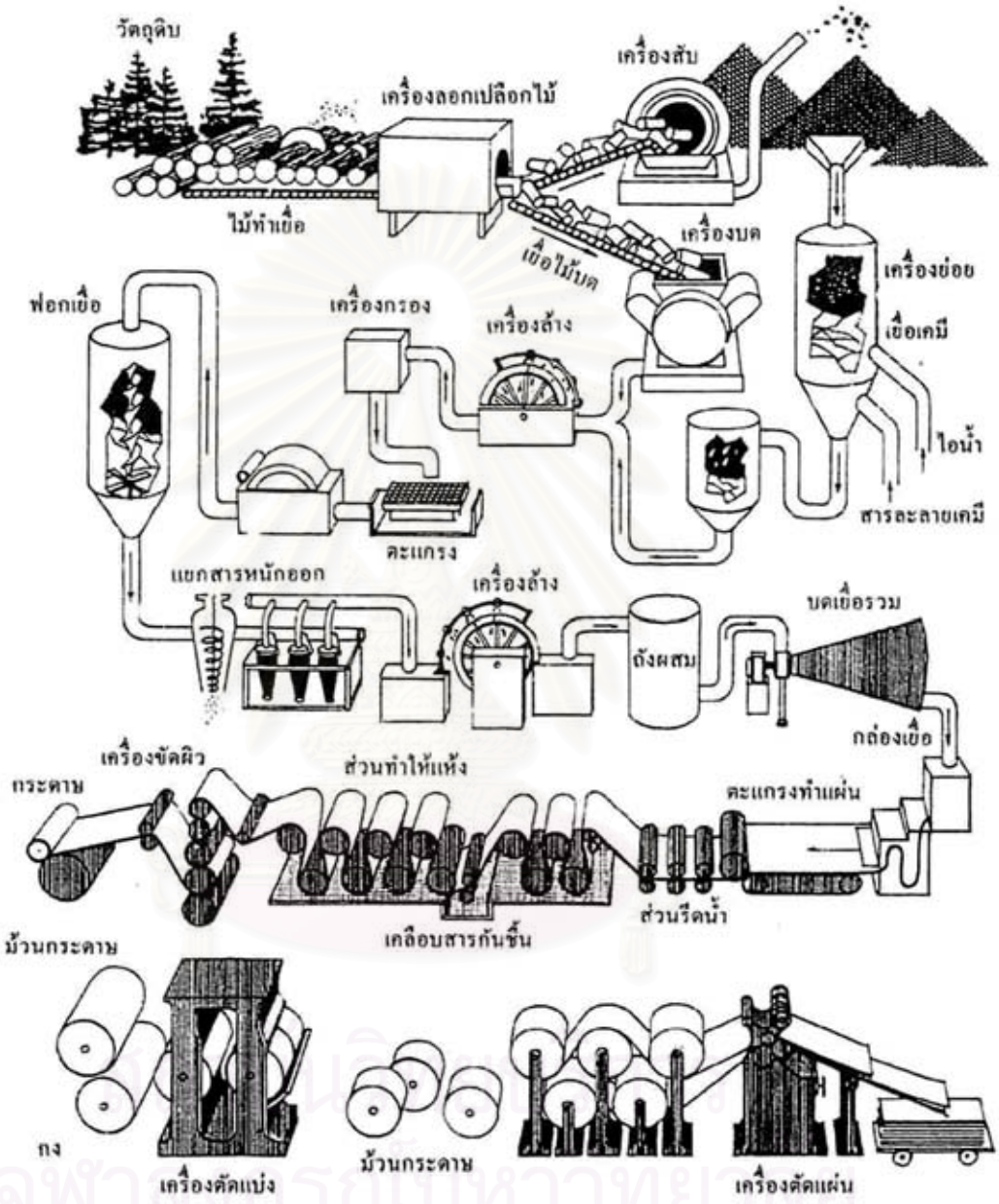
กระบวนการผลิตกระดาษสามารถแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ตามการปฏิบัติการจริงภายในโรงงานดังนี้[20] (**รูปที่** 2-11)

2.6.1 **การผลิตเยื่อ** (Pulping) วัตถุประสงค์เพื่อต้องการแยกเส้นใยออกมาจากองค์ประกอบอื่นของไม้ ในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยกรรมวิธีการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ

ก. **<u>กระบวนการผลิตเยื่อ</u>** (Pulping process)

เยื่อมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบต่างๆของพลังงานที่ใช้ ได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานเคมี และพลังงานกล แบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

- *กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล* – ใช้พลังงานกลกับพลังงานความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา เยื่อที่ได้จะมีคุณสมบัติการดูดซึมดี ทึบแสง มีความหยุ่นตัว (compressibility) แต่เยื่อไม่ค่อยแข็งแรงและไม่สว่างเหมาะสำหรับทำสิ่งพิมพ์ราคาถูก เช่น หนังสือพิมพ์ หรือใช้เป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็ง
- *กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี* – ใช้พลังงานกลกับพลังงานเคมี ในการแยกเส้นใยออกมา เยื่อประเภทนี้จะมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพปานกลางเมื่อเทียบกับเยื่อที่ได้จากวิธีทางเคมี เหมาะนำไปผลิตกระดาษพิมพ์ดีดหรือกระดาษสมุดนักเรียน
- *กระบวนการผลิตเยื่อเคมี* – ใช้พลังงานเคมีกับพลังงานความร้อน ในการแยกเส้นใยออกมา เยื่อที่ได้จะมีลักษณะนุ่มสีค่อนข้างคล้ำ เส้นใยสมบูรณ์มีความเหนียวดี เยื่อชนิดนี้มีปริมาณการใช้สูงมาก เหมาะทั้งในงานรับแรงและการสื่อสาร



รูปที่ 2-11 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตกระดาษ[21]

ข. <u>กระบวนการฟอกเยื่อ</u> (Bleaching)

เพื่อทำให้เยื่อมีสีขาวเหมาะกับการทำกระดาษเพื่อการสื่อสาร สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีดังนี้

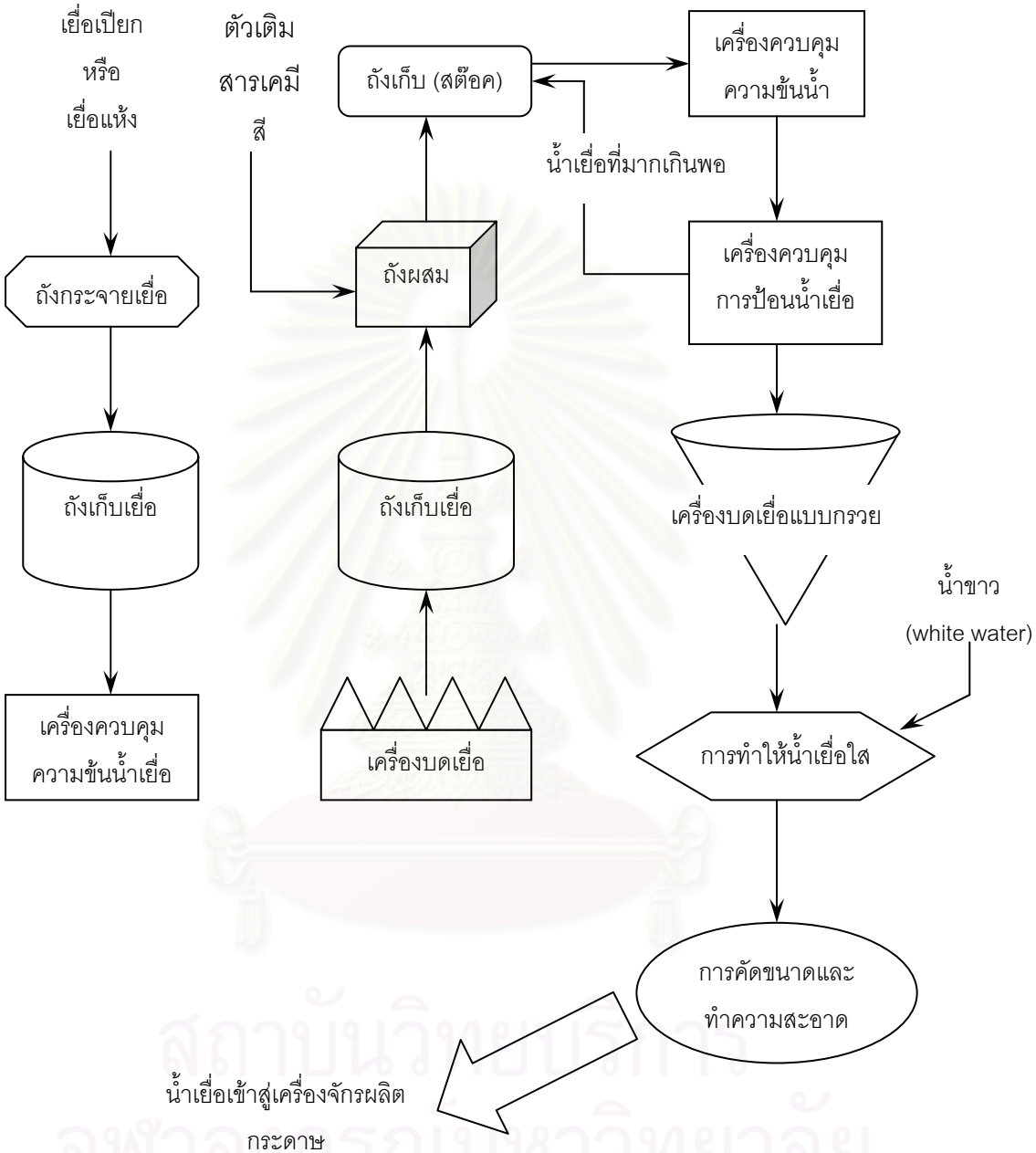
- *วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออก (Removing lignin)*
- *วิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (Bleaching lignin*)

2.6.2 **การเตรียมน้ำเยื่อ** (Stock Preparation) วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาศักยภาพของเส้นใยโดยการบดเยื่อและปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้ **(รูปที่** 2-12)

- *การกระจายเส้นใย (Defibering)* เพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นอิสระในน้ำ
- *การบดเยื่อ (Refining)* เพื่อให้เส้นใยแตกแขนงเป็นการเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใยให้สูงขึ้น
- *การผสมน้ำเยื่อ (Blending)* เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมกับเยื่อที่บดแล้วโดยผสมในถังที่มีใบพัดกวน
- *การแยกสิ่งสกปรกออก (Screening and Cleaning*) เพื่อคัดวัสดุอื่นและวัสดุที่มีขนาดใหญ่ออกจากเส้นใย
- *การควบคุมความข้นของน้ำเยื่อ (Consistency Regulator)* เพื่อควบคุมให้น้ำเยื่อมีความข้นคงที่

2.6.3 **การทำแผ่นกระดาษ** (Papermaking) น้ำเยื่อจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษเพื่อเอาน้ำออกจากกระดาษ โดยมีขั้นตอนหลัก 3 ประการดังนี้

- *การแยกน้ำออก (Draining)* มีตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรงทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก (wet sheet forming)
- *การกดน้ำออก (Pressing)* เพื่อให้เกิดการยึดติดกันแน่นระหว่างเส้นใยภายในแผ่นกระดาษ (consolidation of wet)
- *การอบกระดาษ (Drying)* เพื่อให้กระดาษแห้ง เหลือความชื้นประมาณร้อยละ

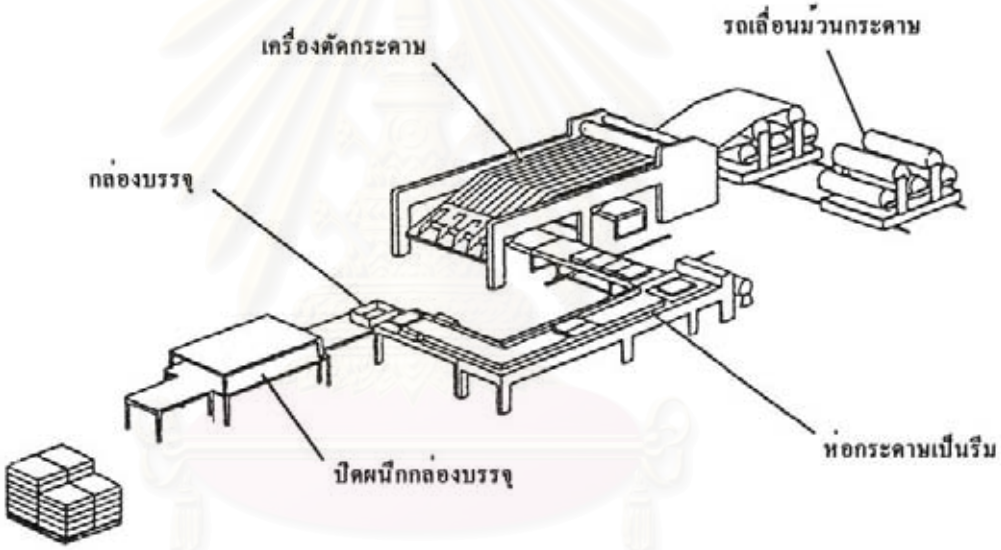


รูปที่ 2-12 แสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ[20]

2.6.4 **การปรับปรุงสมบัติกระดาษในขณะเดินแผ่น** (Web Modification) สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ

- *การปรับปรุงผิวกระดาษ* เช่น การรีดกระดาษ (calender) การฉาบผิว (surface sizing) การพิมพ์ลายนูน (embossing) เป็นต้น
- *การเปลี่ยนขนาดรูปร่างของม้วนกระดาษ* เพื่อให้เหมาะกับที่ลูกค้าต้องการ

2.6.5 **การแปรรูปกระดาษ** (Converting) เป็นการนำกระดาษม้วนไปแปรรูปเป็นแผ่นตามขนาดที่ลูกค้าต้องการ โดยใช้เครื่องตัดแบ่งม้วน เรียกว่า โฟลิโอ (folio sheeter) **(รูปที่** 2-13) แล้วจึงส่งไปห่อซึ่งแต่ละห่อจะมีจำนวนแผ่นบรรจุระบุไว้แน่นอน จึงค่อยบรรจุรวมเพื่อส่งจำหน่ายให้ลูกค้าต่อไป



รูปที่ 2-13 แสดงการแปรรูปกระดาษ[20]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% AR grade (EEC 231-639-5)
- แคลเซียมคาร์บอเนต AR grade (CARLO ERBA)
- พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide Eka PL7420) จากบริษัท กระดาษสหไทย จำกัด
- เยื่อสนชนิดพีนัสเรดิเอตา (Penus radiatar) จากบริษัท สยามวิจัยและพัฒนา จำกัด
- เม็ดพลาสติกชนิด LLDPE (L2020F) จากบริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด
- เม็ดพลาสติกชนิด HDPE (H5818J) จากบริษัท ไทยโพลิเอททีลีน จำกัด

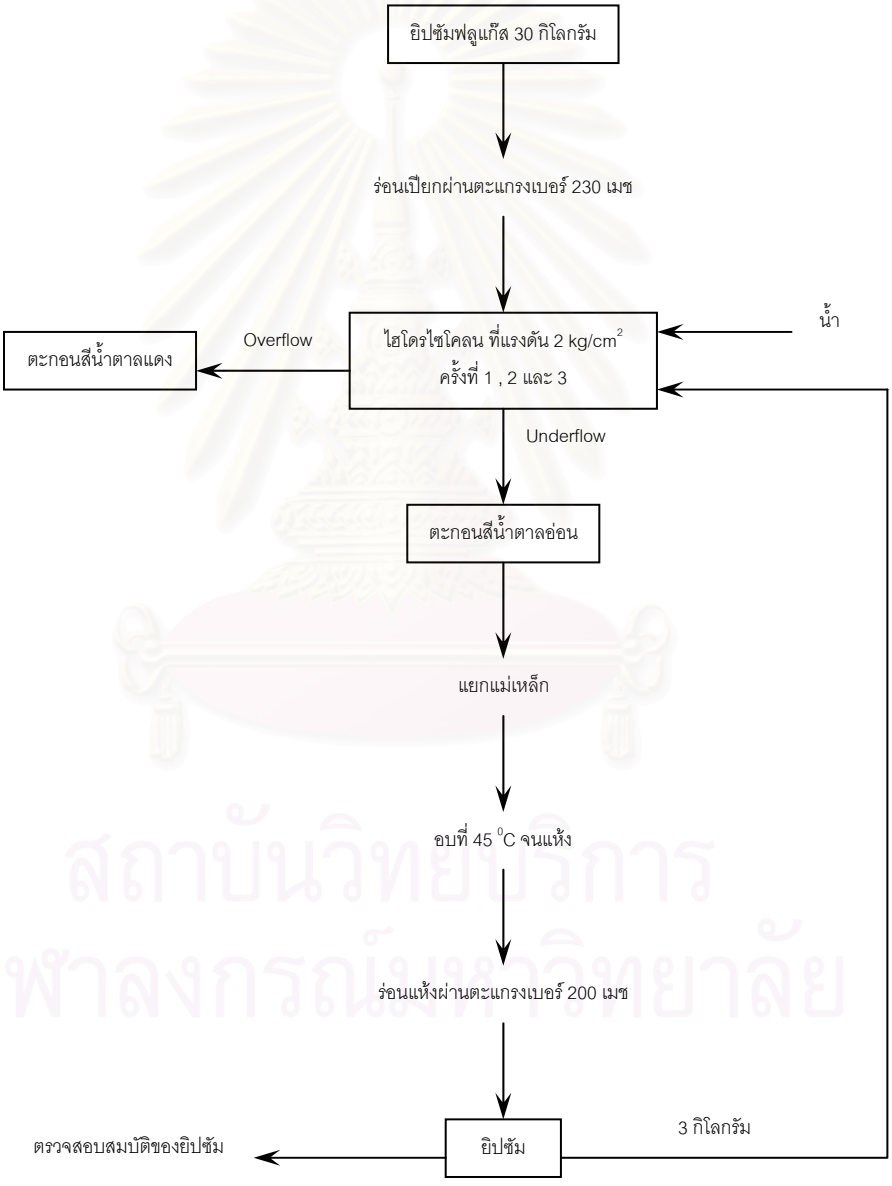
3.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊ส

สมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) จากการวิเคราะห์เคมีตามมาตรฐาน ASTM C471 แร่องค์ประกอบ (mineral phase) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (Philips PW 1730/70) ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการวัดด้วยเครื่อง pH Meter (HANNA pHep3) การกระจายขนาดอนุภาควิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer (Malvern Mastersizer S) ความถ่วงจำเพาะของยิปซัมวัดโดยใช้ Pyknometer และลักษณะรูปร่างของอนุภาคศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM 6400)

3.3 การศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน

ขั้นตอนการทดลองล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้ไฮโดรไซโคลน แสดงดัง**รูปที่** 3-1 โดยนำยิปซัมฟลูแก๊สประมาณ 30 กิโลกรัม มาร่อนเปียกผ่านตะแกรงเบอร์ 230 เมช นำยิปซัมที่ผ่านการร่อนแล้วมาผสมน้ำในอัตราส่วนยิปซัมประมาณ 1 ส่วนต่อ น้ำ 3 ส่วน แล้วป้อนเข้าเครื่องไฮโดรไซโคลน (Mozley 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว) ที่แรงดัน 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทิ้งไว้นาน 5 นาที เพื่อให้ยิปซัมกับน้ำผสมกันดี จากนั้นแยกส่วนที่เป็นตะกอนสีน้ำตาลแดง (overflow) และยิปซัม (underflow) ออกมา นำยิปซัมที่ได้มาแยกเหล็กโดยป้อนเข้าเครื่อง Magnetic

Separator แล้วจึงนำยิปซัมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนแห้ง ต่อจากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมช ได้เป็นยิปซัมที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ ต่อไปนำยิปซัมที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ มา 3 กิโลกรัม ทำวนขั้นตอนการไฮโดรไซโคลนอีกเป็นรอบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (แต่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแยกเหล็ก) ยิปซัมที่ได้จะนำไปตรวจสอบหาปริมาณเถ้าลอยที่เหลืออยู่ (ภาคผนวก ข) เปรียบเทียบการกระจายขนาดอนุภาคของยิปซัม ปริมาณยิปซัมที่ได้กลับมา และสีของยิปซัม



รูปที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยไฮโดรไซโคลน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

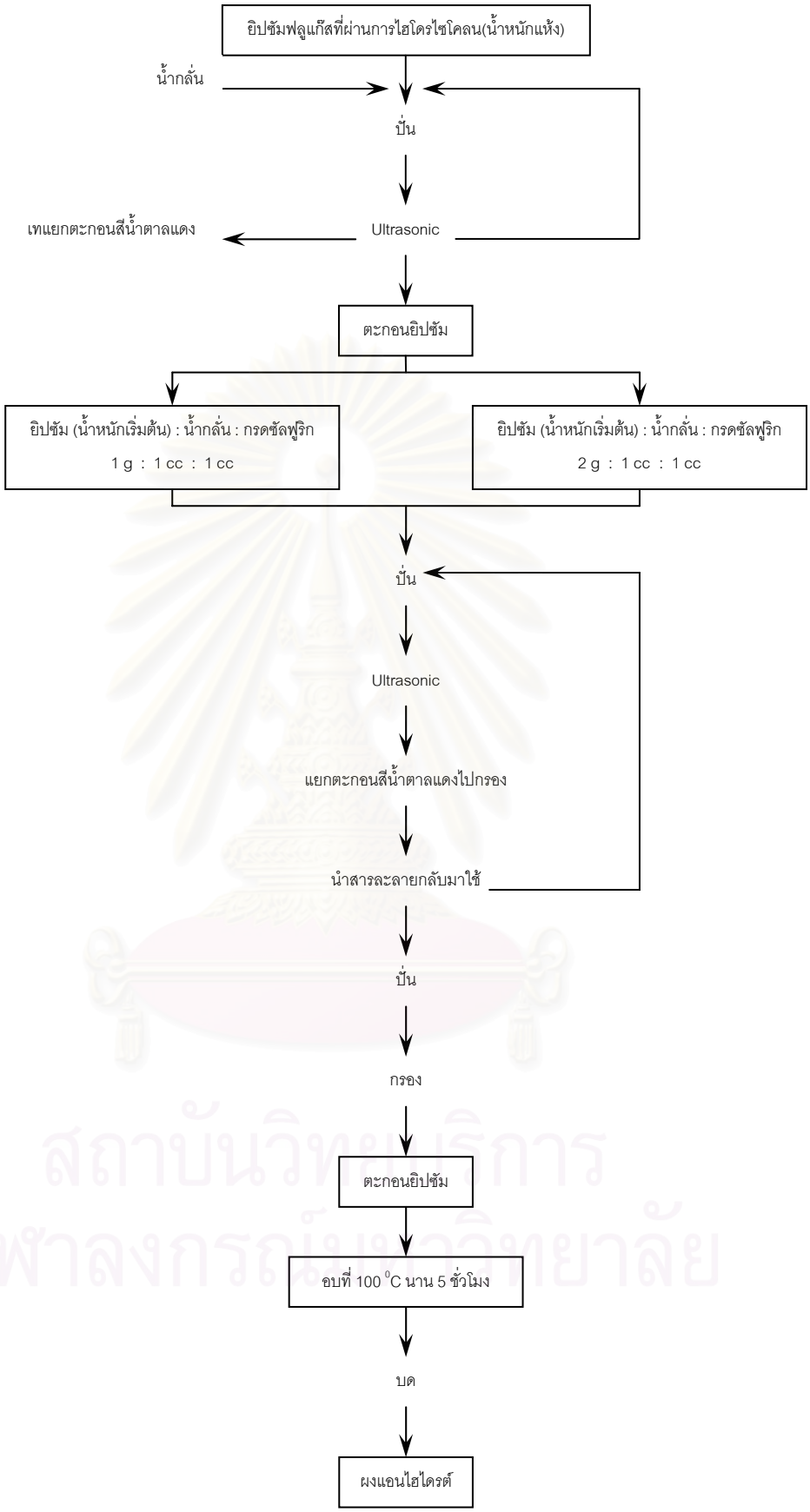
3.4 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลนและการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite

ในการทดลองนี้มีการออกแบบการทดลองสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำออกเป็นจำนวน 6 สูตร ดัง**ตารางที่** 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงสูตรที่ใช้สังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite

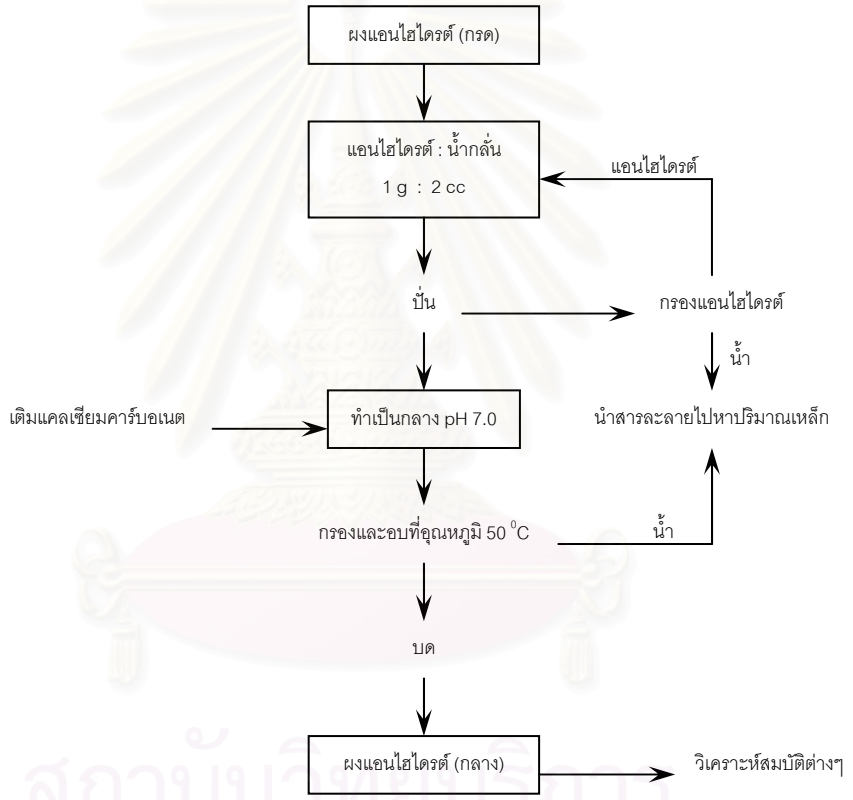
อัตราส่วนของ ยิปซัม : น้ำกลั่น : กรดซัลฟูริก 3 M	ไฮโดรไซโคลน 1 รอบ	ไฮโดรไซโคลน 2 รอบ	ไฮโดรไซโคลน 3 รอบ
100 g : 100 cc : 100 cc	H1A	H2A	H3A
200 g : 100 cc : 100 cc	H1B	H2B	H3B

ขั้นตอนต่างๆของการล้างยิปซัมฟลูแก๊สและการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์โดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite แสดงไว้ดัง**รูปที่** 3-2 โดยนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลนจากการทดลองในหัวข้อ 3.3 ซึ่งได้จากการอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนแห้ง มาชั่งตามสูตร 100 กรัมและ 200 กรัม ตามลำดับ นำยิปซัมมาเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วน น้ำหนักแห้งยิปซัม 1 กรัม ต่อน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกชั้นตะกอนสีน้ำตาลแดงที่อยู่บนสุดออก โดยการเท (decantation) ตะกอนที่แยกชั้นออก แล้วทำวนขั้นตอนเดิมอีก 2 รอบ หลังจากนั้นนำส่วนที่เป็นสีน้ำตาลอ่อนชั้นล่างซึ่งเป็นตะกอนยิปซัม มาเติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร และน้ำกลั่นตามแต่ละสูตร ปั่นผสมเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ทำปฏิกิริยากันทั่ว จากนั้นนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกแยกชั้นตะกอนสีน้ำตาลแดงออกอีกครั้ง โดยการเทตะกอนชั้นสีน้ำตาลแดงลงบนกระดาษกรอง (Whatman No.42) ซึ่งกรองแบบ Suction เพื่อนำน้ำกรดกลับมาวนล้างยิปซัมต่ออีกครั้ง ต่อมาค่อยกรองยิปซัมทั้งหมดไว้ โดยกรองแบบ Suction (โดยจะให้มีความชื้นเหลืออยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักยิปซัมเริ่มต้น) จากนั้นนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้มาบดด้วยโกร่งให้ละเอียด แอนไฮไดรต์ที่ได้จะมีความเป็นกรดอยู่สูงมากจึงต้องนำแอนไฮไดรต์มาทำให้เป็นกลางก่อน ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดัง**รูปที่** 3-3 โดยนำผงแอนไฮไดรต์แห้งที่สังเคราะห์โดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite แต่ละสูตรมาทั้งหมด มาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนแอนไฮไดรต์ 1 กรัม ต่อน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร แล้วกรองแอนไฮไดรต์ออกโดยการ Suction เก็บน้ำที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Varian AA-1275) จากนั้นนำแอนไฮไดรต์มาเติมน้ำกลั่นใน



รูปที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สและการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์โดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite

อัตราส่วนเดิม ปั่นผสมกันแล้วค่อยๆเติมแคลเซียมคาร์บอเนต และวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างด้วยเครื่อง pH Meter จนเป็นกลาง (pH=7) (เพื่อศึกษาปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ทำให้แอนไฮไดรต์เป็นกลาง) หลังจากนั้นกรองแอนไฮไดรต์ออกด้วยการ Suction แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้ง จากนั้นจึงนำไปบดด้วยโกร่งให้ละเอียด นำแอนไฮไดรต์ที่ได้มาศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะต่างๆ ได้แก่ ลักษณะรูปร่างของอนุภาค ความขาว (whiteness) ความขาวสว่าง (brightness) ความสว่าง (lightness , L^* ในระบบวัดสี CIE) โดยวัดด้วยเครื่องวัดสี (Macbeth) และปริมาณเฟสต่างๆ ของระบบแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตด้วยวิธีทางเคมี นอกจากนั้นจะทำการศึกษาปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้กลับมาทั้งก่อนและหลังทำเป็นกลาง



รูปที่ 3-3 แสดงขั้นตอนการทำแอนไฮไดรต์ให้เป็นกลางด้วยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

3.5 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบดชนิดความเร็วสูง (Planetary Mill)

การทดลองนี้เริ่มจากนำผงแอนไฮไดรต์ที่เป็นกลางมา 300 กรัม ซึ่งได้จากหัวข้อการทดลอง 3.4 โดยใช้ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ มาผสมกับกรดซัลฟูริกและน้ำกลั่นในอัตราส่วน ยิปซัม 2 กรัม ต่อ กรดซัลฟูริก 1 มิลลิลิตร ต่อ น้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร (สูตร H1B)

มาใส่หม้อบด แล้วนำเข้าเครื่องบดความเร็วสูง ใช้เวลาในการบดแบบแห้งนาน 15 30 และ 60 นาที นำแอนไฮไดรต์ที่ผ่านการบด ณ เวลาต่างๆมาตรวจสอบการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer

3.6 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบด Vibratory Mill

การทดลองนี้เริ่มจากนำผงแอนไฮไดรต์ที่เป็นกลางมา 50 กรัม ซึ่งได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4 โดยใช้ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 ครั้ง มาผสมกับกรดซัลฟูริกและน้ำกลั่นในอัตราส่วน ยิปซัม 2 กรัม ต่อ กรดซัลฟูริก 1 มิลลิลิตร ต่อ น้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร (สูตร H1B) มาใส่หม้อบดแล้วนำเข้าเครื่องบด Vibratory Mill ใช้เวลาในการบดแบบแห้งนาน 5 10 และ 15 นาที นำแอนไฮไดรต์ที่ผ่านการบด ณ เวลาต่างๆมาตรวจสอบการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer

3.7 การศึกษาผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจากเครื่องบด Vibratory Mill

การทดลองนี้มีขั้นตอนคล้ายกับการทดลองในหัวข้อ 3.6 คือใช้ผงแอนไฮไดรต์ที่มาจากสูตรเดียวกัน (H1B) แต่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบด ลงไป 5 กรัม ต่อ แอนไฮไดรต์ 50 กรัมและใช้เวลาในการบดนาน 10 และ 15 นาที จากนั้นนำแอนไฮไดรต์ที่ได้มาตรวจสอบการกระจายขนาดของอนุภาคเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบดกับหัวข้อการทดลอง 3.6

3.8 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่ไม่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่องบด PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

การทดลองนี้เริ่มจากการสุ่มฉีกแผ่นเยื่อมาหนัก 33 กรัม (หรือคิดเป็นน้ำหนักหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 กรัม) นำไปผสมกับน้ำ 800 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้อย่างน้อย 12 ชั่วโมง นำเยื่อเปียกที่ได้มาทำการกระจายเยื่อโดยการเติมน้ำให้เป็น 2 ลิตร แล้วปั่นกระจายเยื่อด้วยเครื่อง Disintegrate จนครบ 1600 รอบ จากนั้นนำเยื่อมาเจือจางความข้นโดยเติมน้ำจนเป็น 10 ลิตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (freeness test) (ภาคผนวก ค) ตามมาตรฐาน TAPPI T227 แล้วนำน้ำเยื่อที่เหลือมาเจือจางความข้นอีกโดยเติมน้ำให้เป็น 16 ลิตร และเทลงในถังที่มีใบพัดกวนผสมน้ำเยื่อ เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ที่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลานาน 60 นาที ลงไปในน้ำเยื่อ 12 กรัม (อัตราส่วนตัวเติม 1 กรัม ต่อ เยื่อ

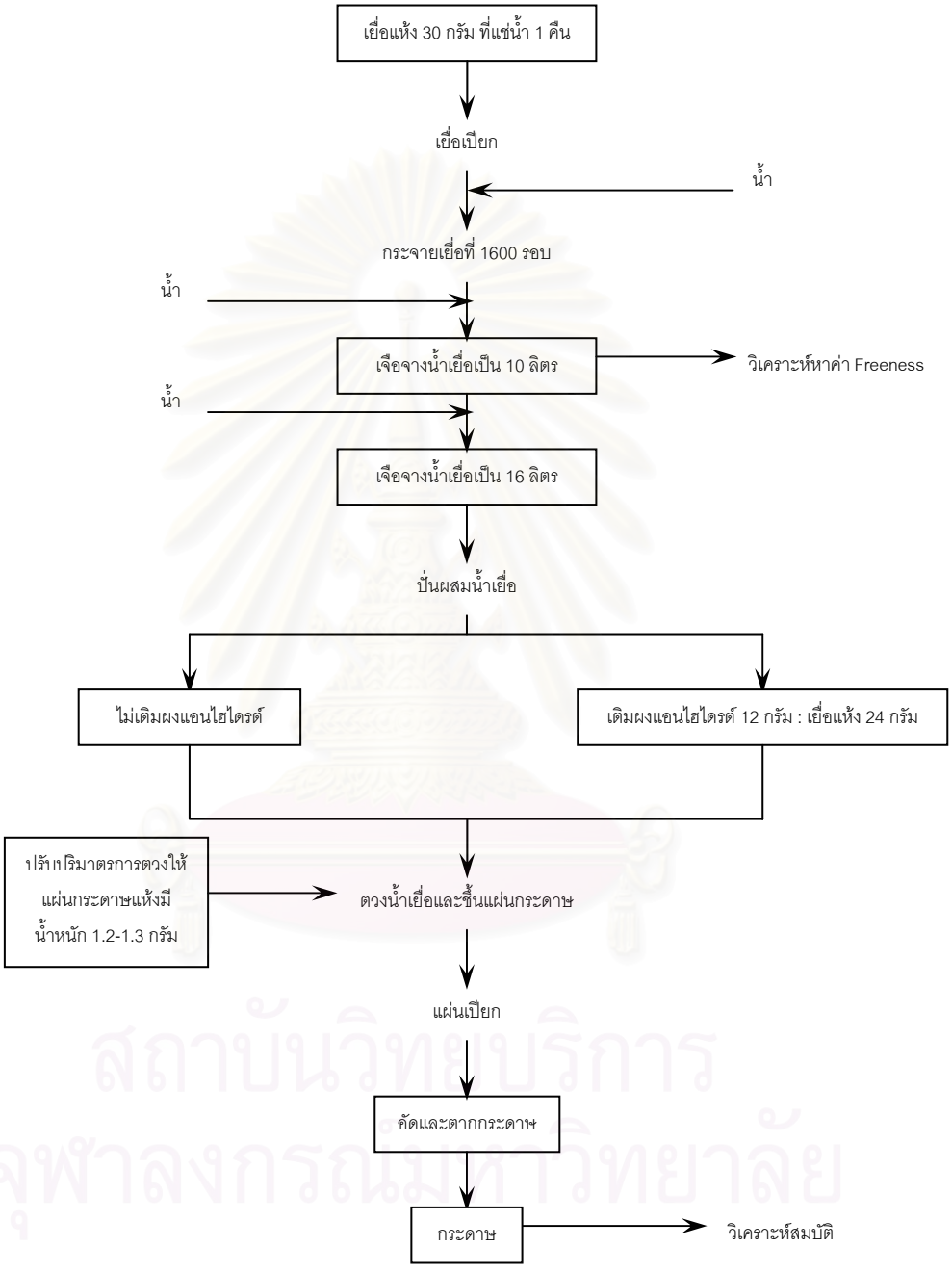
แห้ง 2 กรัม) หลังจากนั้นตวงน้ำเยื่อออกมา 800 มิลลิลิตร เพื่อทำการขึ้นแผ่นเปียกมีลักษณะเป็นแผ่นกลม โดยเทน้ำเยื่อลงในกระบอกสำหรับขึ้นแผ่นเปียกซึ่งมีตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ นำแผ่นเปียกมารีดด้วยเตารีดให้แผ่นเปียกแห้งสนิท เพื่อตรวจสอบน้ำหนักแห้งของแผ่นกระดาษว่าได้ 1.2 – 1.3 กรัมหรือไม่ เพราะว่าจะเตรียมกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน (Basic weight) 60 กรัมต่อตารางเมตร ก่อนจะขึ้นแผ่นเปียกต่อไปได้ ถ้าน้ำหนักแห้งของแผ่นกระดาษไม่ได้ตามกำหนด ต้องไปปรับปริมาตรการตวง พอได้น้ำหนักตามกำหนดแล้ว จึงขึ้นแผ่นเปียกต่ออีกอย่างน้อย 10 นำแผ่นเปียกแต่ละแผ่นมาวางบนกระดาษซับน้ำ 2 แผ่น และมีแผ่น stainless วางทับแผ่นเปียกแต่ละแผ่นอีกที แล้วเรียงซ้อนกันเป็นปึก เพื่อนำไปอัดที่ความดัน 3 กิโลกรัมต่อตารางเมตร นาน 5 นาที จากนั้นเปลี่ยนกระดาษซับน้ำเป็น 1 แผ่น และกลับด้านแผ่น stainless และอัดต่ออีกครั้งที่ความดันเดิมนาน 2.30 นาที นำแผ่น stainless ที่มีแผ่นกระดาษติดอยู่มาเรียงเข้าวงแหวนตากกระดาษ และเรียงซ้อนทับกันให้มีก้อนเหล็กทับบนสุดอีกที ตากพัดลมไว้ประมาณ 1 คืน ต่อจากนั้นนำกระดาษไปเข้าห้องควบคุมสภาวะ เพื่อปรับความชื้นของกระดาษ โดยสภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ร้อยละ 65±2 เก็บไว้นานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แผ่นกระดาษที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณการตกค้างของเถ้า (ash content) ตามมาตรฐาน TAPPI T211 ความทนแรงดึง โดยใช้เครื่องแบบ Constant Straining Rate ความทนแรงฉีกขาด โดยใช้เครื่องแบบ Elmendorf และ ความทนแรงดันทะลุ โดยใช้เครื่องแบบ Mullen เปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษที่ไม่ได้เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ ขั้นตอนต่างๆในการทดลองนี้แสดงใน**รูปที่** 3-4

3.9 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่องบด PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

สืบเนื่องจากในการทดลองหัวข้อ 3.8 มีการการตกค้างของตัวเติมน้อยมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้มีการเติมสารเพิ่มการตกค้าง (ใช้สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ ความเข้มข้น 0.065 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 6 มิลลิลิตร ในขั้นตอนการปั่นผสมน้ำเยื่อ

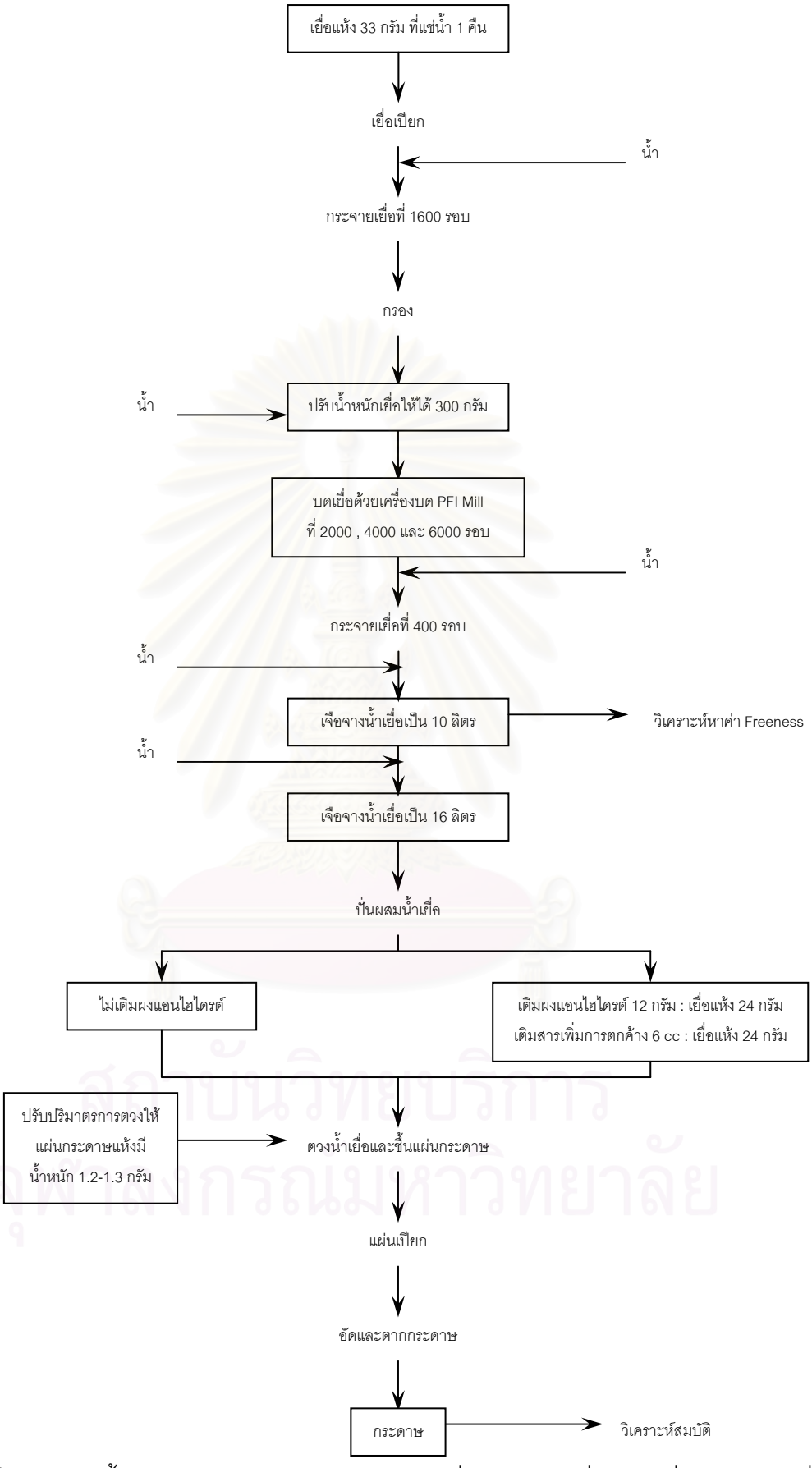
ในการทดลองนี้จะมีขั้นตอนการเตรียมกระดาษคล้ายกับการทดลองหัวข้อ 3.8 แต่จะมีขั้นตอนการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เพิ่มเข้าไปหลังจากขั้นตอนการกระจายเยื่อจนครบ 1600 รอบ โดยจะนำเยื่อที่ผ่านการกระจายตัวแล้ว มากรองด้วยวิธี Suction ปรับน้ำหนักเยื่อให้ได้ 300 กรัม เพื่อเตรียมเข้าบด PFI Mill จากนั้นนำเยื่อมาบดโดยใช้จำนวนรอบการบดต่างๆ คือ 2000 4000 และ 6000 รอบ ตามลำดับ เยื่อที่ผ่านการบดแล้ว จะถูกนำมาเติมน้ำเป็น 2 ลิตร เพื่อปั่นกระจายเยื่อจนครบ 400 รอบ หลังจากนั้นทำเหมือนกับขั้นตอนการทดลองหัวข้อ 3.8 แผ่นกระดาษที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณการตกค้างของเถ้า ความทนแรงดึง

ความทนแรงฉีกขาด ความทนแรงดันทะลุ และ ความทึบแสง โดยใช้เครื่อง ELREPHO 2000 เปรียบเทียบกับแผ่นกระดาษที่ไม่ได้เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ ขั้นตอนการทดลองนี้แสดงใน**รูปที่** 3-5



รูปที่ 3-4 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของกระดาษที่ไม่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

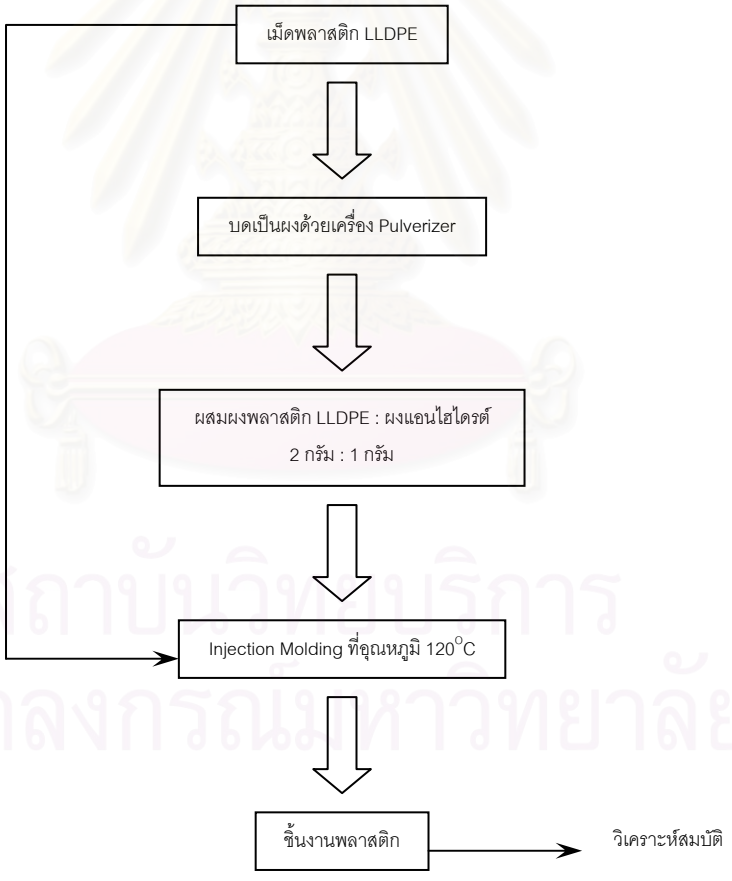
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-5 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของกระดาษที่ผ่านการบดเยื่อด้วยเครื่อง PFI Mill เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

3.10 การศึกษาสมบัติของพลาสติกชนิด LLDPE เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

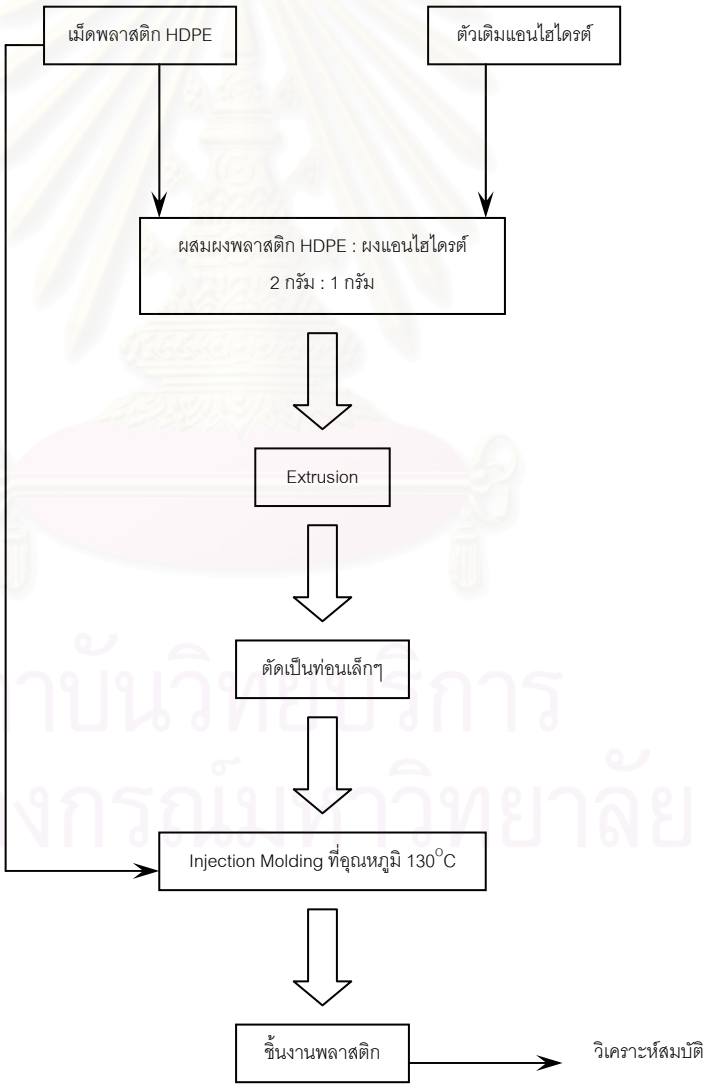
การทดลองนี้เริ่มจากนำเม็ดพลาสติกชนิด LLDPE (Linear Low Density Polyethylene) (L2020F มีความหนาแน่น 0.920 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ดรรชนีการไหล 2.0 กรัมต่อ10 นาที) มาบดเป็นผงด้วยเครื่องบด Pulverizer นำผง LLDPE 500 กรัม มาผสมกับผงแอนไฮไดรต์ 250 กรัม ใส่ในหม้อบด Ball Mill บดผสมแบบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว จากนั้นนำมาเข้าเครื่องฉีด Injection Molding อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 120 องศาเซลเซียส ฉีดพลาสติกลงในแบบโลหะ ได้ชิ้นงานเป็นรูปร่างแบบดัมเบล (dumb-bell shape) ทำประมาณ 15 ตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติความทนแรงดึง ด้วยเครื่องวัดแรงดึง (LLOYD LR 100K) ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ตัวเติมแอนไฮไดรต์ ขั้นตอนการทดลองนี้แสดงตาม**รูปที่** 3-6



รูปที่ 3-6 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพลาสติกชนิด LLDPE

3.11 การศึกษาสมบัติของพลาสติกชนิด HDPE เมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

เริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกชนิด HDPE (High Density Polyethylene) (H5818J มีความหนาแน่น 0.962 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ดรรชนีการไหล 18 กรัมต่อ 10 นาที) 1 กิโลกรัม มาผสมกับผงแอนไฮไดรต์ 500 กรัม โดยนำเข้าเครื่อง Extruder (Single Screw Extruder) เพื่อทำการผสมตัวเติมกับเม็ดพลาสติกให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว อุณหภูมิที่ใช้ 180 องศาเซลเซียส นำเส้นพลาสติกที่ถูกฉีดออกมา มาตัดเป็นท่อนเล็กๆ แล้วนำเข้าเครื่องฉีด Injection Molding อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 130 องศาเซลเซียส ฉีดพลาสติกลงในแบบโลหะ ชิ้นงานที่ได้จะมีรูปร่างแบบดัมเบล ทำประมาณ 15 ตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติความทนแรงดึงเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ตัวเติมแอนไฮไดรต์ ขั้นตอนการทดลองนี้แสดงดัง**รูปที่** 3-7



รูปที่ 3-7 แสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพลาสติกชนิด HDPE

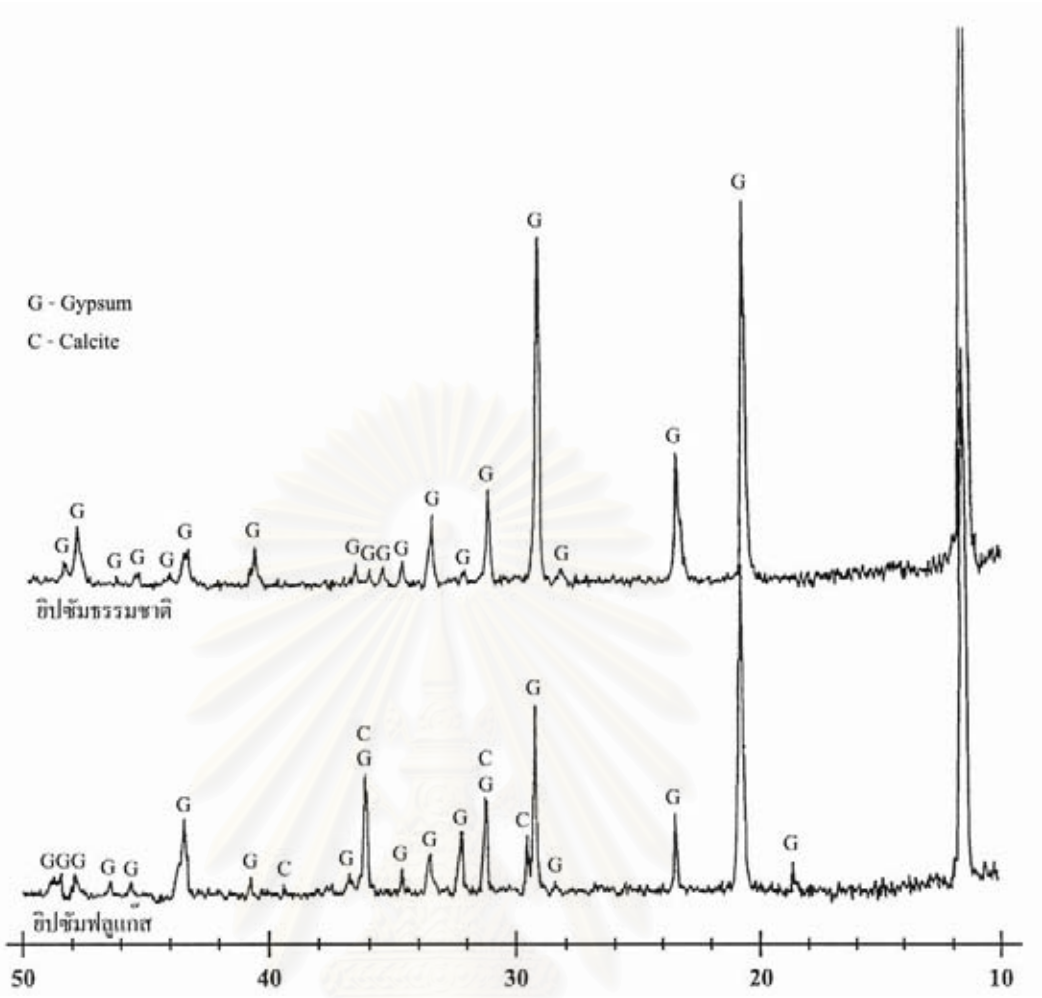
บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธีไฮโดรไซโคลน

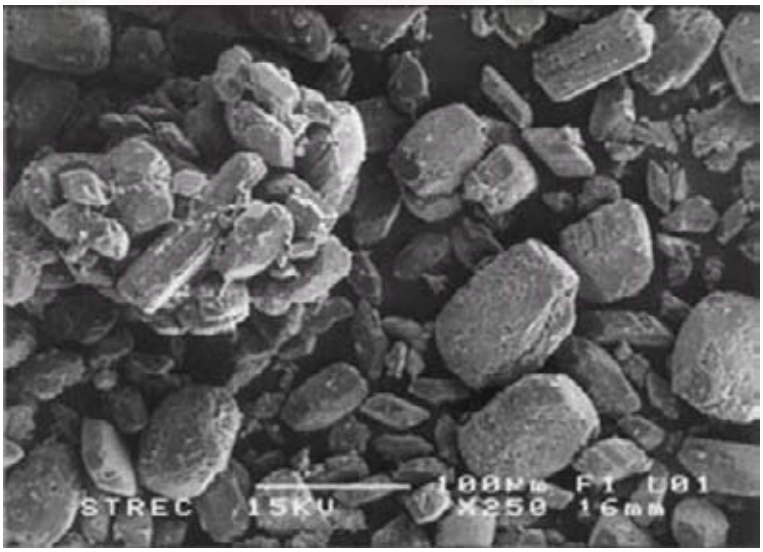
ตารางที่ 4-1 แสดงสมบัติและลักษณะเฉพาะของยิปซัมฟลูแก๊สเปรียบเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ

สมบัติและลักษณะเฉพาะ	ยิปซัมฟลูแก๊ส	ยิปซัมธรรมชาติ
ความชื้น (ร้อยละ)	14.73±0.18	-
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)		
- น้ำผลึก (Combined water)	18.52	19.87
- ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ	1.79	0.36
- อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ (R_2O_3)	0.90	0.28
- แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	32.47	32.51
- ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	42.30	45.70
เฟส (จากการคำนวณ, ร้อยละ)		
- ยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$)	88.49	94.94
- แอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$)	1.95	2.63
- แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)	5.08	0.90
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	47.32	-
ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง pH	6.62±0.46	7.13±0.10
ความถ่วงจำเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	2.3272±0.0065	2.3355±0.0047
สี	น้ำตาลแดง	ขาว

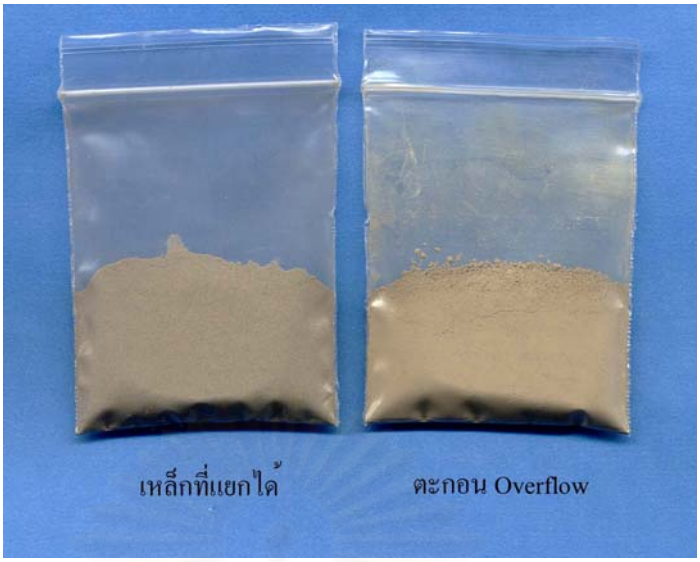
จาก**ตารางที่** 4-1 จะพบว่า ยิปซัมฟลูแก๊สมีสิ่งเจือปน เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ ปนอยู่เป็นจำนวนมากกว่ายิปซัมธรรมชาติ โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสีของยิปซัมฟลูแก๊ส[3,14] และจากการวิเคราะห์เฟสจะพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีปริมาณความบริสุทธิ์ของยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) น้อยกว่ายิปซัมธรรมชาติ นอกจากนั้นยังพบแคลเซียมคาร์บอเนตปนมาด้วย เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับ ด้วยเหตุนี้ทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีแคลเซียมคาร์บอเนตปนมากกว่ายิปซัมธรรมชาติถึงร้อยละ 5 ตามผลการวิเคราะห์ XRD ดัง**รูปที่** 4-1 ที่พบเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนต



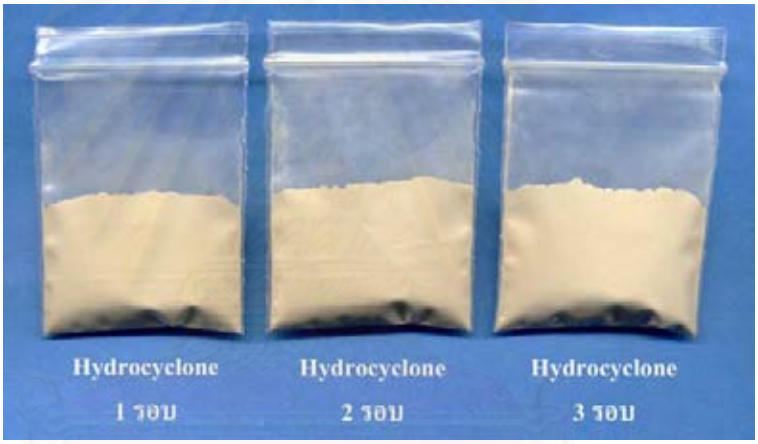
รูปที่ 4-1 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของยิปซัมฟลูแก๊สเทียบกับยิปซัมธรรมชาติ



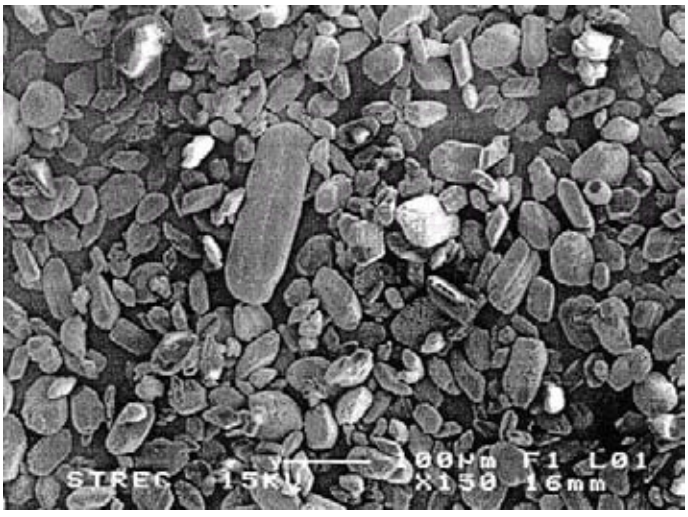
รูปที่ 4-2 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊ส



รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะของเหล็กที่แยกได้จากยิปซัมฟลูแก๊สและตะกอนสีน้ำตาลแดง Overflow



รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลนในรอบต่างๆ



รูปที่ 4-5 ภาพถ่าย SEM ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ

ยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการล้างด้วยวิธีไฮโดรไซโคลน จะมีสีน้ำตาลแดงและมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก มาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ดัง**รูปที่** 4-2 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำยิปซัมฟลูแก๊สมาผ่านการไฮโดรไซโคลนก่อนเพื่อกำจัดตะกอนสีน้ำตาลแดงโดยส่วนใหญ่มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าอนุภาคเหล่านี้เป็นอนุภาคของเถ้าลอย[3](fly ash) นอกจากนั้นเพื่อทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สบริสุทธิ์ขึ้นต้องนำยิปซัมไปผ่านการแยกเหล็กด้วยการใช้แม่เหล็กดูดออกจะมีลักษณะดัง**รูปที่** 4-3 โดยใช้เครื่องแยกเหล็ก (Magnetic Separator) ซึ่งเหล็กที่แยกออกนี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Magnetite (Fe_3O_4) และ Hematite (Fe_2O_3) เป็นส่วนน้อย เพราะว่าเหล็กออกไซด์จะส่งผลกระทบต่อสีของยิปซัม ดังนั้นการใช้แม่เหล็กดูดก็เป็นวิธีหนึ่งที่แยกเหล็กที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ออกได้ แต่ก็จะมีเหล็กบางส่วนที่มีขนาดเล็กมากๆจะไม่สามารถแยกออกโดยการใช้แม่เหล็กดูดออกได้

ในการศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยใช้วิธีไฮโดรไซโคลนที่แรงดัน 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นจำนวน 1 2 และ 3 รอบ พบว่าตะกอนสีน้ำตาลแดงจะออกมาในส่วน Overflow (**รูปที่** 4-3) และในส่วน Underflow จะเป็นยิปซัม และเมื่อผ่านกระบวนการแยกเหล็กแล้วยิปซัมที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อนดัง**รูปที่** 4-4

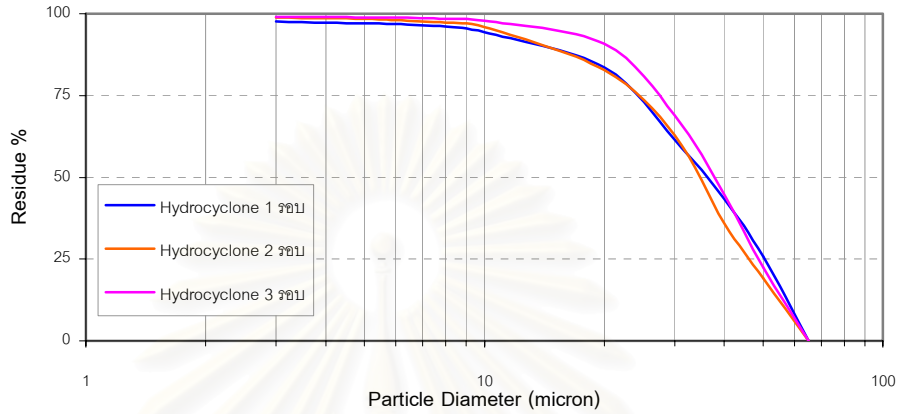
ตารางที่ 4-2 แสดงปริมาณของยิปซัมที่ได้และปริมาณเถ้าลอยที่ปนอยู่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการล้างไฮโดรไซโคลน

จำนวนรอบการล้างไฮโดรไซโคลน ที่แรงดัน 2 kg/cm^2 (รอบ)	**ปริมาณยิปซัมที่ได้ (ร้อยละ)**	**ปริมาณเถ้าลอยที่ปนอยู่ (ร้อยละ)**
1	92.27	1.02
2	80.36	0.86
3	74.58	0.67

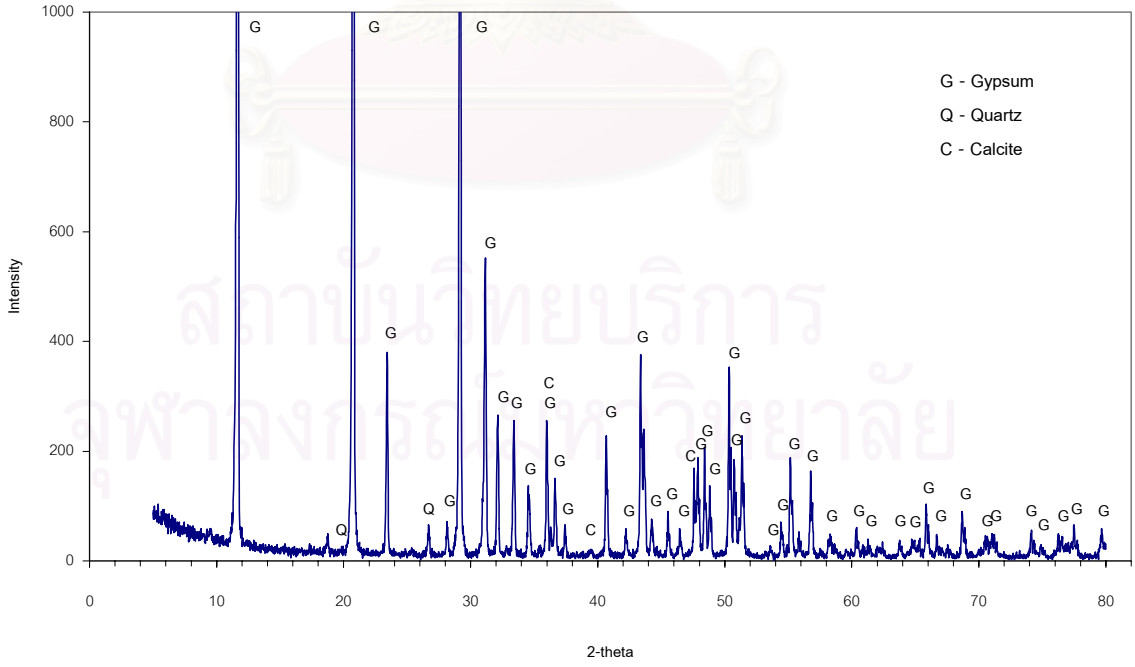
จาก**ตารางที่** 4-2 และ **รูปที่** 4-4 พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 3 รอบ สีของยิปซัมจะอ่อนลง เนื่องจากตะกอนสีน้ำตาลแดงถูกกำจัดออกไปมากขึ้นและอนุภาคยิปซัมก็ไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน ตามภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (**รูปที่** 4-5) แต่ปริมาณยิปซัมที่ได้กลับมาก็จะลดลงตามไปด้วย

จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค (**รูปที่** 4-6) เมื่อเพิ่มรอบการไฮโดรไซโคลน จะเห็นได้ชัดว่าขนาดอนุภาคในช่วงต่ำกว่า 10 ไมโครเมตรลดลง โดยขนาดอนุภาคในช่วงนี้ส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดง ซึ่งพบว่าตะกอนเหล่านี้จะเป็นอนุภาคของเถ้าลอย[3] และ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าลอย (**ตารางที่** 4-2) จะเห็นได้ว่ายังมีเถ้าลอยปนอยู่บ้างร้อยละ 0.67 แม้จะไฮโดรไซโคลนไปแล้ว 3 รอบ ดังผลการวิเคราะห์ XRD (**รูปที่** 4-7) ซึ่งจะพบเฟสควอทซ์ (SiO_2) และแคลไซต์ ($CaCO_3$) ปนอยู่



รูปที่ 4-6 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 4-7 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการไฮโดรไซโคลน 1 รอบ

4.2 **ผลการศึกษาการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี** Semidry Acid-Anhydrite

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการศึกษาปริมาณแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำเป็นกลางโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต

	H1A	H2A	H3A	H1B	H2B	H3B
ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้หลังอบ 100^{O}C 5 ชม. (กรัม)	78.79	79.56	79.23	159.53	158.74	159.81
ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้หลังทำเป็นกลาง (กรัม)	73.38	74.15	74.51	151.00	150.56	150.85
ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้หลังอบ 100^{O}C 5 ชม. (ร้อยละ)	78.79	79.56	79.23	79.77	79.37	79.91
ปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้หลังทำเป็นกลาง (ร้อยละ)	73.38	74.15	74.51	75.50	75.28	75.43
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ (g/100g แอนไฮไดรต์)	0.63	0.63	0.63	0.31	0.31	0.31

จาก**ตารางที่** 4-3 ปริมาณร้อยละแอนไฮไดรต์ที่ได้ก่อนและหลังทำเป็นกลางโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในแต่ละสูตรจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่า การไฮโดรไซโคลนและการชะด้วยกรดเพื่อล้างยิปซัมฟลูแก๊ส จะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณแอนไฮไดรต์ที่ได้และเมื่อใช้ร่วมกันจะทำให้ได้แอนไฮไดรต์กลับมาเฉลี่ยประมาณ 79.44 ต่อยิปซัม 100 กรัม(ก่อนทำเป็นกลาง) ส่วนหลังทำเป็นกลางจะมีปริมาณแอนไฮไดรต์หายไปบางส่วนเนื่องจากการล้างแอนไฮไดรต์ด้วยน้ำกลั่นก่อน 1 รอบ ทำให้มีแอนไฮไดรต์บางส่วนติดกระดาษกรองไป ส่วนปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ทำเป็นกลางจะต่างกันโดยสูตรที่ใช้อัตราส่วนยิปซัมฟลูแก๊ส : น้ำกลั่น : กรดซัลฟูริก เท่ากับ 100 กรัม : 100 มิลลิลิตร : 100 มิลลิลิตร (สูตร A) จะใช้ปริมาณมากกว่าสูตรที่ใช้อัตราส่วนยิปซัมฟลูแก๊ส : น้ำกลั่น : กรดซัลฟูริก เท่ากับ 200 กรัม : 100 มิลลิลิตร : 100 มิลลิลิตร (สูตร B) เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากก่อนการทำเป็นกลางจะล้างแอนไฮไดรต์ด้วยน้ำกลั่นก่อน 1 รอบ ทำให้ค่าความเป็นกรดของแอนไฮไดรต์ลดลงจาก pH 1.5 ไปเป็น pH 3.5 ทุกสูตร การที่ค่าความเป็นกรดลดลงเท่ากันทุกสูตร เพราะว่าอัตราส่วนของน้ำกลั่นในการล้างจะเทียบกับปริมาณแอนไฮไดรต์ในอัตราส่วนแอนไฮไดรต์ 1 กรัมต่อน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร เพราะฉะนั้นปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ทำเป็นกลางจึงเท่ากัน คือ 0.5 กรัม พอเทียบกับปริมาณแอนไฮไดรต์เริ่มต้นก่อนทำเป็นกลาง 100 กรัม ทำให้สูตร B ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตน้อยกว่า สูตร A

ในขั้นตอนการทำเป็นกลางจะมีการล้างแอนไฮไดรต์ด้วยน้ำกลั่น 1 รอบ ก่อนการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ถ้าไม่มีการล้างแอนไฮไดรต์ก่อนจะส่งผลต่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำแอนไฮไดรต์ให้เป็นกลาง และสีของแอนไฮไดรต์หลังจากเป็นกลางแล้ว ดัง**ตารางที่** 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการศึกษาแอนไฮไดรต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างน้ำกลั่นแล้วทำเป็นกลาง

	H1B **(ผ่านการล้างน้ำกลั่น)**	H1B **(ไม่ผ่านการล้างน้ำกลั่น)**
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำให้แอนไฮไดรต์เป็นกลาง (g/100g แอนไฮไดรต์)	0.31	2.50
สี	ขาว	ขาวปนเหลือง

จาก**ตารางที่** 4-4 แอนไฮไดรต์ที่ผ่านการล้างน้ำกลั่นก่อนจะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตน้อยกว่าถึง 8 เท่า เพราะว่าน้ำกลั่นได้ล้างกรดออกไปแล้วส่วนหนึ่ง ความเป็นกรดเริ่มต้นจึงมีค่า pH = 3.5 ซึ่งค่า pH เดิมคือ 1.5 และทำให้สีของแอนไฮไดรต์ขาวขึ้นดัง**รูปที่** 4-8

รูปที่ 4-8 แสดงลักษณะของแอนไฮไดรต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทำเป็นกลาง

จาก**รูปที่** 4-8 แอนไฮไดรต์หลังจากทำเป็นกลางโดยที่ไม่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นจะมีสีขาวปนเหลือง เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดจากตอนชะยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริกทำให้มีเหล็กละลายออกมา[3] ซึ่งน่าจะมีเหล็กบางส่วนปนมากับแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้จาก

กระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite พอผ่านการทำเป็นกลางทำให้เหล็กที่ปนอยู่เปลี่ยนรูปไม่สามารถละลายได้ในน้ำ ซึ่งอาจจะเกิดเป็นเหล็กซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) ซึ่งมีสีเหลือง[24] จึงได้นำน้ำจากการล้างแอนไฮไดรต์ก่อนและหลังทำเป็นกลางมาตรวจหาปริมาณธาตุเหล็ก โดยใช้ Atomic Absorption Spectrophotometer ดังแสดงใน**ตารางที่** 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงผลความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่ได้จากน้ำล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลาง **และน้ำหลังทำแอนไฮไดรต์เป็นกลาง**

สูตร	**ความเข้มข้นของธาตุเหล็กจากน้ำล้างแอนไฮไดรต์** (ppm)	
	ก่อนทำเป็นกลาง	หลังทำแอนไฮไดรต์เป็นกลาง
H1A	51.67	ไม่มี
H2A	51.19	ไม่มี
H3A	51.56	ไม่มี
H1B	38.04	ไม่มี
H2B	44.26	ไม่มี
H3B	56.89	ไม่มี

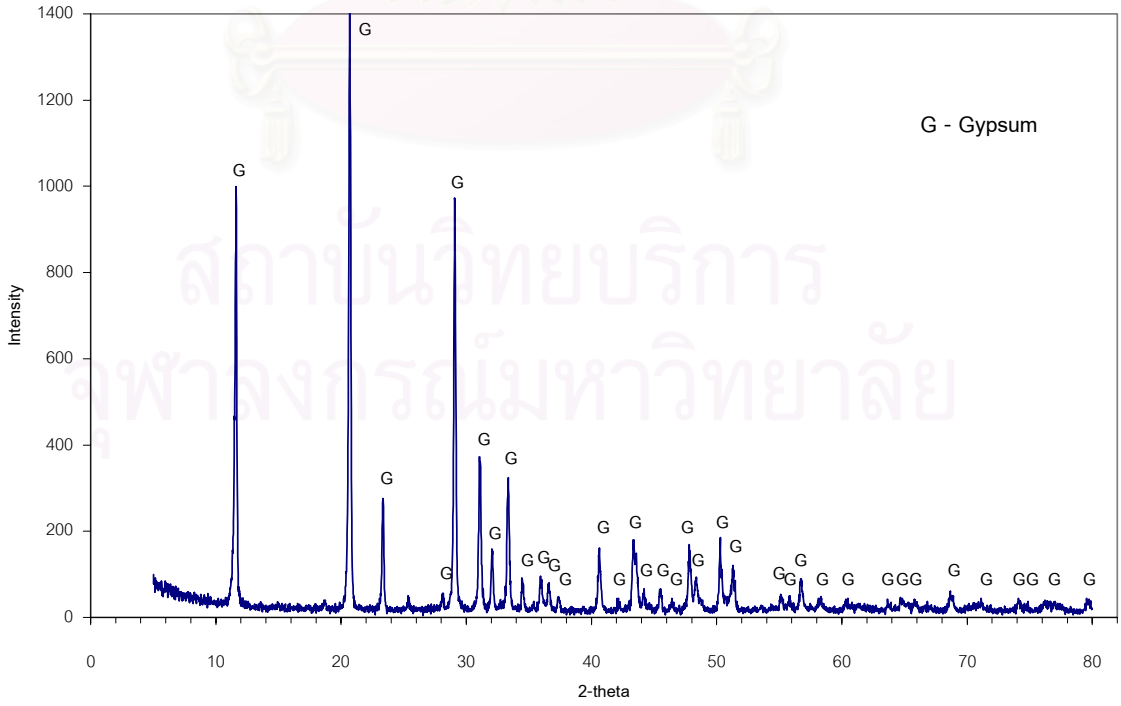
จาก**ตารางที่** 4-5 จะเห็นได้ว่าในน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลางจะมีธาตุเหล็กละลายปนอยู่ในน้ำ (มี pH=1.5) และความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำกรดที่เหลืออยู่ จากการสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ในกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite ถ้ามีน้ำกรดมาก ปริมาณธาตุเหล็กที่ปนอยู่ก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งพอทำเป็นกลางแล้วจะไม่มีธาตุเหล็กเหลืออยู่ แสดงว่าการล้างแอนไฮไดรต์ด้วยน้ำกลั่นก่อนจะช่วยขจัดเหล็กที่ละลายในน้ำออกได้ ทำให้แอนไฮไดรต์ที่เป็นกลางแล้วมีสีขาว ดังนั้นทุกสูตรจะต้องผ่านการล้างแอนไฮไดรต์ด้วยน้ำกลั่น 1 รอบ ก่อนทำเป็นกลาง

นอกจากนั้นเมื่อเก็บน้ำที่กรองได้จากการล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลางไว้นานประมาณ 30 วัน พบว่า มีผลึกรูปเข็มสีขาวเกิดขึ้น ดัง**รูปที่** 4-9 และจากผลวิเคราะห์ XRD (**รูปที่** 4-10) จะเห็นได้ว่า ผลึกที่เกิดนั้นเป็นเฟสของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต หรือยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) การเกิดผลึกเข็มของยิปซัมนี้น่าจะเกิดจาก มีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ละลายปนอยู่ในน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์ ซึ่งมีซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ละลายปนอยู่ด้วย พอสารละลายอิ่มตัวแคลเซียมไอออน ซัลเฟตไอออน และน้ำ จะรวมตัวกันเกิดเป็นยิปซัมขึ้น

ส่วนแอนไฮไดรต์แต่ละสูตรที่ผ่านการทำเป็นกลางแล้ว จะมีลักษณะดัง**รูปที่** 4-11 ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณเฟสองค์ประกอบของระบบแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตและสมบัติความขาว ดังแสดงใน**ตารางที่** 4-6 ปริมาณแอนไฮไดรต์สองจะใช้หาโดยวิธีอ้อม[3] คือ คำนวณจาก

$$\%AII = 100 - \%AIII - \%HH - \%DH$$

รูปที่ 4-9 แสดงลักษณะของผลึกที่ตกออกมาจากน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลาง



รูปที่ 4-10 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของผลึกที่ตกออกมาจากน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์

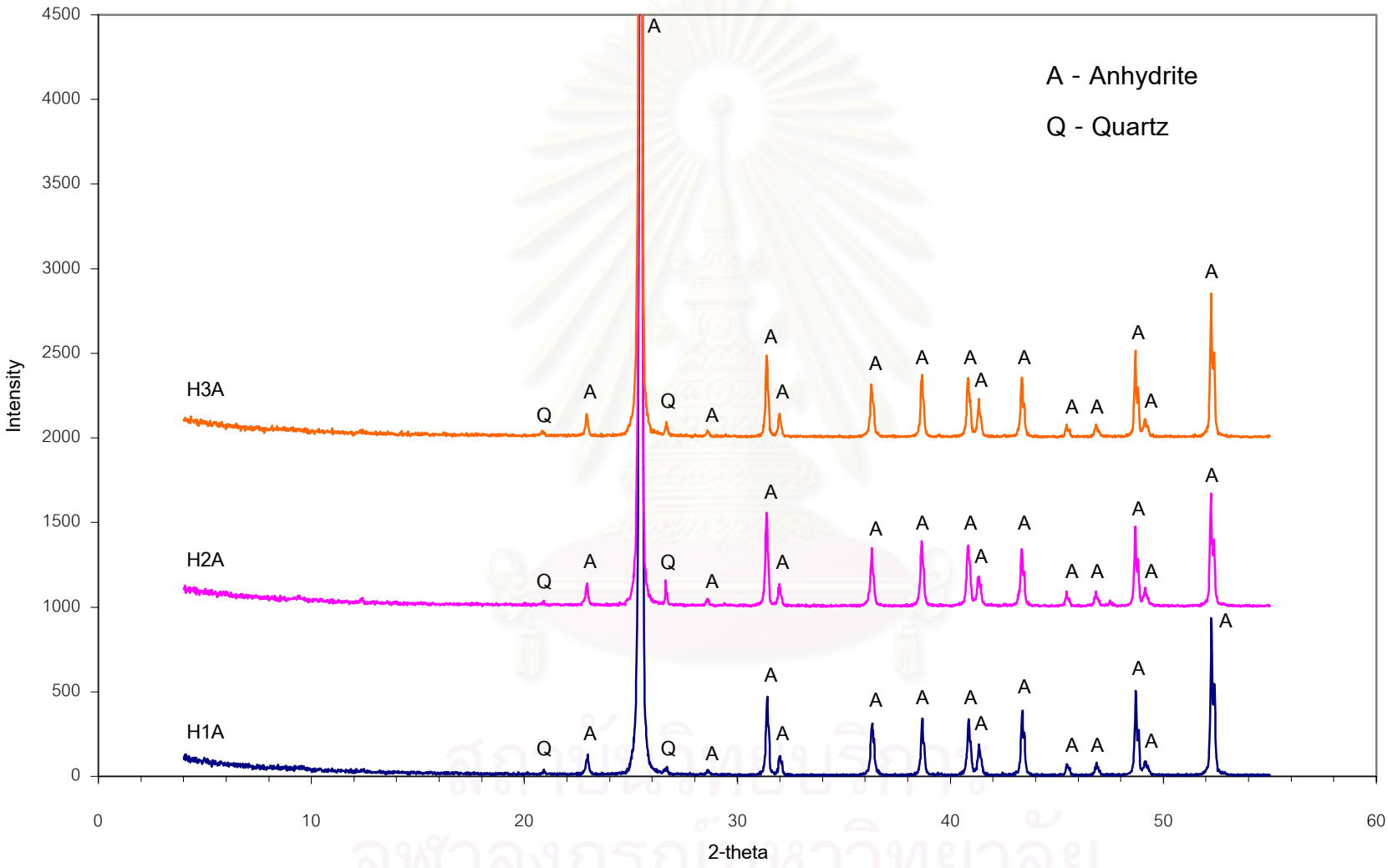
รูปที่ 4-11 แสดงลักษณะของแอนไฮไดรต์แต่ละสูตรที่เป็นกลางแล้ว

ตารางที่ 4-6 แสดงปริมาณเฟสองค์ประกอบของระบบแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตและสมบัติความขาวของแอนไฮไดรต์ที่เป็นกลาง

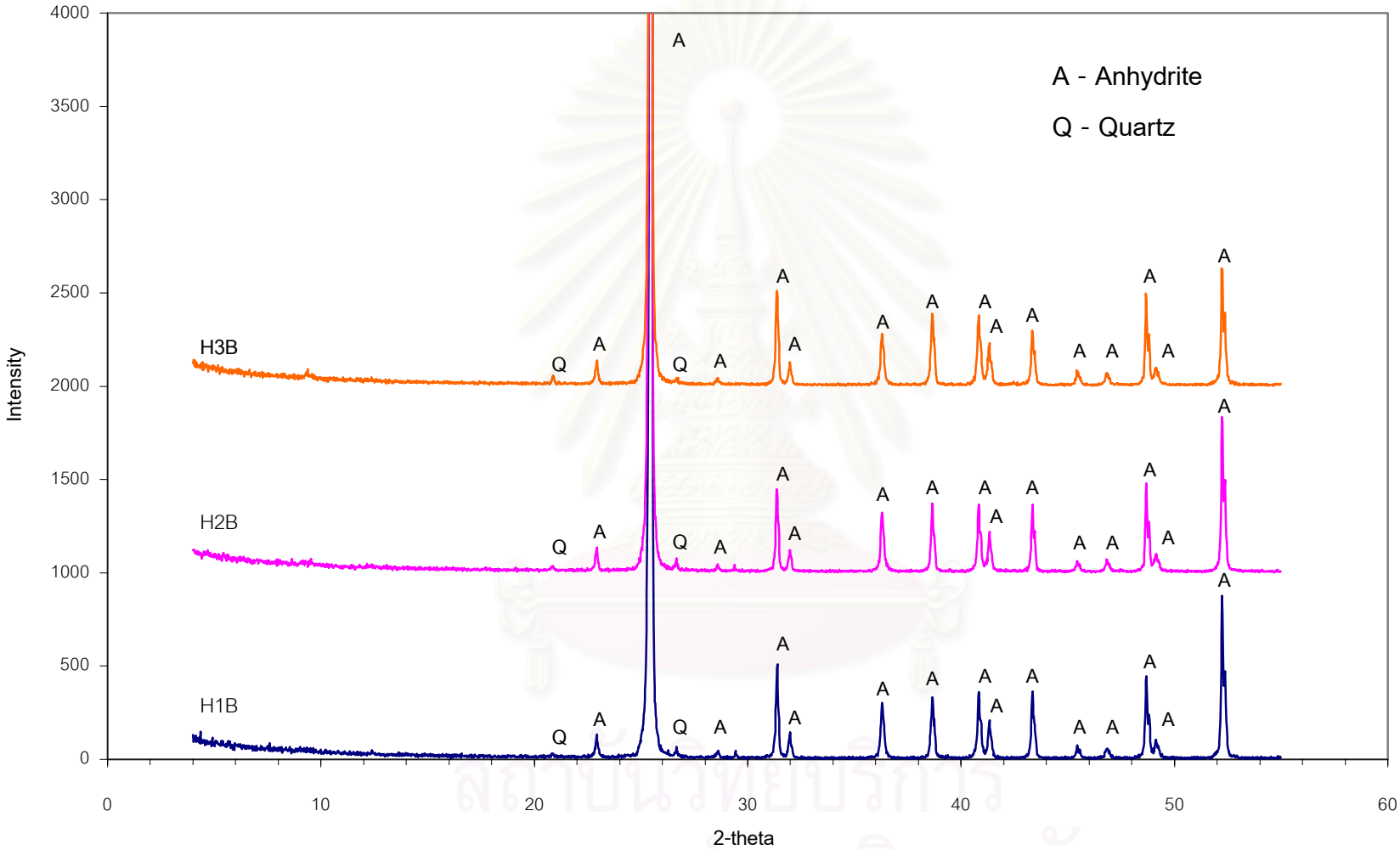
	H1A	H2A	H3A	H1B	H2B	H3B
%AII	95.93±2.24	95.84±0.08	95.98±0.49	96.73±1.64	95.94±0.11	95.69±0.19
%HH	0.50±0.34	1.40±0.09	0.93±0.62	0.36±0.11	0.38±0.22	0.23±0.08
%DH	3.57±2.15	2.76±0.03	3.09±0.14	2.91±1.55	3.68±0.11	4.08±0.13
L^*	93.633	92.925	93.516	93.181	92.699	92.785
a^*	0.180	0.203	0.159	0.318	0.336	0.179
b^*	3.951	4.293	2.803	3.587	3.546	2.960
Whiteness	67.529	64.340	72.072	67.970	66.933	69.634
Brightness	79.676	77.714	80.742	79.010	78.015	78.928

จาก**ตารางที่** 4-6 แอนไฮไดรต์แต่ละสูตรที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณเฟสแอนไฮไดรต์สองพอๆกันประมาณร้อยละ 95 และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ดัง**รูปที่** 4-12 และ **รูปที่** 4-13 พบว่า มีเฟสแอนไฮไดรต์เป็นส่วนประกอบหลักตรงตามที่วิเคราะห์โดยวิธีทางเคมี แต่มีควอทซ์ (Quartz : SiO_2) ปนอยู่เล็กน้อย ควอทซ์ที่พบน่าจะมาจากยิปซัมฟลูแก๊สตั้งแต่ต้นแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-12 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของแอนไฮไดรต์สูตร H1A H2A และ H3A ที่ผ่านการทำเป็นกลางแล้ว



รูปที่ 4-13 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของแอนไฮไดรต์สูตร H1B H2B และ H3B ที่ผ่านการทำเป็นกลางแล้ว

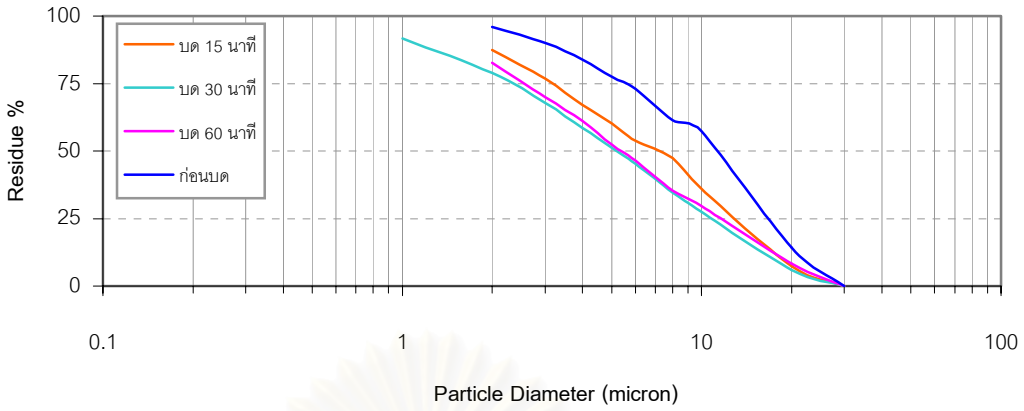
ดัง**ตารางที่** 4-1 **รูปที่** 4-12 และ**รูปที่** 4-13 บางส่วนอาจะมาจากเถ้าลอย นอกจากนั้นค่าความสว่าง (L^* หรือ lightness) ตามเกณฑ์ CIE ค่าความขาว (whiteness) ตามเกณฑ์ Ganz CIE และค่าความสว่าง (brightness) ที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร ไม่แตกต่างกันมาก แสดงว่าการไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นไม่ได้ช่วยให้ส่วนประกอบและสมบัติของแอนไฮไดรต์ดีขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสูตร H1B ไปทดลองใช้เป็นตัวเติมในกระดาษและพลาสติกต่อไป เนื่องจากผ่านการไฮโดรไซโคลนเพียงครั้งเดียว มียิปซัมสูญหายไปน้อย สังเคราะห์แอนไฮไดรต์ได้มากกว่าสูตร A (ยิปซัม 100 กรัม : กรดซัลฟูริก 100 มิลลิลิตร : น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) ประมาณ 2 เท่า เพราะว่าสูตร B ใช้ยิปซัม 200 กรัมซึ่งมากกว่าสูตร A เมื่อใช้อัตราส่วนกรดซัลฟูริกและน้ำกลั่นเท่าๆกัน และมีค่าความขาวสว่างใกล้เคียงกับมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.74-2529 เรื่องดินขาวสำหรับใช้ผสมทำกระดาษ คือ

- ความขาวสว่าง (brightness) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า 80
- กากที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร ร้อยละ ไม่เกิน 0.2
- ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 5 ไมโครเมตร ร้อยละ ไม่เกิน 30
- ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ร้อยละไม่น้อยกว่า 50
- ความคม มิลลิกรัม ไม่เกิน 40
- ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน 3

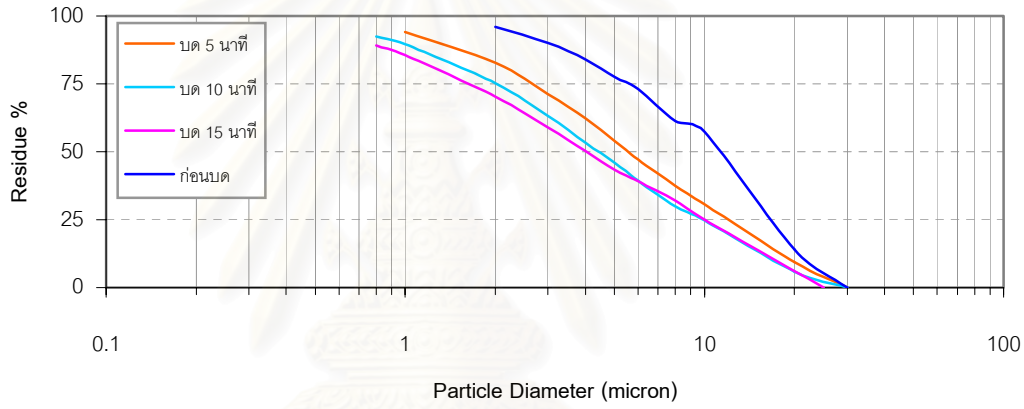
4.3 ผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคแอนไฮไดรต์จากเครื่องบด Planetary Mill และ Vibratory Mill

เมื่อนำแอนไฮไดรต์สูตร H1B มาวัดการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer พบว่า มีขนาดอนุภาคไม่เป็นตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.74-2529คือมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ 11 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องนำมาบดก่อน

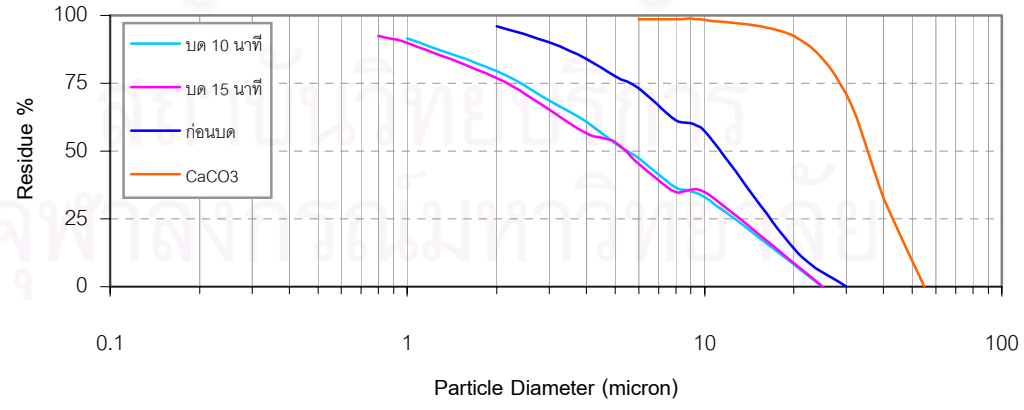
ในการศึกษาผลของการบดแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่องบด Planetary Mill ชนิดความเร็วสูงในเวลาการบดต่างๆกัน โดยวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์โดยใช้เครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer ดัง**รูปที่** 4-14 พบว่าเมื่อบดนาน 30 นาที จะได้ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เฉลี่ย (medium size , d_{50}) เล็กที่สุดประมาณ 5.2 ไมโครเมตร แต่พอบดนานขึ้นเป็น 60 นาที ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือ 5.4 ไมโครเมตร สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีการเกาะตัวกันของอนุภาค (agglomerate) ดัง**รูปที่** 4-17 ทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าเพิ่ม



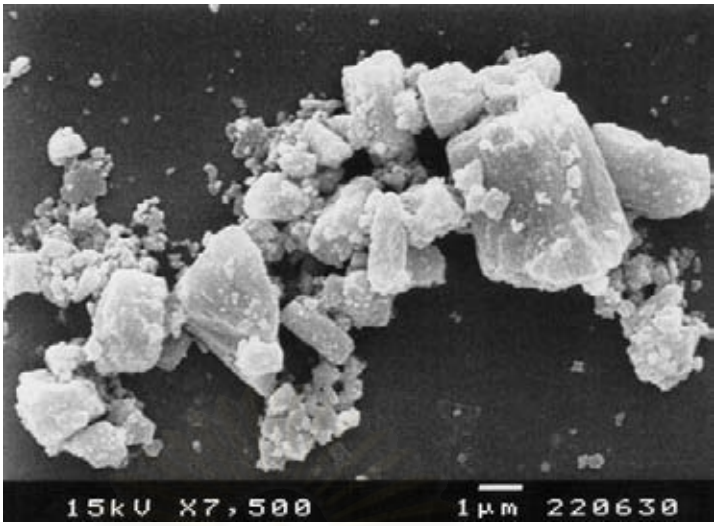
รูปที่ 4-14 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อบดด้วย Planetary Mill



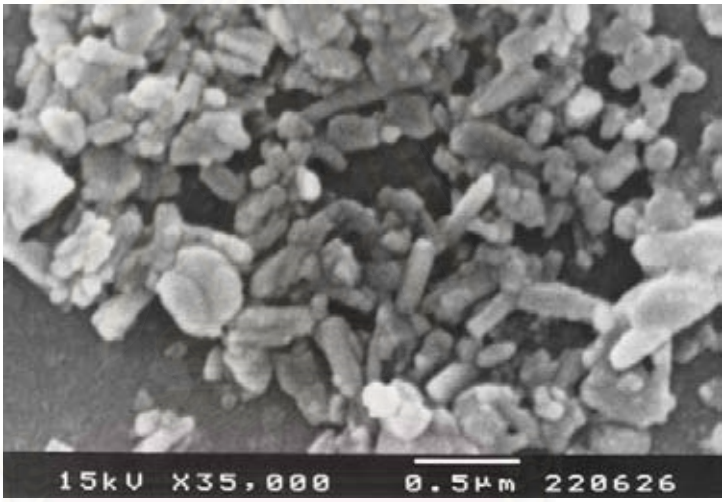
รูปที่ 4-15 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อบดด้วย Vibratory Mill



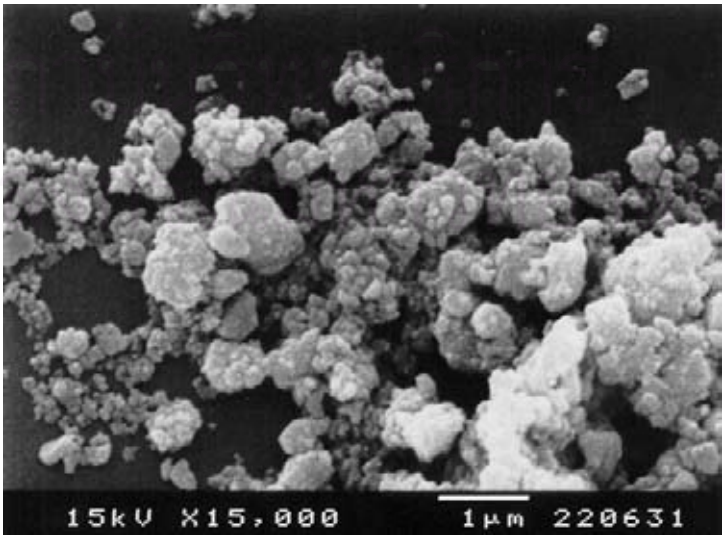
รูปที่ 4-16 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วบดด้วย Vibratory Mill



รูปที่ 4-17 ภาพถ่าย SEM ของแอนไฮไดรต์ก่อนบด



รูปที่ 4-18 ภาพถ่าย SEM ของผลึกแอนไฮไดรต์ก่อนบด เมื่อทำให้กระจายตัว



รูปที่ 4-19 ภาพถ่าย SEM ของแอนไฮไดรต์ที่ผ่านการบดด้วย Planetary Mill นาน 60 นาที

สูงขึ้น เพราะฉะนั้นระยะเวลาที่ดีที่สุดในการบดแอนไฮไดรต์ 300 กรัม ด้วย Planetary Mill ชนิดความเร็วสูง คือ 30 นาที

ในการทดลองบดแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่องบด Vibratory Mill ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์ ดัง**รูปที่ 4-15** พบว่าเมื่อบดนาน 15 นาที จะให้ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เฉลี่ยเล็กที่สุดประมาณ 4 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับการบดด้วยเครื่องบด Planetary Mill ชนิดความเร็วสูงแล้ว เครื่องบด Vibratory Mill จะลดขนาดแอนไฮไดรต์ลงได้มากที่สุด และใช้เวลาในการบดน้อยกว่า แต่ปริมาณที่บดได้จะน้อยกว่าเครื่องบด Planetary Mill เพราะเครื่องบด Vibratory Mill จะใส่แอนไฮไดรต์ได้แค่ 50 กรัม จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยยังไม่ถึงเกณฑ์ คือ 2 ไมโครเมตร จึงได้ลองเติมแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อเป็นตัวช่วยในการบด (grinding aid)

ผลการทดลองเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 กรัม (**รูปที่ 4-16**) พบว่าที่ระยะเวลาการบดนาน 15 นาที จะให้ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เฉลี่ยประมาณ 5.4 ไมโครเมตร ซึ่งมากกว่าการบดโดยไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต เพราะฉะนั้นการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ช่วยในการบดได้ บางทีอาจจะต้องหาตัวช่วยในการบดที่เหมาะสมกว่านี้ ถ้าต้องการในปริมาณมากน่าจะเลือกบดด้วย Planetary Mill มากกว่า Vibratory Mill

จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เมื่อบดด้วย Planetary Mill หรือ Vibratory Mill ก็ยังให้ขนาดไม่ได้ตามเกณฑ์ แต่เมื่อศึกษาลักษณะอนุภาคแอนไดรท์ทั้งก่อนบดและหลังบด พบว่า อนุภาคแอนไฮไดรต์ก่อนบดจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 ไมโครเมตร โดยมีลักษณะเกาะกลุ่มเป็นก้อน ดัง**รูปที่ 4-17** เช่นเดียวกับแอนไฮไดรต์หลังบด ดัง**รูปที่ 4-19** ซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer ทำให้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแอนไฮไดรต์เฉลี่ยออกมาสูง ซึ่งเมื่อนำแอนไฮไดรต์มากระจายตัวจะพบว่า ผลึกแอนไฮไดรต์จะมีลักษณะเป็นแท่ง (prismatic) และมีขนาดเล็กประมาณ 0.2-0.5 ไมโครเมตร ดัง**รูปที่ 4-18** ดังนั้นแอนไฮไดรต์ที่ผ่านการบดทั้ง Planetary Mill และ Vibratory Mill น่าจะถึงเกณฑ์ที่จะไปทำเป็นตัวเติมในกระดาษแล้ว

4.4 ผลการศึกษาสมบัติของกระดาษเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

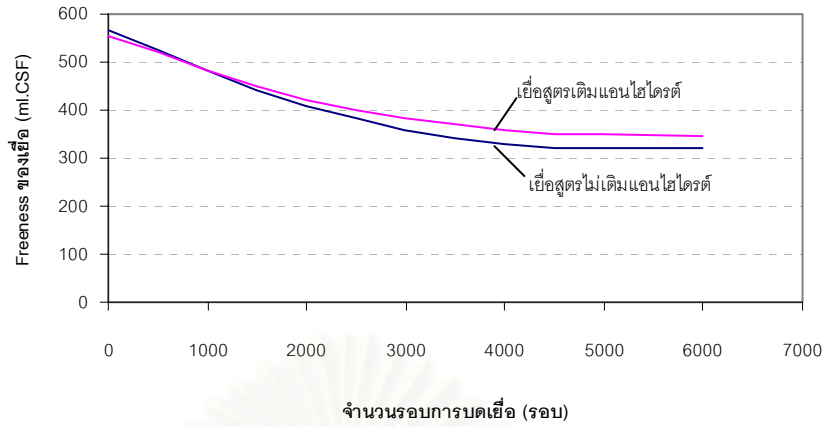
ในการศึกษาสมบัติของแผ่นกระดาษ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ส่วนที่หนึ่งศึกษาผลกระทบของการบดเยื่อ และส่วนที่สองศึกษาผลกระทบของการเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

ตารางที่ 4-7 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของแผ่นกระดาษที่เติมและไม่เติมแอนไฮไดรต์โดยผ่านการบดเยื่อด้วย PFI Mill ณ จำนวนรอบการบดต่างๆกัน

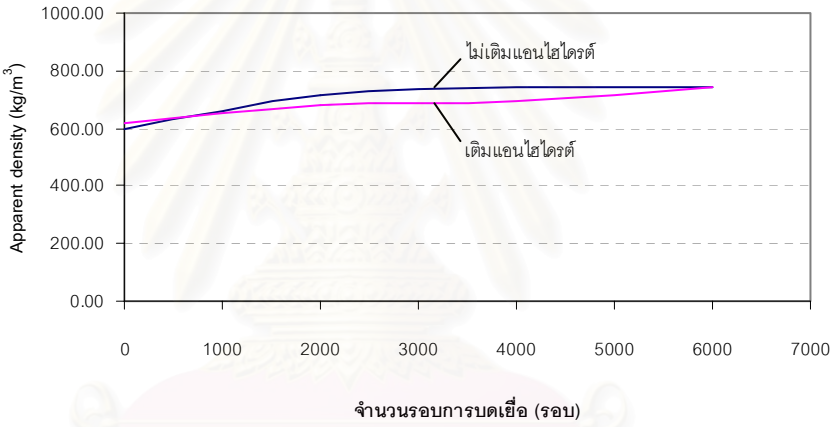
	ไม่เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์				เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์			
จำนวนรอบการบดเยื่อ (รอบ)	0	2000	4000	6000	0	2000	4000	6000
Freenessของเยื่อ (ml.CSF)	566.60	409.55	330.50	320.00	555.45	422.00	357.00	347.00
Basic weight (g/m^2)	68.45	67.17	66.81	65.34	69.25	65.11	65.60	62.31
Thickness 1 sheet (mm)	0.11	0.09	0.09	0.09	0.11	0.10	0.09	0.08
Apparent density (kg/m^3)	596.06	717.44	744.28	745.26	620.87	679.05	693.86	741.04
Breaking load (N)	18.14±1.30	36.85±1.37	48.97±1.76	49.82±1.85	17.50±0.89	35.45±1.50	42.56±1.40	49.01±1.44
Tensile index (kN.m/kg)	17.66	36.58	48.87	50.83	16.85	36.30	43.25	52.44
Stretch (%)	1.16	2.69	3.79	4.09	1.25	2.85	3.50	4.17
Tear reading (mN)	186.43±24.0	363.87±38.1	417.50±15.9	430.03±5.05	183.90±38.6	349.63±15.6	392.38±19.2	440.05±19.0
Tear index ($N.m^2/kg$)	2.72	5.42	6.25	6.58	2.66	5.37	5.98	7.06
Burst strength (kPa)	53.20±3.45	135.43±3.41	189.83±7.32	198.73±4.72	52.84±4.14	124.89±3.75	157.39±7.75	192.46±8.14
Burst index ($kPa.m^2/g$)	0.78	2.02	2.84	3.04	0.76	1.92	2.40	3.09
Opacity (%)	-	79.82±0.63	78.48±0.68	77.35±0.35	-	84.29±0.50	82.556±0.34	81.509±0.47
ความชื้น (%)	3.57	7.81	8.23	8.15	3.61	8.34	8.33	8.38
Ash content (%)	0.58	0.75	0.80	0.95	2.13	4.85	4.95	6.05
Filler content (%)	-	-	-	-	1.55	4.10	4.15	5.10

จาก**ตารางที่** 4-7 พบว่าเมื่อเพิ่มรอบการบดเยื่อจะทำให้สมบัติการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (freeness test) ลดลงดัง**รูปที่** 4-20 นั้นแสดงให้เห็นว่า เยื่อมีการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นทำให้การเอาน้ำออกจากแผ่นเปียกทำได้ยาก และมีปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเส้นใยในการอบแห้งเพิ่มขึ้นด้วย สาเหตุที่เยื่ออุ้มน้ำได้มากขึ้นเนื่องจากบดเยื่อมากจะทำให้เส้นใยแตกแขนงเกิดเป็นเส้นใยฝอยทำให้เส้นใยเกิดพันธะได้ง่ายสามารถยึดเหนี่ยวกันได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำไหลผ่านเยื่อได้ช้าลง[20] นอกจากนั้นยังทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นด้วย (**รูปที่** 4-22 - 4-28) ได้แก่ ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ดรรชนีความทนแรงดึง (tensile index) ค่าการยืดตัว (stretch) ค่าความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ดรรชนีความทนแรงฉีกขาด (tear index) ค่าความทนแรงดันทะลุ (burst strength) และดรรชนีความทนแรงดันทะลุ (burst index) แต่จะทำให้ค่าความทึบแสง (opacity) ลดลง (**รูปที่** 4-29) เนื่องจากการกระเจิงของแสงในเนื้อกระดาษลดลง เพราะว่าในเนื้อกระดาษจะประกอบด้วยเส้นใยจำนวนมากสานตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ การสานตัวนี้จะไม่สนิทเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นในเนื้อกระดาษจะมีช่องว่างอากาศเป็นจำนวนมากพอแสงผ่านเข้ามาจะมีแสงบางส่วนผ่านเข้าสู่เส้นใย เส้นใยซึ่งมีดรรชนีหักเหของแสงสูงกว่าอากาศส่งผลให้ทิศทางของแสงหักเหเปลี่ยนทิศทางเดินนับครั้งไม่ถ้วน ทำให้เกิดการหักเหของแสง (refraction) และสะท้อนแสง (reflection) กลับภายในเนื้อกระดาษอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเรียกว่า การกระเจิงของแสง (scattering) เพราะฉะนั้นเมื่อกระดาษแน่นขึ้นช่องว่างของอากาศก็จะลดลงด้วย[20] ดังนั้นการกระเจิงของแสงจะลดลงด้วย แสงจึงสามารถทะลุผ่านเนื้อกระดาษได้มากขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash content) (**รูปที่** 4-30)จะเห็นได้ว่าเมื่อบดเพิ่มขึ้นปริมาณเถ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเส้นใยยึดเหนี่ยวกันมากและแน่น ทำให้น้ำหนักเยื่อต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นเสมือน (apparent density) (**รูปที่** 4-21)

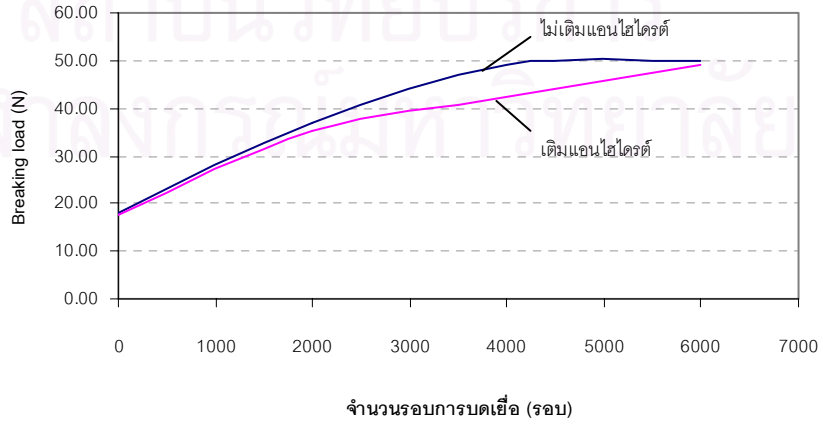
จากผลการวิเคราะห์ตาม**ตารางที่** 4-7 และ **รูปที่** 4-29 - 4-30 พบว่าการเติมแอนไฮไดรต์เพื่อไปเป็นตัวเติมจะทำให้ค่าความทึบแสงและปริมาณเถ้าเพิ่มสูงกว่าเยื่อเปล่าๆที่ไม่ได้เติมตัวเติม เนื่องจากการเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าเส้นใยมากเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเส้นใย จึงทำให้เกิดการกระเจิงแสงเพิ่มขึ้น แสงผ่านได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น เพราะว่าตัวเติมแอนไฮไดรต์ที่แทรกอยู่ไม่ได้สลายไปตอนเผา 525 องศาเซลเซียสเหมือนเส้นใย โดยจะพบตัวเติมแอนไฮไดรต์ปนอยู่กับเถ้าในปริมาณมากขึ้นเมื่อบดเพิ่มขึ้น ตามผลการวิเคราะห์ปริมาณตัวเติม (filler content) นอกจากนั้นการเติมตัวเติมจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่างๆลดลง เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ ดัง**รูปที่** 4-22 - 4-28 เพราะมีตัวเติมแอนไฮไดรต์ไปแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยทำให้พันธะระหว่างเส้นใยลดลง



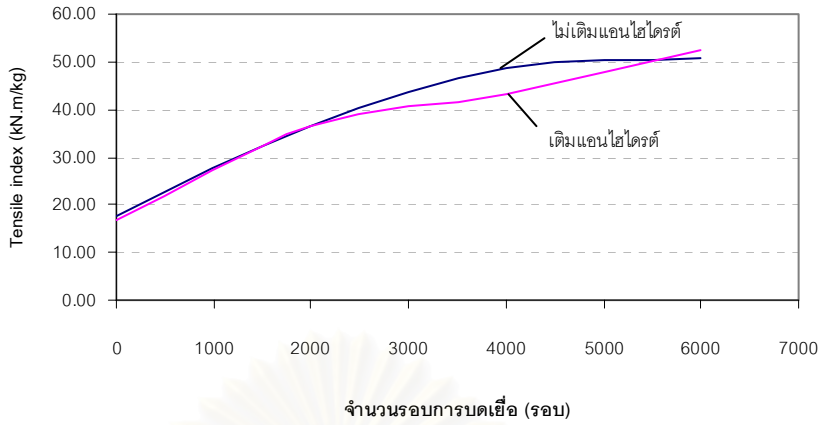
รูปที่ 4-20 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (freeness test)



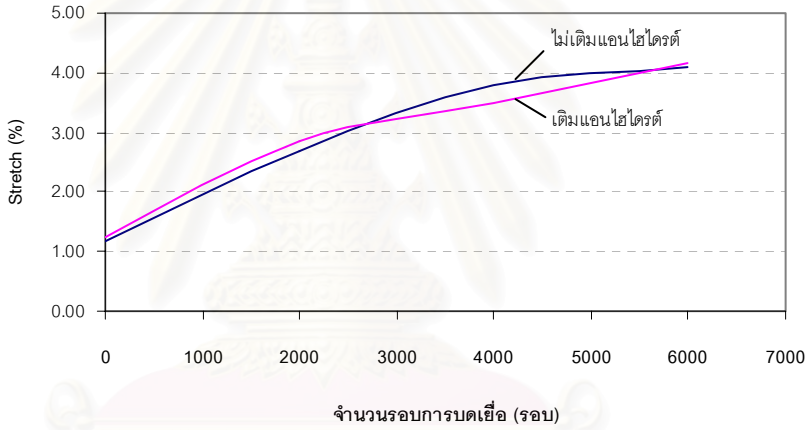
รูปที่ 4-21 แสดงผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นเสมือน (apparent density)



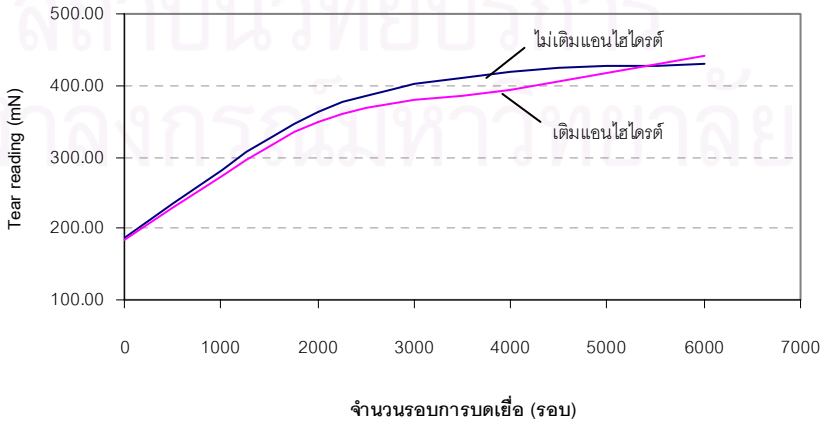
รูปที่ 4-22 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง (tensile strength)



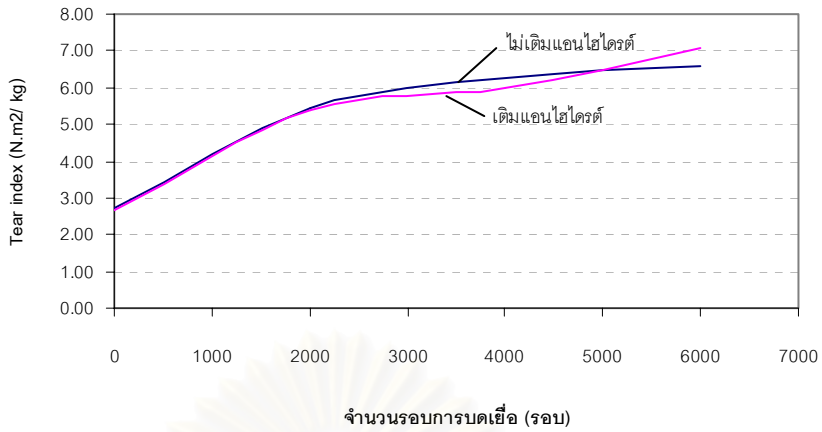
รูปที่ 4-23 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงดึง (tensile index)



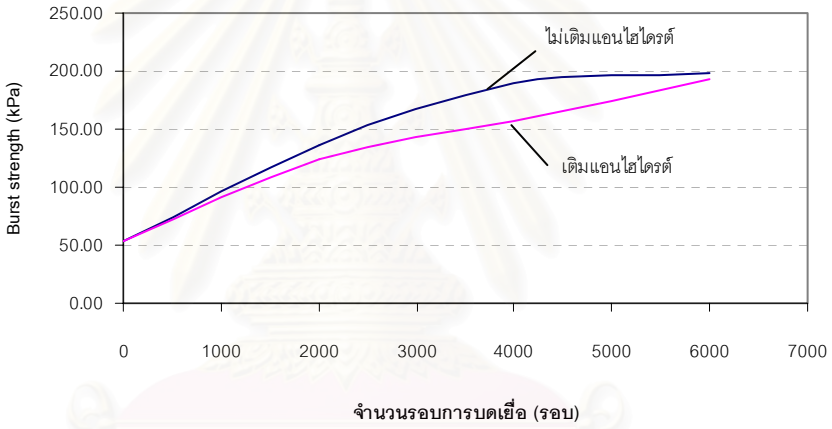
รูปที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์การยืดตัวของกระดาษ (stretch)



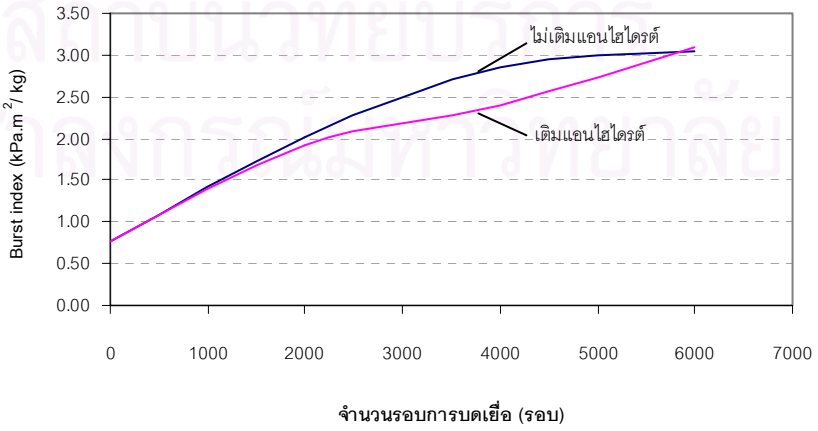
รูปที่ 4-25 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงฉีกขาด (tear strength)



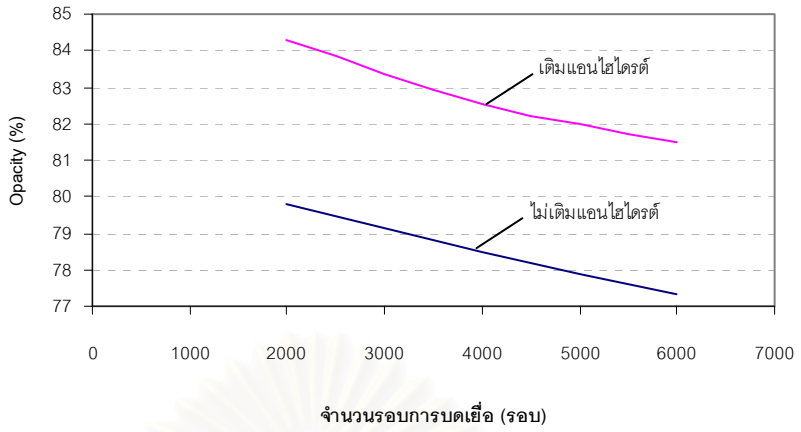
รูปที่ 4-26 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงฉีกขาด (tear index)



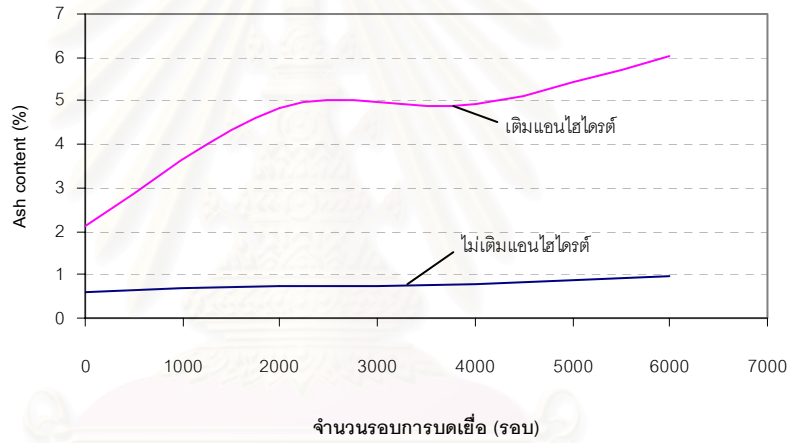
รูปที่ 4-27 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงดันทะลุ (burst strength)



รูปที่ 4-28 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าดรรชนีความทนแรงดันทะลุ (burst index)



รูปที่ 4-29 แสดงผลการวิเคราะห์ความทึบแสงของกระดาษ (opacity)



รูปที่ 4-30 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของกระดาษ (ash content)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองสมบัติต่างๆของกระดาษที่เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์กับมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.287-2533. พบว่า กระดาษที่เตรียมได้ (น้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร) ผ่านเกณฑ์กำหนดลักษณะของกระดาษพิมพ์ดังนี้

- ความชื้นร้อยละไม่เกิน 10
- ความทนแรงดันทะลุ ไม่น้อยกว่า 55 กิโลพาสคัล
- ความทึบแสง ร้อยละไม่น้อยกว่า 81
- ความขาวสว่าง (เฉพาะกระดาษสีขาว) ร้อยละไม่น้อยกว่า 75

ถ้าไม่คำนึงถึงค่าความขาวสว่างมากนัก กระดาษที่ใช้ตัวเติมแอนไฮไดรต์น่าจะใช้เป็นกระดาษพิมพ์ได้ โดยสูตรที่เหมาะสมที่สุด คือ สูตรที่ผ่านการบดเยื่อ 6000 รอบ และเติมตัว

เติมแอนไฮไดรต์ เพราะว่าเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์จะทำให้ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ลดลง แต่ที่การบดเยื่อ 6000 รอบ จะให้ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ สูงที่สุด ใกล้เคียงกับที่สูตรที่ไม่ได้เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ นอกจากนั้นยังให้ค่าความทึบแสงสูงพอที่จะทำให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ผลการศึกษาสมบัติของพลาสติกเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลจะฉีดพลาสติกเป็นรูปดัมเบล (dumb-bell shape) ดัง**รูปที่** 4-23

รูปที่ 4-31 แสดงลักษณะชิ้นตัวอย่างพลาสติก

ตารางที่ 4-8 แสดงผลวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของพลาสติกเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

	LLDPE	LLDPE +50 phr filler	HDPE	HDPE +50 phr filler
Maximum load (N)	373.00±23.0	177.10±24.8	501.30±12.7	431.80±17.8
Maximum stress (N/mm^2)	23.73±2.64	10.98±1.57	32.24±0.81	26.46±1.07
Area under curve (N.mm)	87747.50±7188.6	231.37±98.1	57470.0±18607.8	1708.40±305.8
Modulus of elasticity (N/mm^2)	62.25±4.37	91.97±19.48	101.89±15.00	104.60±13.23
Strain at maximum load (%)	1487.00±140.6	8.10±3.08	21.72±1.86	17.13±2.73

ค่าต่างๆใน**ตารางที่** 4-8 จะบอกสมบัติของพลาสติกดังนี้

- ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) พิจารณาจากค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress)
- ค่าดูดซับพลังงานที่ใช้ในการทำให้วัสดุขาด หรือความสามารถการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติก พิจารณาจากพื้นที่ใต้เส้นกราฟ (area under curve)
- ค่าความแข็งตึง (stiffness) พิจารณาจากค่าอิลาสติกมอดุลัส (modulus of elasticity)
- ค่าการยืดตัวสูงสุด (elongation) พิจารณาจากความเครียดที่รับแรงสูงสุด (strain at maximum load)

จาก**ตารางที่** 4-8 ชิ้นตัวอย่างจะถูกดึงด้วยอัตราเร็วเท่ากัน คือ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งพบว่าเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์สูตร H1B ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 4 ไมโครเมตร (วัดจากเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer) ลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ได้แก่ ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) พลังงานที่ทำให้วัสดุขาด และค่าการยืดตัวสูงสุด (elongation) การเติมตัวเติมมากจะทำให้วัสดุเปราะ (brittle) โดยพิจารณาจากค่าพื้นที่ใต้กราฟจะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟและค่าความเครียดที่รับแรงสูงสุดลดลง เพราะว่าตัวเติมซึ่งมีขนาดเล็กไปแทรกระหว่างเนื้อพลาสติกทำให้สายโซ่โมเลกุลโพลิเมอร์ยึดเหนี่ยวกันน้อยลง ดังนั้นแสดงว่าพลาสติกที่เติมตัวเติมแอนไฮไดรต์มีความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (ความสามารถยืดของชิ้นงานก่อนการแตกหัก)ลดลง และทำให้ความแข็งตึง (stiffness) สูงขึ้น

ค่าความเค้นสูงสุดจะบอกความสามารถการรับแรงได้สูงสุดของวัสดุก่อนจะเกิดการแตกหัก ส่วนวัสดุที่มีความเป็นพลาสติกจะยืดตัวออกก่อนเกิดการแตกหัก ซึ่งจาก**ตารางที่** 4-8 พบว่า HDPE จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ HDPE เป็นสายโซ่ยาวๆและมีกิ่งก้านน้อย จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่า LLDPE (สายโซ่ยาวและมีกิ่งก้านมากแต่ไม่เท่ากับ LDPE) จึงมีความหนาแน่นสูงกว่า LLDPE ซึ่งช่วยเพิ่มความทนแรงดึงด้วย ทำให้วัสดุมีความต้านทานการโค้งงอได้มาก

เมื่อเทียบผลการเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ในพลาสติกทั้ง 2 ชนิด (**ตารางที่** 4-8) กับมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1379-2539. เรื่องถังน้ำพลาสติก พบว่า มีค่าความทนแรงดึงเท่านั้นที่เป็นไปตามเกณฑ์ คือ มีค่าไม่น้อยกว่า 7.6 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นถังน้ำพลาสติกได้ ดังนั้นต้องปรับสมบัติอื่นๆด้วย โดยการทดลองลดปริมาณตัวเติมลง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธีโฮโดรไซโคลนร่วมกับการชะด้วยกรดและตกตะกอนแล้ว นำมาสังเคราะห์เป็นแอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยผ่านกระบวนการ Semidry Acid-Anhydrite จากนั้นจึงนำมาทดลองใช้เป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษและพลาสติกชนิด Polyethylene ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การล้างยิปซัมฟลูแก๊สโดยวิธีไฮโดรไซโคลน

การเพิ่มจำนวนรอบการไฮโดรไซโคลนถึง 3 รอบ จะทำให้ปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้กลับมาต่ำประมาณ 74.58 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณเถ้าลอยที่ปนอยู่จะมีเพียง 0.67 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ร่วมกับการล้างโดยการชะด้วยกรดและตกตะกอนจะยิ่งช่วยกำจัดอนุภาคสีน้ำตาลแดงซึ่งส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของเถ้าลอยออกได้มากขึ้น ส่งผลให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

2. การสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยวิธี Semidry Acid-Anhydrite

2.1 การสังเคราะห์แอนไฮไดรต์ด้วยวิธี Semidry Acid-Anhydrite ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง แอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้จะต้องผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นก่อนทำเป็นกลาง เพื่อกำจัดสารประกอบของเหล็กที่ปนอยู่ออก ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการทำเป็นกลางลงได้ประมาณ 8 เท่า และทำให้แอนไฮไดรต์มีความบริสุทธิ์สูงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นแอนไฮไดรต์ที่เป็นกลางแล้ว ซึ่งปริมาณที่ได้กลับมาประมาณ 74 เปอร์เซ็นต์นั้น ยังมีค่าความขาวสว่าง (brightness) สูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และค่าความสว่าง (lightness) สูงถึง 93.5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกแอนไฮไดรต์สูตร H1B เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเติม โดยผลึกแอนไฮไดรต์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นแท่ง (prismatic) และมีขนาดเล็กประมาณ 0.5 ไมโครเมตร

2.2 ผลึกเข็มสีขาวซึ่งตกผลึกออกมาจากน้ำที่ล้างแอนไฮไดรต์ก่อนทำเป็นกลางเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) ของยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง

3. การบดแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่องบด Planetary Mill และ Vibratory Mill

3.1 การบดแอนไฮไดรต์ด้วยเครื่องบด Planetary Mill ชนิดความเร็วสูง จะบดได้ปริมาณมาก แต่ใช้เวลานาน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะลดลงได้ต่ำสุดประมาณ 5.2 ไมโครเมตร

ส่วนเครื่องบด Vibratory Mill จะใช้เวลาน้อย และขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะลดลงได้ต่ำสุดประมาณ 4 ไมโครเมตร แต่จะบดได้ปริมาณน้อย

3.2 แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เพื่อเป็นตัวช่วยในการบด (grinding aid) ไม่เหมาะที่จะใช้กับแอนไฮไดรต์ เนื่องจากมีขนาดผลึกโตเกินไป

4. สมบัติของกระดาษเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

4.1 การเพิ่มจำนวนรอบการบดเยื่อจะทำให้สมบัติการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (freeness) และความทึบแสง (opacity) ลดลง เนื่องจากเส้นใยของเยื่อมีการแตกเป็นแขนงยึดเหนี่ยวกันได้ดี ช่องว่างของอากาศก็ลดลง ทำให้น้ำไหลผ่านเยื่อได้ช้า และส่งผลให้การกระเจิงของแสงลดลง ผลคือ แสงทะลุผ่านกระดาษได้มากขึ้น แต่กระดาษจะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

4.2 การเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์จะทำให้ปริมาณเถ้า (ash content) และความทึบแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคเล็กๆของแอนไฮไดรต์ไปแทรกอยู่ระหว่างเส้นใย ซึ่งช่วยให้เกิดการกระเจิงของแสงในเนื้อกระดาษเพิ่มมากขึ้น กระดาษจึงมีความทึบแสงเพิ่มขึ้น และจากการที่แอนไฮไดรต์ไม่สลายไปเมื่อเผา 525 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีเถ้าเหลือมากขึ้น แต่กระดาษจะมีสมบัติเชิงกลต่ำลง

4.3 กระดาษที่น่าจะสามารถนำมาใช้เป็นกระดาษพิมพ์ได้ คือ กระดาษที่ผ่านการบดเยื่อที่ 6000 รอบ และเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ เพราะว่ามีสมบัติเชิงกลสูงและมีความทึบแสงสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

5. สมบัติของพลาสติกเมื่อเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์

การเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์ลงในพลาสติกทั้ง 2 ชนิด คือ LLDPE และ HDPE จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากเติมตัวเติมแอนไฮไดรต์มากเกินไป ยกเว้นค่าอิลาสติกมอดุลัส (modulus of elasticity) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานการโค้งงอได้ดี หรือมีค่าความแข็งตึง (stiffness) มาก

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

จากการทำวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การใช้แอนไฮไดรต์เป็นตัวเติมในกระดาษหรือพลาสติก จะต้องควบคุมปริมาณตัวเติมที่เติมลงไปให้เหมาะสม เพื่อช่วยปรับสมบัติต่างๆให้ได้ตามต้องการ จึงน่าจะมีการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรม

กระดาษและพลาสติกต่อไป เช่น ลดปริมาณการเติมแอนไฮไดรต์ นอกจากนั้นน่าจะทำการศึกษาเปรียบเทียบตัวเติมแอนไฮไดรต์กับตัวเติมที่นิยมใช้กัน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. สำนักงานวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การศึกษาการใช้ประโยชน์จากยิปซัมฟลูแก๊ส. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2541.
2. ทรัพยากรธรณี, กรม. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย (Fly Ash) และยิปซัมสังเคราะห์ที่เกิดจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี, 2541.
3. ชาตรี ฐิติอนันท์. การผลิตพลาสเตอร์โปรเจคชันจากยิปซัมฟลูแก๊ส. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีเซรามิก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
4. วิชิต ประกายพรรณ. การผลิตยิปซัมพลาสเตอร์จากยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีเซรามิก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
5. Wirsching, F.; Hüller, R.; and Limmer, B. The Semidry Acid-Anhydrite Process – The use of flue gas desulphurization (FGD) gypsum by development of a new process for the production of FGD anhydrite. ZKG International 47 (1994) No. 5: 278-286.
6. Wirsching, F.; and Kirchen, G. Filler and Coating Pigments from FGD Gypsum. 4th International Conference of FGD and Other Synthetic Gypsum, pp. 23-1 – 23-14. Toronto, Canada, ORTECH, 1995.
7. Wirsching F.; Hüller, R.; Hoffmann, H.; and Pürzer, A. Filler made from FGD gypsum. ZKG International 48 (1995) No. 5: 241-256.
8. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. เครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539.
9. Wirsching, F. Calcium Sulfate. Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry Vol.A4 (1975): 555-584.
10. Wirsching, F.; Hüller, R.; and Olejnik, R. Gypsum from Flue Gas Desulphurisation Plants – definitions and legislation in the European Communities, in the OECD and in Germany. ZKG International 47 (1994) No. 2: 65-69.
11. Mallen, T. REA-Gips-Technische und wirtschaftliche Aspekte eines Sekundä rrohstoffs, Teil 1. ZKG International 51 (1998) No. 4: 220-228.

12. Hamm, H.; and Hüller, R. Production and Utilization of FGD Gypsum in Europe. 5th International Conference of FGD and Synthetic Gypsum, pp. 1-1 – 1-21. Toronto, Canada, ORTECH, 1997.
13. Mallen, T. REA-Gips-Technische und wirtschaftliche Aspekte eines Sekundä rrohstoffs, Teil 2. ZKG International 51 (1998) No. 5: 272-278.
14. Wirsching, F.; and Hüller, R. Examination of the understanding of flue-gas gypsum quality. ZEMENT-KALK-GIPS 42 (1989) No. 5: 223-228.
15. Jurkowitsch, H.; and Hüller, R. Handling and Processing FGD Gypsum for Application in Building Materials in Europe. 4th International Conference on FGD and Other Synthetic Gypsum, pp. 6-1 – 6-18. Toronto, Canada, ORTECH, 1995.
16. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่. ไฮโดรไซโคลน. (ม.ป.ท., ม.ป.ป.).
17. Boos, F. W.; and Wirsching, F. PROCESS FOR PREPARING CALCIUM SULFATE ANHYDRITE United States Patent. Number 5,169,444. (Dec 1992).
18. Weterings, C. A. M.; and Janssen, J. A. PROCESS FOR THE PREPARATION OF CALCIUM SULPHATE ANHYDRITE AND CALCIUM SULPHATE ANHYDRITE OBTAINED BY THIS PROCESS United States Patent. Number 4,387,083. (Jun 1983).
19. Palmer, J. W.; and Gaynor, J. C. PROCESS FOR REDUCING RADIOACTIVE CONTAMINATION IN PHOSPHOGYPSUM United States Patent. Number 4,388,292. (Jun 1983).
20. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ. กรุงเทพมหานคร: กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2538.
21. อรัญ หาญสืบสาย และ พรทวี พึ่งรัศมี. สาระน่ารู้เรื่องกระดาษพิมพ์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
22. Hwang, J. Y.; Huang, X.; Gillis, J. M.; Hein, A. M.; Popko, D. C.; Tieder, R. E.; and McKimpson, M. G. Utilization of Low NO_x Coal Combustion By-Product. http://www.fetc.doc.gov/publications/proceedings/98/98ps/ps2b-7.pdf.

23. สมชาติ รุ่งอินทร์. ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับงานวิเคราะห์ทดสอบเยื่อกระดาษและคำอธิบายศัพย์ที่ใช้ในงานวิเคราะห์ทดสอบ. กรุงเทพมหานคร: กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2528.
24. Dean, J. A. Lange's Handbook of Chemistry 13th Edition. Singapore: McGrw-Hill Book Company. 1987.
25. พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ สัมพันธ์พาณิชย์, 2542.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การเตรียมความเข้มข้นกรดซัลฟูริก

$$V = \frac{M \times W \times X}{P \times \rho \times 10}$$

V	=	ปริมาณกรดซัลฟูริกที่ต้องใช้ (มิลลิลิตร)
M	=	โมลาร์ที่ต้องการ (Molar)
W	=	มวลโมเลกุลของกรดซัลฟูริก
P	=	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก
ρ	=	ความถ่วงจำเพาะของกรดซัลฟูริก
X	=	ปริมาตรที่ต้องการเตรียม (มิลลิลิตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การหาปริมาณเถ้าลอยของยิปซัมฟลูแก๊ส

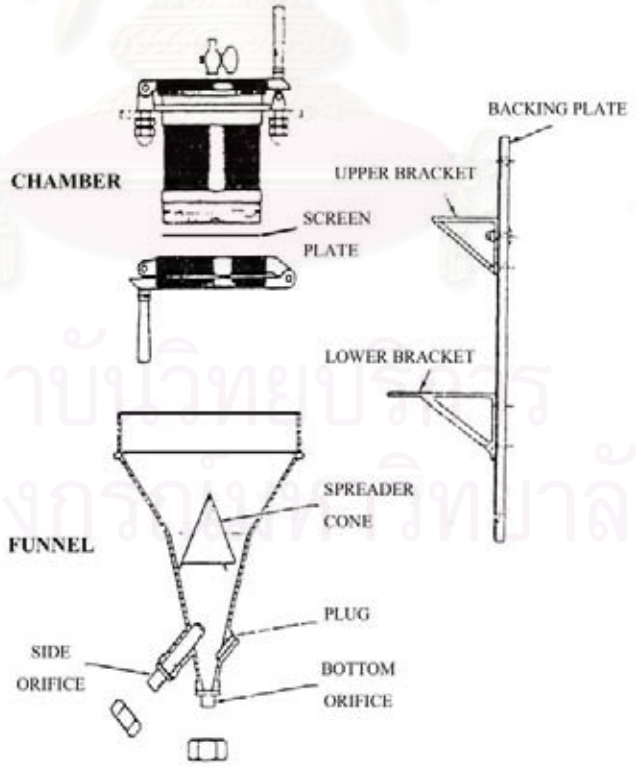
1. นำยิปซัมฟลูแก๊สหนัก 10 กรัม (น้ำหนักแห้ง) มาผสมกับกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอัตราส่วนยิปซัมฟลูแก๊ส 10 กรัมต่อกรดซัลฟูริก 10 มิลลิลิตร
2. ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันแล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการแยกชั้นตะกอน
3. ค่อยๆเทชั้นตะกอนส่วนบนที่เป็นสีน้ำตาลดำลงบนกระดาษกรองเบอร์ 42 กรองตะกอนไว้วิเคราะห์น้ำหนักเทียบกับน้ำหนักยิปซัมฟลูแก๊ส
4. นำตะกอนส่วนที่เหลือมาผสมกับกรดซัลฟูริกและทำวนขั้นตอน 1-3 จนตะกอนชั้นบนที่เป็นสีน้ำตาลดำไม่เหลือ
5. นำตะกอนที่ติดบนกระดาษกรองมาทำให้เป็นกลางโดยฉีดน้ำกลั่นไล่ตะกอนลงในบิกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
6. นำไปกรองแบบ Suction โดยชั่งน้ำหนักกระดาษกรองไว้ก่อน
7. นำตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
8. น้ำหนักตะกอนสีน้ำตาลดำ(%) $= \left(\frac{\text{น้ำหนักหลังอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษกรอง}}{\text{น้ำหนักยิปซัมฟลูแก๊ส}} \right) \times 100$
9. ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การหาค่าการให้น้ำไหลผ่านของเยื่อ (Freeness Test)

1. นำเยื่อที่ต้องการจะวัดค่ามากระจายเยื่อก่อน แล้วทำให้เจือจางโดยการเติมน้ำเป็น 10 ลิตร
2. ควบคุมอุณหภูมิให้เป็น 20 องศาเซลเซียส
3. แล้วตวงน้ำเยื่อออกมา 1 ลิตร 2 ครั้ง ใส่กระบอกตวงไว้ เพื่อเปรียบเทียบผลทั้ง 2 ครั้งให้ได้ใกล้เคียงกัน
4. เทน้ำเยื่อ 1 ลิตรลงในเครื่องวัด Freeness Tester รองน้ำส่วนที่ออกมาจาก Side Orifice เพื่อนำไปหาปริมาณน้ำที่เยื่อยอมให้ไหลผ่าน
5. นำน้ำเยื่อที่ค้างอยู่ในส่วน Chamber ออกมากรองแบบ Suction (ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองไว้) เพื่อเก็บเยื่อไปหาน้ำหนักโดยนำเยื่อไปอบที่ 105^{O}C จนน้ำหนักคงที่
6. อีกกระบอกตวงทำวนขั้นตอน 1-5 อีกครั้งเปรียบเทียบกัน
7. วิเคราะห์และแก้ไขค่าให้ถูกต้องจากตารางแก้ไขค่าจากอุณหภูมิและความข้นของน้ำเยื่อ



รูปของ Freeness Tester

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตารางแก้ไขค่า Freeness ให้ถูกต้องโดยใช้อุณหภูมิ

TABLE I. FREENESS CORRECTIONS TO 20°C *

Freeness read	Temperature of stock at test, °C																				Freeness read
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
	Points freeness to be added											Points freeness to be subtracted									
30	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	30
40	12	10	9	8	7	6	5	3	2	1	0	1	2	3	5	6	7	8	9	10	12	40
50	14	12	11	10	8	7	6	4	3	1	0	1	3	4	6	7	8	10	11	12	14	50
60	15	14	12	11	9	8	6	4	3	1	0	1	3	4	6	8	9	11	12	14	15	60
70	17	15	13	12	10	8	7	5	3	2	0	2	3	5	7	8	10	12	13	15	17	70
80	19	17	15	13	11	9	8	6	4	2	0	2	4	6	8	9	11	13	15	17	19	80
90	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	90
100	21	19	17	15	13	10	8	6	4	2	0	2	4	6	8	10	13	15	17	19	21	100
110	23	21	18	16	14	11	9	7	5	2	0	2	5	7	9	11	14	16	18	21	23	110
120	25	22	20	17	15	12	10	7	5	2	0	2	5	7	10	12	15	17	20	22	25	120
130	26	23	21	18	16	13	11	8	5	3	0	3	5	8	11	13	16	18	21	23	26	130
140	27	24	22	19	16	14	11	8	5	3	0	3	5	8	11	14	16	19	22	24	27	140
150	29	26	23	20	17	14	11	9	6	3	0	3	6	9	11	14	17	20	23	26	29	150
160	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	160
170	31	28	25	22	18	15	12	9	6	3	0	3	6	9	12	15	18	22	25	28	31	170
180	32	29	26	22	19	16	13	10	6	3	0	3	6	10	13	16	19	22	26	29	32	180
190	33	30	26	23	20	16	13	10	6	3	0	3	6	10	13	16	20	23	26	30	33	190
200	34	31	27	24	20	17	13	10	7	3	0	3	7	10	13	17	20	24	27	31	34	200
210	35	31	28	24	21	18	14	10	7	3	0	3	7	10	14	18	21	24	28	31	35	210
220	36	32	29	25	22	18	14	10	7	4	0	4	7	10	14	18	22	25	29	32	36	220
230	37	33	30	26	22	19	15	11	7	4	0	4	7	11	15	19	22	26	30	33	37	230
240	38	34	31	27	23	19	15	11	8	4	0	4	8	11	15	19	23	27	31	34	38	240
250	39	35	31	27	23	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	23	27	31	35	39	250
260	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	260
270	41	37	33	29	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	29	33	37	41	270
280	42	38	34	29	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	29	34	38	42	280
290	42	38	34	29	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	29	34	38	42	290
300	43	39	34	30	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	30	34	39	43	300
310	43	39	34	30	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	30	34	39	43	310
320	43	39	34	30	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	30	34	39	43	320
330	44	40	35	31	26	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	26	31	35	40	44	330
340	44	40	35	31	26	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	26	31	35	40	44	340
350	44	40	35	31	26	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	26	31	35	40	44	350
360	44	40	35	31	26	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	26	31	35	40	44	360
370	45	41	36	31	26	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	26	31	36	41	45	370
380	45	41	36	31	27	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	27	31	36	41	45	380
390	45	41	36	31	27	23	18	14	9	4	0	4	9	14	18	23	27	31	36	41	45	390
400	46	41	37	32	28	23	18	14	9	4	0	4	9	14	18	23	28	32	37	41	46	400
420	45	41	36	31	27	23	18	14	9	4	0	4	9	14	18	23	27	31	36	41	45	420
440	45	41	36	31	27	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	27	31	36	41	45	440
460	44	40	35	31	27	22	18	13	9	4	0	4	9	13	18	22	27	31	35	40	44	460
480	43	39	34	30	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	30	34	39	43	480
500	42	38	34	29	25	21	17	13	8	4	0	4	8	13	17	21	25	29	34	38	42	500
520	42	38	33	29	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	29	33	38	42	520
540	42	37	33	28	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	33	37	42	540
560	41	37	32	28	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	37	41	560
580	41	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	41	580
600	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	600
620	39	35	31	27	23	19	16	12	8	4	0	4	8	12	16	19	23	27	31	35	39	620
640	37	33	29	25	21	18	14	11	7	4	0	4	7	11	14	18	21	25	29	33	37	640
660	36	32	28	25	21	17	14	10	7	3	0	3	7	10	14	17	21	25	28	32	36	660
680	35	31	27	24	20	17	13	10	6	3	0	3	6	10	13	17	20	24	27	31	35	680
700	33	30	26	23	20	16	13	9	6	3	0	3	6	9	13	16	20	23	26	30	33	700

ภาคผนวก จ

ตารางแก้ไขค่า Freeness ให้ถูกต้องโดยใช้ความข้นของน้ำเยื่อ

TABLE II. FREENESS CORRECTIONS TO 0.30% CONSISTENCY*

Freeness read	Consistency of stock at test, %																					Freeness read
	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	
	Points freeness to be subtracted										Points freeness to be added											
20	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	0	2	3	5	7	9	11	13	15	17	19	20
30	..	..	..	..	..	10	8	6	4	2	0	2	4	6	8	10	13	15	17	19	21	30
40	22	20	18	16	13	11	9	7	5	2	0	3	5	7	9	12	14	17	19	21	23	40
50	25	23	20	18	15	13	10	8	6	3	0	3	6	8	10	13	16	18	21	23	25	50
60	28	25	22	19	17	14	11	9	6	3	0	3	6	9	11	14	17	19	22	25	27	60
70	31	27	23	20	18	15	12	9	5	3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	29	70
80	33	29	25	22	19	16	13	9	6	3	0	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	80
90	36	31	27	24	21	17	13	10	7	3	0	4	7	10	13	16	20	23	26	29	32	90
100	38	33	29	26	22	18	14	10	7	3	0	4	7	11	14	17	21	24	27	30	34	100
110	40	35	31	27	23	19	15	11	7	3	0	4	8	11	14	18	22	25	28	31	35	110
120	42	37	33	29	24	19	15	11	7	3	0	4	8	11	15	19	23	26	29	33	36	120
130	44	39	35	30	25	20	16	12	8	4	0	4	8	12	15	20	24	27	31	35	38	130
140	46	41	36	31	26	21	17	12	8	4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	140
150	48	42	37	32	27	22	17	12	8	4	0	4	8	12	16	21	25	30	34	38	42	150
160	50	44	39	33	28	23	18	13	9	4	0	4	8	13	17	22	26	31	35	39	43	160
170	52	46	40	34	29	24	19	14	10	5	0	5	9	14	18	23	27	32	36	41	45	170
180	54	48	42	36	30	25	20	15	10	5	0	5	10	15	19	24	28	33	37	42	46	180
190	56	49	43	37	31	26	20	15	10	5	0	5	10	15	19	24	28	33	38	43	47	190
200	58	51	45	38	32	26	21	15	10	5	0	5	10	15	20	25	29	34	39	44	48	200
210	60	53	46	39	33	27	21	15	10	5	0	5	10	16	21	26	30	35	40	45	49	210
220	61	54	47	40	34	28	22	16	10	5	0	5	11	16	21	26	31	36	41	46	50	220
230	62	55	48	41	35	28	22	17	11	5	0	6	12	17	22	27	32	37	42	47	51	230
240	63	56	49	42	36	29	23	17	11	5	0	6	12	17	23	28	33	38	43	48	53	240
250	64	57	50	43	37	30	23	17	11	5	0	6	12	18	23	29	34	39	44	49	54	250
260	65	58	51	44	37	30	24	18	12	6	0	7	13	19	24	30	35	40	45	50	55	260
270	67	59	52	45	38	31	25	19	12	6	0	7	13	19	25	31	36	41	46	51	56	270
280	66	60	53	46	39	32	25	19	12	6	0	7	13	19	25	31	36	41	47	52	57	280
290	70	62	54	47	40	33	26	19	13	6	0	7	13	19	25	31	36	42	47	52	57	290
300	72	64	56	48	41	34	27	20	13	6	0	7	13	19	25	31	36	42	48	53	58	300
310	73	65	57	49	41	34	27	20	13	7	0	7	13	19	25	31	37	43	48	53	58	310
320	75	66	58	50	42	35	27	20	13	7	0	7	13	19	25	31	37	43	48	53	58	320
330	77	68	59	51	43	35	27	20	13	7	0	7	13	19	25	32	38	43	48	53	58	330
340	78	69	60	52	43	35	27	20	13	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	340
350	79	70	61	52	43	35	27	20	13	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	350
360	80	70	61	52	43	35	28	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	360
370	81	71	61	52	44	36	28	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	370
380	81	71	61	52	44	36	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	380
390	82	72	62	53	45	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	390
400	82	72	62	53	45	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	400
420	83	72	62	54	45	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	420
440	83	73	63	54	45	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	54	59	440
460	83	73	63	54	45	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	44	49	53	58	460
480	83	73	63	54	46	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	38	42	47	52	57	480
500	83	73	63	54	46	37	29	21	14	7	0	7	14	20	26	32	36	41	46	51	56	500
520	82	72	62	53	44	36	28	21	14	7	0	7	13	19	25	30	35	40	45	50	55	520
540	80	71	62	53	44	36	28	21	14	7	0	6	12	18	24	29	34	39	44	49	54	540
560	78	69	60	51	43	35	28	21	14	7	0	6	12	17	22	27	32	37	42	47	52	560
580	76	67	58	50	42	34	27	20	13	6	0	6	12	16	22	27	32	37	42	46	50	580
600	75	66	58	50	42	34	27	20	13	6	0	6	11	16	21	26	31	36	40	44	48	600
620	74	65	57	49	41	33	26	19	12	6	0	5	10	15	20	25	30	34	38	42	47	620
640	73	64	56	48	40	32	25	18	12	6	0	5	10	15	20	25	29	33	37	41	46	640
660	71	63	55	47	39	31	24	17	11	6	0	5	9	14	19	24	28	31	35	39	45	660
680	70	63	55	46	39	31	24	16	11	5	0	4	9	13	18	23	27	30	34	38	44	680
700	69	62	54	46	38	30	23	16	11	5	0	4	8	13	18	22	26	29	33	37	42	700

ภาคผนวก ฉ

06-0226 Wavelength= 1.54184

CaSO4

Calcium Sulfate

Anhydrite, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Ni BetaM d-sp:

Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.:

Ref: Swanson et al., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 4, 65 (1955)

Sys.: Orthorhombic S.G.: Bbmm (63)

a: 6.992 b: 6.998 c: 6.238 A: 0.9991 C: 0.8914

α: β: γ: Z: 4 mp:

Ref: Hartman, P., Eur. J. Mineral., 1, 721 (1989)

Dx: 2.963 Dm: 2.980 SS/FOM: F_{30}=16(.034, 55)

εα: 1.570 ηωβ: 1.575 εγ: 1.614 Sign:+ 2V:40

Ref: Ibid.

Color: Colorless
X-ray pattern at 26 C. Prepared from K2 S O4 and Ca Cl2 . Precipitated and heated at 700 C for 16 hours. Spectroscopic analysis: <0.1% Bi, Sr, Ti; <0.01% Ag, Al, Fe, Mg, Ni, Sm; <0.001% Ba, Cr, Cu, Pb; <0.0001% Mn. PSC: oC24. Deleted by 37-1496. Mwt: 136.14. Volume[CD]: 305.23.

2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
22.981	6	1	1	1	80.003	2	2	5	2
25.464	100	0	2	0	81.745	<1	3	5	1
28.629	4	0	0	2	82.752	4	0	6	0
31.399	35				82.856	2	6	0	0
31.998	4	1	2	1	84.344	2	4	1	4
36.328	8	2	2	0	88.359	6	2	6	0
38.677	20	0	2	2	88.541	4	2	4	4
40.871	20	2	1	2	91.255	2	6	1	2
41.360	8	3	0	1					
43.378	10	1	3	1					
45.513	6	1	0	3					
46.880	4	2	2	2					
48.721	16	3	2	1					
49.198	4								
52.307	12	0	4	0					
52.339	10	4	0	0					
55.782	14	2	3	2					
57.847	4	3	3	1					
59.065	6	4	2	0					
60.732	4	4	0	2					
61.176	2	3	1	3					
62.316	6	4	1	2					
65.555	4	2	0	4					
65.867	2	3	2	3					
66.932	4	4	2	2					
67.041	2	2	1	4					
68.774	2	3	4	1					
71.532	4	2	2	4					
73.003	2	2	5	0					
74.270	6	4	3	2					
77.103	2	4	4	0					
78.689	4	2	3	4					

©1995 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

46-1045 Wavelength= 1.5405981

SiO2

Silicon Oxide

Quartz, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Ge Mono d-sp: Diffractometer

Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 3.41

Ref: Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany, ICDD Grant-in-Aid, (1993)

Sys.: Hexagonal S.G.: $P3_221$ (154)

a: 4.91344(4) b: c: 5.40524(8) A: C: 1.1001

α: β: γ: Z: 3 mp:

Ref: Ibid.

Dx: 2.649 Dm: 2.660 SS/FOM: F_{30}=539(.0018, 31)

εα: ηωβ: 1.544 εγ: 1.553 Sign: + 2V:

Ref: Swanson, Fuyat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 3, 24 (1954)

Color: White
Integrated intensities. Pattern taken at 23(1) C. Low temperature quartz.α determination based on profile fit method. O2 Si type. Quartz group. Silicon used as an internal stand. PSC: hP9. To replace 33-1161. Mwt: 60.08. Volume[CD]: 113.01.

d Å	Int	h	k	l	d Å	Int	h	k	l
4.25499	16	1	0	0	1.06380	<1	4	0	0
3.34347	100	1	0	1	1.04772	1	1	0	5
2.45687	9	1	1	0	1.04380	<1	4	0	1
2.28149	8	1	0	2	1.03461	1	2	1	4
2.23613	4	1	1	1	1.01490	1	2	2	3
2.12771	6	2	0	0	.989576	<1	1	1	5
1.97986	4	2	0	1	.987246	<1	3	1	3
1.81796	13	1	1	2	.978345	<1	3	0	4
1.80174	<1	0	0	3	.976174	<1	3	2	0
1.67173	4	2	0	2	.960785	<1	3	2	1
1.65919	2	1	0	3	.928526	<1	4	1	0
1.60827	<1	2	1	0	.918159	<1	3	2	2
1.54153	9	2	1	1	.916060	2	4	0	3
1.45289	2	1	1	3	.915176	2	4	1	1
1.41841	<1	3	0	0	.908890	<1	2	2	4
1.38210	6	2	1	2	.900851	<1	0	0	6
1.37496	7	2	0	3	.897188	<1	2	1	5
1.37188	5	3	0	1	.888910	1	3	1	4
1.28791	2	1	0	4	.881352	<1	1	0	6
1.25595	3	3	0	2	.878167	<1	4	1	2
1.22832	1	2	2	0	.859796	<1	3	0	5
1.19982	2	2	1	3	.845837	<1	1	1	6
1.19779	<1	2	2	1	.840746	<1	5	0	1
1.18399	2	1	1	4	.835918	<1	4	0	4
1.18017	2	3	1	0	.829560	1	2	0	6
1.15298	1	3	1	1	.825393	2	4	1	3
1.14065	<1	2	0	4	.818911	<1	3	3	0
1.11455	<1	3	0	3	.811682	3	5	0	2
1.08155	2	3	1	2	.809668	<1	3	3	1

©1996 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

33-0311 Wavelength= 1.54184

CaSO4·2H2O

Calcium Sulfate Hydrate

Gypsum, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Mono d-sp: Diffractometer

Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 1.83

Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 17, 16 (1980)

Sys.: Monoclinic S.G.: C2/c (15)

a: 6.2845(11) b: 15.2079(15) c: 5.6776(7) A: 0.4132 C: 0.3733

α: β: 114.09(1) γ: Z: 4 mp:

Ref: Ibid.

Dx: 2.308 Dm: 2.320 SS/FOM$_{30}$=51(.0120, 49)

ωα: 1.521 ηωβ: 1.523 εγ: 1.530 Sign: + 2V: 58

Ref: Winchell, A., Elements of Optical Mineralogy, 2, 157 (1951)

Color: Colorless
Pattern taken at 25 C. Sample prepared by adding H2 S O4 to a Ca (N O3)2 solution; the precipitate was filtered out, washed in water and bottled while moist; the crystals were dried immediately before use with care taken to prevent dehydration. Preferred orientation enhances 0k0 reflections. Gypsum group, gypsum subgroup. Silicon used as an internal stand. PSC: mC48. To replace 6-46 and validated by calculated pattern 36-432. Mwt: 172.17. Volume[CD]: 495.37.

2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
11.598	100	0	2	0	53.618	1	1	5	2
20.739	100	0	2	1	54.468	3	0	2	3
23.416	17	0	4	0	55.200	6	$\bar{2}$	4	3
23.416	17	1	3	0	55.871	4	2	6	1
28.132	4	1	1	1	56.798	9	$\bar{2}$	8	1
29.135	75	0	4	1	56.798	9	1	9	0
31.130	45	$\bar{2}$	2	1	57.590	1	$\bar{1}$	9	1
32.093	10	1	1	2	58.223	4	2	8	0
32.781	2	1	3	1	60.395	2	0	8	2
33.371	35	1	5	0	60.913	1	0	10	0
33.371	35	2	2	0	60.913	1	$\bar{4}$	2	2
34.537	6	$\bar{1}$	5	1	61.315	1	$\bar{2}$	8	2
35.424	2	0	6	0	61.937	<1	1	9	1
35.996	11	$\bar{2}$	0	2	62.098	<1	$\bar{2}$	6	3
36.282	1	$\bar{1}$	3	2	63.789	3	$\bar{3}$	7	2
36.650	6	0	2	2	63.789	3	0	10	1
37.376	4	$\bar{2}$	4	1	64.777	5	$\bar{4}$	4	1
39.327	<1	2	4	0	64.970	3	3	7	0
40.659	15	1	5	1	65.359	2	2	8	1
42.189	2	0	4	2	65.359	2	0	6	3
43.378	25	$\bar{2}$	4	2	65.878	3	$\bar{2}$	0	4
43.642	15	$\bar{1}$	5	2	66.743	2	$\bar{4}$	2	3
43.642	15	3	1	1	68.733	5	2	6	2
44.225	6	1	1	2	68.733	5	2	10	1
44.592	<1	1	7	0	70.003	1	1	11	0
45.537	4	$\bar{1}$	7	1	70.003	1	2	10	0
46.248	3	$\bar{2}$	6	1	70.704	2	$\bar{1}$	11	1
47.881	16	0	8	0	71.084	4	$\bar{2}$	8	3
47.881	16	2	6	0	71.257	4	4	6	2
48.431	12	$\bar{2}$	4	1	74.168	1	0	8	3
48.832	3	$\bar{1}$	1	3	74.598	<1	1	11	1
50.365	13	0	6	2	74.929	<1	0	12	0
50.733	6	$\bar{2}$	2	3	76.293	3	4	6	0
51.193	9	0	8	1	76.293	3	$\bar{4}$	0	4
51.376	12	$\bar{2}$	6	2	76.583	2	2	10	1

2θ	Int	h	k	l
77.355	3	2	8	2
77.556	2	$\bar{4}$	2	4
77.556	2	0	12	1

©1995 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

05-0586 Wavelength= 1.54184

CaCO3

Calcium Carbonate

Calcite, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Ni BetaM d-sp:

Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 2.00

Ref: Swanson, Fuyat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, II, 51 (1953)

Sys.: Rhombohedral S.G.: R$\bar{3}$c (167)

a: 4.989 b: c: 17.062 A: C: 3.4199

α: β: γ: Z: 6 mp:

Ref: Ibid.

Dx: 2.711 Dm: 2.710 SS/FOM$_{30}$=57(.0159, 33)

ωα: 1.487 ηωβ: 1.659 εγ: Sign: - 2V:

Ref: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., II, 142

Color: Colorless
Pattern taken at 26 C. Sample from Mallinckrodt Chemical Works. CAS #: 13397-26-7. Spectroscopic analysis: <0.1% Sr; <0.01% Ba; <0.001% Al, B, Cs, Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn. Other form: aragonite. Pattern reviewed by Parks, J., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1992). Agrees well with experimental and calculated patterns. Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed. Calcite group, calcite subgroup. PSC: hR10. Mwt: 100.09. Volume[CD]: 367.78.

2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
23.041	12	0	1	2	103.068	1	2	3	2
29.430	100	1	0	4	104.017	1	[1	3	10]
31.444	3	0	0	6	104.242	3	1	2	14
35.996	14	1	1	0	105.968	2	3	2	4
39.435	18	1	1	3	106.268	4	0	4	8
43.182	18	2	0	2	107.459	<1	0	2	16
47.164	5	0	2	4	109.692	2	4	1	0
47.530	17	0	1	8	110.617	2	2	2	12
48.555	17	1	1	6					
56.604	4	2	1	1					
57.452	8	1	2	2					
58.126	2	1	0	10					
60.732	5	2	1	4					
61.042	4	2	0	8					
61.400	3	1	1	9					
63.117	2	1	2	5					
64.737	5	3	0	0					
65.659	3	0	0	12					
69.295	1	2	1	7					
70.303	2	0	2	10					
72.938	2	1	2	8					
73.798	1	3	0	6					
76.373	1	2	2	0					
77.251	2	1	1	12					
81.011	<1	3	1	2					
81.627	3	2	1	10					
82.194	<1	0	1	14					
83.850	3	1	3	4					
84.872	1	2	2	6					
86.570	<1	1	2	11					
93.170	1	2	0	14					
94.801	3	4	0	4					
95.112	4	3	1	8					
96.268	2	1	0	16					
97.753	<1	2	1	13					
99.269	2	3	0	12					
102.357	<1	3	2	1					

©1995 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

ประวัติผู้วิจัย

นาย นารถพล บัวอำไพ เกิดวันที่ 5 เมษายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้น ปีการศึกษา 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย