

สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนปลาสเตอร์



นายบรรเทิง จุนใจ

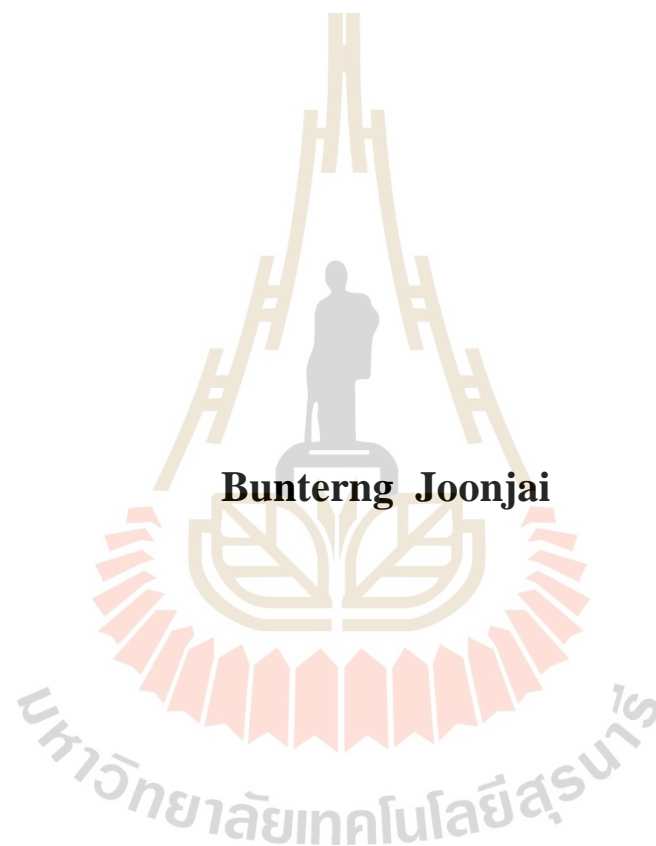
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**GYPSUM PROPERTIES OF PLASTER MIXED
WITH MELAMINE WASTE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Doctor of Engineering in Manufacturing Engineering**

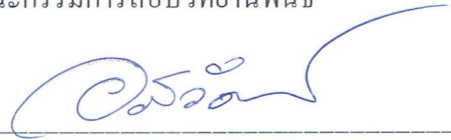
Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนพลาสเตอร์

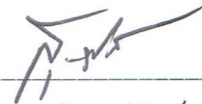
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



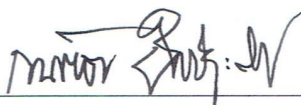
(ผศ. ดร.จรรณวนัช บุ่งสุด)

กรรมการ



(อ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บรรเทิง จุนใจ : สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนพลาสติก (GYPSUM PROPERTIES OF PLASTER MIXED WITH MELAMINE WASTE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์, 134 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติของยิปซัมที่เกิดจากการใช้เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (MFW) ทดแทนปูนพลาสติกบางส่วน โดยใช้ MFW ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตภาพขณะเมลามีนมาผ่านเครื่องบดและร่อนจนได้ขนาด 0-200, 200-500, 500-1,000 และ 1,000-5,000 ไมโครเมตร นำมาเติมในสัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของปูนพลาสติกในอัตราส่วนน้ำต่อปูนพลาสติก (WGR) 0.75 ส่วนผสมจะถูกผสมและหล่อลงในแบบขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร และทิ้งในแนวตั้งด้วยแท่งเหล็กกลมทิ้งไว้ 60 นาที ถอดออกจากแบบหล่อและผึ่งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบค่าความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ ค่าการต้านแรงดัด ค่าการต้านแรงอัด และค่าความหนาแน่น ผลการศึกษาพบว่าค่าการก่อดั้วระยะต้นและค่าการก่อดั้วระยะปลายเพิ่มมากขึ้นในชิ้นตัวอย่างผสม MFW แสดงถึงความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันของ MFW นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่ผสม MFW มีความแข็งแรงสูงขึ้น การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อผสม MFW มากขึ้น ค่าการต้านแรงดัด และค่าการต้านแรงอัดลดลง สอดคล้องกับความหนาแน่นที่ลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าการต้านแรงดัดและค่าการต้านแรงอัดยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE-EN 13276-1 : 2009 ที่ต้องสูงกว่า 1 และ 2 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพการผสม MFW เป็นสารหน่วงในการผลิตแผ่นยิปซัม โดยยังคงมีสมบัติทางกลตามเกณฑ์มาตรฐาน และช่วยลดน้ำหนักของแผ่นยิปซัมได้อีกด้วย และจากการทดวิจัยพบว่าควรใช้ MFW ขนาด 200-500 ไมโครเมตร ในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก

BUNTERNG JOONJAI : GYPSUM PROPERTIES OF PLASTER MIXED
WITH MELAMINE WASTE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUPAKIT
ROOPPAKHUN, Ph.D., 134 PP.

GYPSUM/MELAMINE WASTE/PROPERTIES

This research was aimed to investigate properties of gypsum plaster mixed with melamine formaldehyde waste (MFW). The MFW was from melamine ware production processes. The MFW was ground and sieved to size 0-200, 200-500, 500-1,000 and 1,000-5,000 micrometers. The specimen was prepared by mixing gypsum plaster and MFW at 5, 10 and 20% of plaster weight with constant water to gypsum ratio (WGR) 0.75. The sample were casted in prism block size 40×40×160 mm and poked with metal rod. Then, the casted samples were rested at room temperature for 60 minutes, taken off from the block, put in room temperature for 24 hours and dried in drying cupboard at 45 °C for 48 hours. After that, the prism samples were tested for hardness, water absorption, flexural strength, compressive strength and density. The experimental results revealed that the mixing of MFW into gypsum yields the increasing of initial setting time and final setting time. These results implied that MFW might acting as retarder in rehydration reaction. Surface hardness and water absorption were found to increase with increasing MFW. The decreasing of flexural strength and compressive strength were shown as increasing of MFW and conformed with decreasing of density. However, the flexural and compressive strengths still met the minimum requirement of UNE-EN 13276-1:2009 at 1 and 2 MPa respectively. It could be concluded that MFW had potential as retarder in gypsum board manufacturing with acceptable mechanical

properties following UNE-EN. The appropriate particle size of MFW was 200-500 micrometer and 10% by plaster weight.



School of Manufacturing Engineering

Academic year 2019

Student's Signature Buntemy S.

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยศึกษาต่อในระดับปริญญาโทเมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีผ่านไปแล้ว 12 ปี ด้วยเหตุผลเรื่องความรับผิดชอบต่อครอบครัวเป็นหลัก จนมาถึงวันที่สามารถจัดการเรื่องทุนการศึกษาได้เอง ผู้วิจัยจึงศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกแบบต่อเนื่องทันที โดยมีกำลังใจหลักคือ บิดา-มารดา ชาวนาวิถีดั้งเดิมผู้ขาดโอกาสทางการศึกษา ต้นแบบคนสู้ชีวิตที่เล็งเห็นคุณค่าของการศึกษา จนสามารถส่งเสียบุตร 5 คนจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ทั้งหมด นอกจากนี้กำลังใจจากภรรยา-บุตร และพี่น้อง ก็เป็นส่วนช่วยให้ผู้วิจัยไม่เคยคิดจะละทิ้งเป้าหมาย แม้ระหว่างทางจะพบความยากลำบากจากการบริหารจัดการเวลาให้ครอบครัว การทำงาน การเดินทาง และการศึกษาที่ตาม ทั้งนี้ด้วยความเมตตาและความช่วยเหลืออย่างจริงใจจากอาจารย์ เจ้าหน้าที่ บุคลากร และพี่น้องนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นมานั้นสามารถแก้ไขได้ในทุกกรณี

นอกจากบุคคลดังกล่าวไปข้างต้น ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณวิทยาทานจากครูและอาจารย์ โรงเรียนคำม่วงจรัสวิทย์ และโรงเรียนคำม่วง อำเภอคำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ โรงเรียนถาวรานุกุล อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นแสงสว่างนำทางจนผู้วิจัยมีอาชีพเลี้ยงคน มีศีลธรรม และสติปัญญา ที่ร่วมสร้างสรรค์สังคมที่ดีตลอดไป โดยเฉพาะผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ซึ่งเป็นผู้แนะนำและให้แนวทางความช่วยเหลือทุกอย่าง และอาจารย์คณะกรรมการสอบทุกท่านที่กรุณาสละเวลาที่มีคุณค่าของท่านมาเข้ารับฟังการบรรยายพร้อมให้คำชี้แนะที่มีคุณค่ามหาศาลสำหรับผู้วิจัย ผู้วิจัยขอรับรองว่าจะนำความรู้ความสามารถ และประสบการณ์ จากการศึกษางานวิจัยนี้ไปต่อยอด และพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุดในแวดวงอุตสาหกรรมของประเทศไทย แม้จะเป็นเพียงกลไกเล็ก ๆ แต่ก็จะทำจนสุดความสามารถเท่าที่เวลา และโอกาสจะเอื้ออำนวยตลอดไป

บรรเทิง จุนใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ความเข้าใจเรื่องวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials).....	7
2.1.1 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC).....	8
2.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC).....	9
2.1.2.1 แบบอนุภาคเสริมแรง.....	9
2.1.2.2 แบบเส้นใยเสริมแรง.....	9
2.1.2.3 แบบวิสเกอร์ (Whisker).....	9
2.1.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC).....	9
2.1.3.1 เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix).....	10
2.1.3.2 เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix).....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยิปซัม (Basic knowledge of Gypsum).....	10
2.2.1	ความหมายและที่มา.....	10
2.2.2	ประเภทของแร่ยิปซัม.....	11
2.2.2.1	ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum).....	11
2.2.2.2	ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum).....	18
2.2.3	เทคโนโลยีการผลิตแผ่นยิปซัม.....	22
2.2.4	แผ่นยิปซัมตัวอย่างที่ขายในประเทศไทย.....	32
2.2.5	มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการผลิตแผ่นยิปซัม.....	34
2.2.6	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัม.....	35
2.3	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมลามีน (Basic knowledge of Melamine).....	46
2.3.1	ความหมายและที่มา.....	46
2.4	การนำความร้อน (Thermal conduction).....	50
2.5	การวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิค X-ray diffraction.....	51
2.6	การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review).....	52
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	66
3.1	วัตถุดิบที่ใช้และวิธีการทดลอง.....	66
3.1.1	แร่ยิปซัม.....	66
3.1.2	ปูนปลาสเตอร์หรือสตั๊กโก้.....	72
3.1.3	เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde Waste, MFW).....	79
3.1.4	น้ำ (Water).....	82
3.2	วิธีการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบวัสดุเชิงประกอบ.....	83
3.2.1	การทดสอบค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time; IS).....	83
3.2.2	การทดสอบค่าการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time; FS).....	83
3.2.3	ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	85
3.2.4	ค่าการต้านแรงคด (Flexural strength).....	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.2.5	ค่าการต้านแรงอัด (Compressive strength).....	86
3.2.6	การวัดค่าความหนาแน่น (Density).....	86
3.2.7	การวัดค่าการขยายตัว (Expansion).....	87
3.2.8	ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Surface hardness).....	87
3.2.9	การวิเคราะห์โครงสร้างของยิปซัมกับเศษเมลามีน พอร์มาลดีไฮด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM).....	87
3.2.10	การวิเคราะห์โครงสร้างของยิปซัมกับเศษเมลามีน พอร์มาลดีไฮด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	88
3.2.11	การวิเคราะห์หาสารองค์ประกอบที่เกิดขึ้นของยิปซัม กับเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer).....	88
3.2.12	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conduction).....	89
3.3	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	89
4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล.....	90
4.1	ผลวิเคราะห์แร่ยิปซัม.....	91
4.2	ผลการวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์.....	91
4.2.1	ผลวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์ตามวิธีการใน มอก.188-2547.....	91
4.2.2	ผลวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์ตามวิธีการเฉพาะของบริษัท ผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี.....	93
4.3	ผลวิเคราะห์เศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์.....	93
4.4	ผลการวิเคราะห์น้ำประปา.....	94
4.5	ผลทดสอบค่าการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ.....	95
4.6	ผลทดสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ.....	97
4.7	ผลทดสอบการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ.....	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8	ผลทดสอบค่าการต้านแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบ.....	101
4.9	ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ.....	102
4.10	ผลทดสอบค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ.....	103
4.11	ผลทดสอบค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ.....	103
4.12	การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจาก กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล.....	104
4.13	การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	105
4.14	การตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	107
4.15	ผลทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ.....	108
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1	ค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ.....	110
5.2	ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ.....	110
5.3	การขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ.....	111
5.4	ค่าการต้านแรงดัดและค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ.....	111
5.5	ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ.....	111
5.6	ค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ.....	112
5.7	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ.....	112
5.8	ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ.....	112
5.9	ข้อเสนอแนะ.....	113
	รายการอ้างอิง.....	114
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	119
	ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงอุณหภูมิ และ Phase ที่เปลี่ยนไปของแร่ยิปซัมจากการแคลซิเนชัน	25
2.2 การเผาแร่ยิปซัมให้ได้ค่าสมบูรณ์แบบตามทฤษฎี (Perfect Calcination)	26
2.3 ค่าควบคุมของปูนพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง มอก.188-2547	35
2.4 ผลจากปัจจัยต่าง ๆ ในแร่ยิปซัมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	36
2.5 คุณสมบัติของเมลามีน (Melamine properties)	48
2.6 สมบัติทางกล และทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	50
3.1 วัตถุประสงค์แร่ยิปซัมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี	66
3.2 ข้อกำหนดมาตรฐานปูนพลาสติกตาม มอก. 188-2547 ที่ใช้ในการทดลอง	73
3.3 ข้อกำหนดมาตรฐานปูนพลาสติกของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งใน จังหวัดสระบุรี	73
3.4 ข้อกำหนดคุณภาพน้ำประปาที่ใช้ในโรงงานผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งใน จังหวัดสระบุรี	82
3.5 สัดส่วนผสมระหว่างปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์โดยน้ำหนัก	84
4.1 วัตถุประสงค์แร่ยิปซัมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี	91
4.2 ผลการวิเคราะห์ปูนพลาสติกที่นำมาใช้ในการทดลอง	92
4.3 ค่าการวิเคราะห์ปูนพลาสติกเพิ่มเติมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งใน จังหวัดสระบุรี	93
4.4 ผลวิเคราะห์เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	93
4.5 แสดงค่าน้ำประปา	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และ ลักษณะของสารเสริมแรง.....	8
2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ.....	10
2.3 แร่ใยชัมชนิดซาตินสปาร์.....	11
2.4 แร่ใยชัมชนิดอะลาบาสเตอร์.....	11
2.5 แร่ใยชัมชนิดซีทีไนต์.....	12
2.6 แหล่งแร่ใยชัมขนาดใหญ่ในประเทศไทย.....	12
2.7 รูปร่างของแร่ใยชัมลักษณะอื่น ๆ ที่พบเห็นได้.....	13
2.8 รูปร่างของผลึกแร่ใยชัมธรรมชาติในแหล่งต่าง ๆ ของโลก.....	13
2.9 สันฐานของแร่ใยชัมมีรูปร่างแบบมอโนคลินิก (Monoclinic).....	14
2.10 การเปิดหน้าดิน 6-8 เมตรลงไปจนพบแผ่นใยชัม.....	14
2.11 แผ่นใยชัมที่อยู่ไม่ลึกจากหน้าผิวดิน.....	15
2.12 ลักษณะแผ่นใยชัมที่โผล่พ้นผิวดินจนกลายเป็นเหมือนภูเขาขนาดย่อม.....	15
2.13 เครื่องเจาะรูเพื่อวางวัตถุระเบิด.....	16
2.14 รูที่เจาะบนแผ่นใยชัมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 76 มิลลิเมตร.....	16
2.15 รูปวัตถุระเบิดและการระเบิดแผ่นใยชัม.....	17
2.16 รูปเครื่องบดแร่ใยชัม Jaw Crusher.....	17
2.17 แร่ใยชัมที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดแล้วจากอาคารบดแร่.....	18
2.18 รถบรรทุกการตักแร่ละเอียดขนาดน้อยกว่า 20 มิลลิเมตรขึ้นบนรถ เพื่อนำส่งลูกค้า.....	18
2.19 ขั้นตอนการเกิด FGD จากการเผาถ่านหิน.....	19
2.20 การเกิด FGD.....	19
2.21 การเกิดฝนกรด (Acid rain).....	21
2.22 ผลึกใยชัมสังเคราะห์แต่ละชนิด.....	21
2.23 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นใยชัม.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 Claudius-Peters Mill	23
2.25 (a) Pfeiffer Mill-MPS และ (b.) The 3 rollers inside mill.....	24
2.26 Impact / Hammer Mill (Imp-Mill).....	24
2.27 กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) หรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration).....	25
2.28 Calcium sulphate phase diagram	26
2.29 การเผาแร่ยิปซัมที่ขนาดแร่เข้าต่างกันที่อุณหภูมิและเวลาเผาเท่ากัน	27
2.30 การฉีด Slurry ลงบนกระดาษรองด้านล่าง.....	29
2.31 สายพานเช้ทตัว.....	30
2.32 ความยาวของสายพานเช้ทตัว	30
2.33 การตัดบอร์ดเป็นแผ่น	31
2.34 การพลิกบอร์ดก่อนเข้าตู้อบบอร์ด	31
2.35 (a) ตู้อบแผ่นยิปซัม และ (b) การลำเลียงแผ่นยิปซัมเข้าตู้อบ	32
2.36 แผ่นยิปซัมประเภททั่วไป (Standard) ความหนาตั้งแต่ 9 mm ขึ้นไป.....	32
2.37 แผ่นยิปซัมประเภททนความร้อน (Heat Shield) ความหนาตั้งแต่ 9 mm ขึ้นไป	33
2.38 แผ่นยิปซัมประเภททนความชื้น (Moist Shield) ความหนาตั้งแต่ 9 mm ขึ้นไป	33
2.39 แผ่นยิปซัมประเภททนไฟ (Fire Shield) ความหนาตั้งแต่ 13 mm ขึ้นไป.....	33
2.40 แผ่นยิปซัมประเภทกันเสียงสะท้อน (Sound Shield) ความหนาตั้งแต่ 13 mm ขึ้นไป	34
2.41 แผ่นยิปซัมประเภทกันกระแทก (Dense Shield) ความหนาตั้งแต่ 15 mm ขึ้นไป	34
2.42 แร่ยิปซัมไว้ในโกดังที่มีหลังคาจะป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้ามาได้มาก	36
2.43 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Tapioca Starch)-แป้งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในการผลิตแผ่นยิปซัมในประเทศไทย.....	38
2.44 ช่วงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของความหนืดแป้ง	39
2.45 การพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น.....	39
2.46 ช่วงบริเวณรอยต่อของแกนยิปซัม และกระดาษ คือ จุดที่มีปริมาณแป้งมากที่สุด	40
2.47 การทำงานของสารช่วยกระจายตัวโดยไมเซลล์.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.48 การแผ่ขยายของ Slurry จาก “Splash Test”	41
2.49 คีเลต DTPA ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยารีดิวซ์ไฮดรเจน	43
2.50 รูปพรุนในแกนแผ่นยิปซัมที่เกิดจากสารก่อโฟม	44
2.51 ม้วนกระดาษที่ใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัม	45
2.52 ปฏิกิริยาการเกิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	47
2.53 สูตรโครงสร้างของเมลามีน	48
2.54 เครื่องใช้ในครัวที่ผลิตมาจากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	49
2.55 (a.) การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง และ (b.) การแทรกสอดแบบหักล้าง	52
2.56 แบบจำลอง Bragg’s Law	53
2.57 ตัวอย่าง Peak ของ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	54
3.1 (a.) และ (b.) แสดงแรียปซัมแบบก้อน และแบบป่นที่ป่นกันมา	68
3.2 (a.) – (1.) แสดงแรียปซัมขนาดต่างๆ ที่ป่นกันมาเมื่ออบแห้งแล้ว ร้อนผ่านตะแกรง	68
3.3 (a.) และ (b.) เครื่อง Precisa XM 120-HR	69
3.4 เตาเผา (Muffle Furnace) Nabertherm รุ่น B-180	70
3.5 ตะแกรง (Sieve) ที่ใช้ร้อนแรียปซัม	70
3.6 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ Mettler Toledo	71
3.7 เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 410	72
3.8 เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 926	73
3.9 การหาค่า WSR/WGR	76
3.10 ค่าความชื้นเหลวมาตรฐาน	77
3.11 ไวแคต (Vicat)	78
3.12 (a.) เครื่อง Alpine ยี่ห้อ Hosokawa Alpine รุ่น e200LS (b.) ตะแกรงมาตรฐานขนาดต่าง ๆ	80
3.13 เศษคริบเมลามีนที่ได้จากการตกแต่งขอบผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต ของโรงงาน	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 เครื่องบดเศษครีบบเมลามีน Retsch รุ่น ZM200	81
3.15 เศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่ผ่านการบดและร่อนแยก (a.) ขนาดน้อยกว่า 200 (b.) 200-500 (c.) 500-1,000 และ (d.) 1,000-5,000 ไมโครเมตร.....	82
3.16 แท่งปริซึมขนาด 40 x 40 x 160 มิลลิเมตร	85
3.17 (a) เครื่องทดสอบค่าการต้านแรงดัดขณะกดชิ้นงาน (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบค่าการต้านแรงดัดแล้ว	86
3.18 รูปแบบแรงกดของการทดสอบการต้านแรงดัด.....	87
3.19 ทิศทางต่าง ๆ ของการวัดขนาดชิ้นงาน.....	87
3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น CX23	88
3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น QUANTA 450, FEI- EDS (XMax50 SDD, Oxford)	89
3.22 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab.....	90
3.23 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	90
4.1 การก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time) ของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบ โดยใช้ไ่ว้แกท.....	96
4.2 การก่อดั้วระยะปลาย (Final setting time) ของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบ โดยใช้ไ่ว้แกท.....	97
4.3 ถังผสม (Mixer) ของกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม	98
4.4 ค่าความหนาแน่น (Density) ของวัสดุเชิงประกอบ	99
4.5 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านกว้างของวัสดุเชิงประกอบ.....	100
4.6 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านสูงของวัสดุเชิงประกอบ	101
4.7 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านยาวของวัสดุเชิงประกอบ.....	101
4.8 แบบหล่อตัวอย่างที่เปิดผิวหน้าด้านสูงไว้ 1 ด้าน	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่าการต้านแรงคด (Flexural strength) ของวัสดุเชิงประกอบ	102
4.10 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของวัสดุเชิงประกอบ	103
4.11 ค่าการต้านแรงอัด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบ	104
4.12 ค่าความแข็งของพื้นผิว (Surface hardness) ของวัสดุเชิงประกอบ	105
4.13 ภาพถ่ายผิวกระจกของ PSM 05/10 ที่สัดส่วนผสม P90M10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง (Optical Microscope ; OM) กำลังขยาย 50X	106
4.14 ภาพขยายปูนพลาสติกหลังก่อตัวเป็นยิปซัมด้วย SEM (15,000X).....	107
4.15 ภาพขยายชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกผสมเสกเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ด้วย SEM (500X).....	107
4.16 การเตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่อง XRD	108
4.17 (a) กราฟ XRD ของตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) (b) กราฟ XRD ของตัวอย่าง หมายเลข 6 (c) กราฟ XRD ของตัวอย่างหมายเลข 12	109
4.18 ค่าการนำความร้อน (Thermal conduction) ของวัสดุเชิงประกอบที่สัดส่วน การผสมปูนพลาสติก 90% และ MFW 10%.....	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การผลิต คือ กระบวนการแปรสภาพทรัพยากรที่เป็นปัจจัยนำเข้าจนได้ผลผลิตออกมา ซึ่งอาจเป็นสินค้า ผลิตภัณฑ์ หรือบริการก็ได้ (จักรพงษ์ ขวัญแก้ว, 2554) โดยมีปัจจัยป้อนกลับที่ใช้เพื่อปรับปรุงปัจจัยนำเข้าและกระบวนการแปรสภาพให้ได้ผลลัพธ์ที่พึงพอใจมากขึ้น แต่แม้จะมีการควบคุมกระบวนการแปรรูปมากเท่าใด ผลผลิตที่ได้ก็ยังไม่เท่ากับปัจจัยที่นำเข้าไป เนื่องจากสภาพวัตถุดิบหรือกระบวนการแปรรูป ทำให้เกิด “ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต (Byproduct)” ซึ่งส่วนใหญ่ออกมาในรูป “ของเสีย (Waste)”

การจัดการของเสียเป็นปัญหาสำหรับทุกประเทศทั่วโลก เช่น ในสหภาพยุโรปมีนโยบาย “The Directive 2008/98/EC” เพื่อกำหนดชนิดของเสีย วิธีการจัดการ วิธีการกำจัด การนำกลับมาใช้ใหม่ และข้อควรระวังในการจัดการ เป็นต้น ที่ต้องเห็นผลภายในปี ค.ศ. 2020 (Ana Jiménez Rivero et. al., 2014) ในประเทศไทยนั้นมีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง “การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548” แสดงข้อมูลประเภทของเสีย การจัดการ การขนส่ง เป็นต้น หรือสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม รณรงค์เรื่อง “3Rs” โดยคัดเลือกบริษัทต้นแบบในแต่ละจังหวัดเข้าร่วมในกิจกรรมส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมเชิงนิเวศพัฒนาไปสู่การเป็นสังคมปลอดปล่อยคาร์บอนต่ำและเพิ่มขีดความสามารถในการนำกากอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ตามหลัก 3Rs คือ ลดการใช้หรือใช้น้อยเท่าที่จำเป็น (Reduce) การใช้ซ้ำ (Reuse) และการแปรรูปกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เพื่อใช้ทรัพยากรอย่างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์ การวางแผนการผลิต ขั้นตอนผลิต วิธีการผลิต และการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นทั้งภายในโรงงาน ภายในกลุ่มอุตสาหกรรม และระหว่างกลุ่มอุตสาหกรรม อันจะทำให้อุตสาหกรรมไทยก้าวไปสู่การเป็นสังคมของการใช้วัสดุหมุนเวียนอย่างแท้จริง (สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม, 2555)

หนึ่งในของเสียที่สร้างปัญหามากที่สุดคือของเสียประเภท “พลาสติก” เพราะใช้ในปริมาณสูง และแพร่หลายกันทั่วโลก รวมไปถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้เวลานานหลายร้อยปีเพื่อย่อยสลาย ซึ่งพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้น ๆ เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเป็นของเหลวชนิดพลาสติกประเภทนี้สามารถแปรรูปกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พอลิเอสเตอร์ (Polyester) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิสไตรีน (Polystyrene) เป็นต้น

2. เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastics) พลาสติกประเภทนี้สามารถหลอมเหลวได้ในขั้นตอนแรกเท่านั้น เมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจนได้เป็นพลาสติกแบบร่างแหหรือแบบสามมิติแล้วจะไม่สามารถอ่อนตัวหรือหลอมเหลวได้อีก แต่ถ้าได้รับความร้อนสูงมาก ๆ จะทำให้พันธะที่ยึดอะตอมไว้แตกสลายตัวนำมาแปรรูปกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้ อีก เช่น เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) อีพอกซีฟีนอลิก (Epoxy phenolic) และพอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นต้น

อุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์จากเมลามีน เช่น ถ้วย ชาม จาน โตะ แก้ว เป็นต้น จะใช้เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เรซิน (Melamine formaldehyde resins) ซึ่งเป็นพลาสติกกลุ่มเทอร์โมเซตติง ที่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตจะเกิดเศษของเสียจากการตกแต่งผลิตภัณฑ์ แต่ของเสียนี้ไม่สามารถนำกลับมาหลอมให้อ่อนตัวซ้ำได้อีก (เมทินีมา ให้, 2555) ปัจจุบันพลาสติกประเภทนี้จัดการโดยวิธีฝังกลบ (Landfill) ซึ่งก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากอัตราการย่อยสลายช้าเป็นการรบกวนระบบน้ำใต้ดิน และลดอัตราการซึมผ่านของน้ำฝน ขัดขวางการเคลื่อนที่ของรากต้นไม้ได้ผิวดิน (เฉลิมชัย ไชยณรงค์, 2559) นอกจากนี้วิธีการฝังกลบยังมีขั้นตอน การจัดการ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ซึ่งหากสามารถนำขยะเทอร์โมเซตติงพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ได้ ก็จะลดมลพิษ และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการฝังกลบได้

ในขณะที่อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างภายในอาคารกำลังได้รับความนิยมน้อยลง เพราะได้พื้นที่มากในราคาที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น ติดตั้งง่าย น้ำหนักเบา วัสดุมีความปลอดภัยต่อสุขภาพผู้ใช้งาน มีความสวยงาม และใช้เวลาในการทำงานน้อย จึงเกิดการแข่งขันกันในด้านพัฒนาผลิตภัณฑ์ รูปแบบ คุณภาพ และราคา เป็นต้น ซึ่งในส่วนของราคานั้นเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต บริษัทผู้ผลิตจึงพยายามทุ่มเทสรรพกำลังเพื่อศึกษามาตรการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งต้นทุนสำคัญจะอยู่ที่ “วัตถุดิบ” ทั้ง “วัตถุดิบหลัก” และ “สารเติมแต่ง (Additives)” ซึ่งมีราคาต่อหน่วยแตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบนั้น ๆ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นความสนใจไปที่ “สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนปลาสเตอร์ (Gypsum properties of plaster mixed with melamine waste)” โดยเติมลงไปในลักษณะที่เป็นสารเติมแต่ง เพื่อลดต้นทุนการผลิตแผ่นยิปซัม และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิด “วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)” ชนิดใหม่ที่จะนำไปใช้ปรับปรุงสมบัติแผ่นยิปซัมได้ ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานทั้งในและต่างประเทศที่นำมาใช้เป็นเกณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และกลไกการเกิดวัสดุเชิงประกอบระหว่างปูนยิปซัม และเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีต่อสมบัติทางกล และทางกายภาพของปูนยิปซัม

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณ และขนาดที่เหมาะสมของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ ที่นำมาเติมแทนที่ปูนพลาสติกอร์บางส่วนในการผลิตแผ่นยิปซัม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

“สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนพลาสติกอร์” มีขอบเขตดังนี้

1.3.1 ศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)

1.3.1.1 อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 4 (F4), 5 (F5) และ 6 (F6) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.1.2 ห้องปฏิบัติการทางเคมีของบริษัทผู้ผลิตยิปซัมแห่งหนึ่งใน จ.สระบุรี

1.3.2 ใช้วัตถุดิบในล็อตเดียวกันทุกชนิดของส่วนผสม ได้แก่

1.3.2.1 แร่ยิปซัมธรรมชาติ อำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ ที่มีความบริสุทธิ์ 95%

1.3.2.2 ปูนพลาสติกอร์ มอก.188-2547

1.3.2.3 เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ จากบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) จังหวัดนครราชสีมา

1.3.2.4 น้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค อำเภอหนองแวง จังหวัดสระบุรี

1.3.3 ในกระบวนการเผาแร่ยิปซัม (Calcination) ใช้ Impacted mill (imp-mill)

1.3.4 มาตรฐานหลักที่ใช้อ้างอิง ได้แก่

1.3.4.1 มอก. 219-2552

1.3.4.2 มอก. 188-2547

1.3.4.3 ASTM C1396/C1396M

1.3.4.4 UNE-EN-13279-2

1.3.4.5 UNE-EN-102-039-85

1.3.5 ตัวอย่างอ้างอิงคือปูนพลาสติกอร์ที่ไม่ผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์

1.3.6 การทดลองทำ 3 ซ้ำ

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามบทที่ 2

1.4.2 ออกแบบการทดลอง

1.4.3 เตรียมวัสดุสำหรับทดลองตามวิธีการและข้อกำหนดในบทที่ 3

1. สุ่มแรียปซัมธรรมชาติมาวิเคราะห์สมบัติ องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมี

2. เปรียบเทียบธรรมชาติให้แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติ องค์ประกอบทางกายภาพ

และทางเคมี

3. บด และร่อนแยกขนาดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ให้ได้ขนาดตามต้องการ

1.4.4 ผสมปูนพลาสติกอร์และเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

1. ใช้แบบหล่อปูนพลาสติกอร์ขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร เพื่อใช้ทดสอบการเข้ากันได้ของปูนพลาสติกอร์และเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ และเตรียมขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความหนาแน่น (Density) ค่าการดูดน้ำ (Water absorption) ค่าการต้านแรงดัด (Flexural strength) และค่าความแข็งของพื้นผิว (Surface hardness)

2. ตัดชิ้นงานจาก $40 \times 40 \times 160$ mm ให้ได้ขนาด $40 \times 40 \times 40$ มิลลิเมตร สำหรับทดสอบค่าการต้านแรงอัด (Compressive Strength)

3. ตัดชิ้นงานปูนพลาสติกอร์และเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เตรียมพื้นผิวสำหรับวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อวิเคราะห์การเข้ากันได้ของปูนพลาสติกอร์และเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ รวมถึงลักษณะ โครงสร้างระดับจุลภาค

4. ตัดชิ้นงานจากข้อที่ 1 เตรียมพื้นผิวเพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) เพื่อวิเคราะห์สารประกอบชนิดใหม่จากการผสมปูนพลาสติกอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

5. ตัดชิ้นงานจากข้อที่ 1 เตรียมเป็นชิ้นงานขนาด 40×40 มิลลิเมตร เตรียมสำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ตามมาตรฐาน ASTM E1225

1.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.4.7 เผยแพร่งานวิจัย

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.1 เครื่องมือวิเคราะห์แรียปซัม ปูนพลาสติกอร์ และเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

a. ตู้อบ (Oven) Binder รุ่น FDL 115 Max. 200°C

- b. ตู้อบ (Oven) Binder รุ่น FED 720 Max. 200 °C
- c. เตาเผา (Furnace) Nabertherm รุ่น B180
- d. Flame Photometer Sherwood รุ่น M410
- e. ตาชั่ง (Digital Balance) Sartorius รุ่น TE412 Max. 410 g
ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g
- f. ตาชั่ง (Digital Balance) Sartorius รุ่น TE 6101 Max. 6,100 g
ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 g
- g. ตาชั่ง (Digital Balance) Sartorius รุ่น TE 124S Max. 120 g
ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.01 mg
- h. เครื่องวัดความชื้น (Rapid Moisture Analyzer) ยี่ห้อ Precisa รุ่น XM 120-HR พิกัด
Max. 124 g ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.0001 g
- i. เครื่องร่อนแยกขนาด (Air Jet Sieve) ยี่ห้อ Hosokawa Alpine รุ่น E200LS
- j. เครื่อง UV Spectrometer ยี่ห้อ Hach Lange รุ่น DR6000
- k. เครื่องบดละเอียด (Crusher) ยี่ห้อ Retsch รุ่น ZM200
- l. เครื่องมือวัดค่า Setting Time ไวแคท (Vicat) Max. load 5 kg
- m. เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifugal machine) ยี่ห้อ Eppendorf รุ่น 5702
- n. เครื่องเขย่าสารละลาย (Shaker) ยี่ห้อ IKA รุ่น KS260 basic
- o. pH Meter และ Universal Indicator
- p. Hot plate-Magnetic stirrer ยี่ห้อ VWR รุ่น VMS-AS40
- q. Hot plate-Magnetic stirrer ยี่ห้อ IKA รุ่น RT5
- r. Water Bath ยี่ห้อ GFL รุ่น 1004
- s. หม้อดูดความชื้น (Desiccator)
- t. กระจกดวงขนาด 10-1,000 มิลลิเมตร
- u. บีกเกอร์ขนาด 250-1,000 มิลลิเมตร
- v. แท่งแก้วคนสาร
- w. กระจกทรง
- x. ครุชชีเบิ้ล (Crucible)

1.5.2 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

- a. บล็อกหล่อแท่งปริซึม (Prism block) ขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร
- b. ชุดผสมปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์
- c. ตู้อบ (Oven) Binder รุ่น FED 720 Max. 200 °C

- 1.5.3 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่าง
- a. เครื่องทดสอบค่าการต้านแรงอัด (Compressive strength) รุ่น ELE, Max. 200 M
 - b. เครื่องทดสอบการนำความร้อน ตามวิธีการใน ASTM E1225
 - c. เครื่องทดสอบการต้านแรงคด (Flexural Strength) แบบยูนิเวอร์แซล ยี่ห้อ Zwick/Roell กำลังกดสูงสุด 10,000 นิวตัน
 - d. ตู้อบ (Oven) Binder รุ่น MKF 240 Max. 100 °C
 - e. อ่างทดสอบการดูดซึมน้ำ
 - f. ตู้เผาไฟอุณหภูมิสูงสุด 1,500 °C
 - g. เตาเผา (Furnace) Nabertherm รุ่น B180
 - h. ตลับเมตร
 - i. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) Olympus รุ่น CX23
 - j. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM รุ่น QUANTA 450, FEI- EDS (XMax50 SDD, Oxford)
 - k. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ค้นพบวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ระหว่างปูนพลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม
- 1.6.2 เข้าใจถึงอิทธิพลของขนาดและปริมาณของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และลักษณะทางกายภาพของแผ่นยิปซัม
- 1.6.3 ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการและกำจัดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ อีกทั้งยังลดความเสี่ยงในการก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- 1.6.4 เกิดสารเติมแต่งที่ใช้ทดแทนสารเติมแต่งเดิม รวมถึงสามารถลดต้นทุนการผลิตแผ่นยิปซัมได้
- 1.6.5 ปฏิบัติตามกฎหมาย “ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548” และส่งเสริมนโยบาย “Green Product” และมาตรการ “3Rs ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

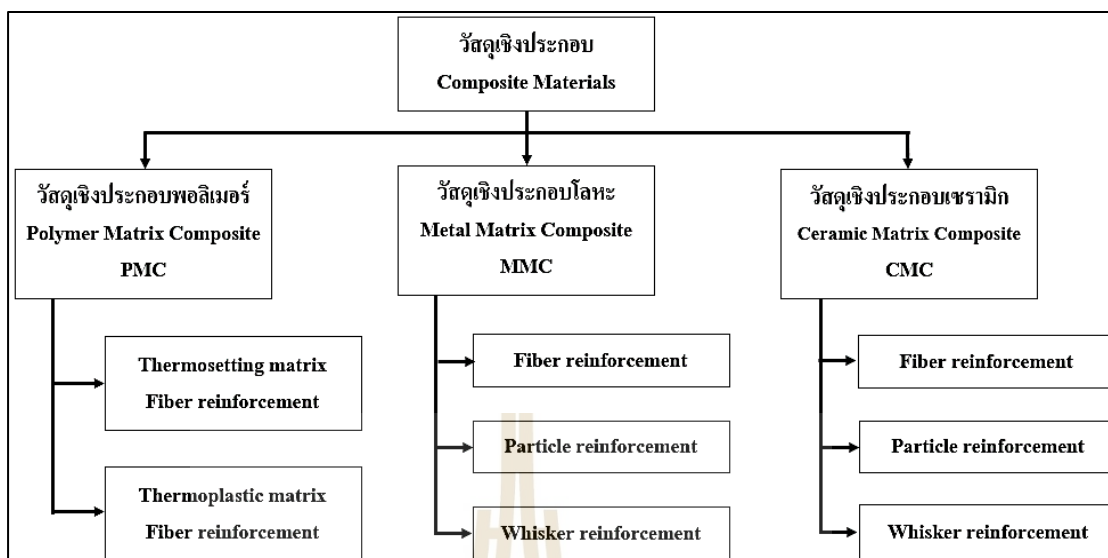
ในบทนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิต ของเสียจากอุตสาหกรรม วัสดุที่หมดอายุการใช้งาน วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (A. A. Khalil et al, 2014) หรือสารเคมีบางชนิด มาทดลองผสมกับปูนพลาสเตอร์และน้ำ ในอัตราส่วน และขนาดอนุภาคที่ต่างกัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเกิดวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่ในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม วัสดุเหล่านั้น เช่น ยิปซัมสังเคราะห์ ตะกรัน (Slag) จากเตาเผา เศษฉนวน โฟม เศษพลาสติก เศษฝุ่นฝ้าย เศษผ้า เศษฝุ่นปูนขาว เศษเมลามีน พอร์มาลดีไฮด์ ยางรถยนต์เก่า เศษไม้ แกลบ เส้นใยจากพืช กรดซिटริก โพลีเอไมด์ เป็นต้น ทั้งนี้ได้แบ่งเนื้อหาเป็น 6 ส่วน ได้แก่

- 2.1 ความเข้าใจเรื่องวัสดุเชิงประกอบ
- 2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยิปซัม
- 2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์
- 2.4 การนำความร้อน
- 2.5 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 2.6 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเข้าใจเรื่องวัสดุเชิงประกอบ (Composite material)

วัสดุเชิงประกอบมีชื่อเรียกหลากหลายแตกต่างกันออกไป เช่น วัสดุร่วม วัสดุผสม หรือวัสดุคอมโพสิต แต่ทั้งหมดจะมีนิยามคล้ายคลึงกัน คือ ระบบของวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยวัสดุจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟส (Phase) ที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือมี “เนื้อพื้น (Matrix)” อยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่อง และล้อมรอบ “เฟสกระจายตัว หรือเฟสเสริมแรง (Reinforcement)” ไว้ คุณสมบัติของวัสดุใหม่ที่เกิดขึ้น จะเป็นไปตามคุณสมบัติ และปริมาณของสารตั้งต้น และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสกระจายตัว (หฤทภัก กิริติเสวี และคณะ, 2553)

ถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของสารเสริมแรง

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อนทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนจะอยู่ในระดับต่ำมาก แต่ข้อเสีย คือ เปราะ และแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น สารเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสารเสริมแรงเนื่องจากสมบัติที่เรียกว่า “ความเหนียวแบบเทียม (Pseudo ductile)” สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะ และแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้น การใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น

สารเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงมี 3 ประเภท ทั้งแบบอนุภาคเสริมแรง แบบเส้นใยเสริมแรง และแบบวิสเกอร์ เช่น ซีเมนต์ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น วัสดุเชิงประกอบชนิดนี้ถูกนำมาใช้งานเป็นเวลานาน โดยเฉพาะ โครงสร้างที่เป็นเส้นโลหะ เสริมแรงด้วยหินกรวดทราย อย่างเช่นเมทริกซ์ซีเมนต์ หรือคอนกรีต เป็นต้น โดยการพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้เส้นใยเสริมแรงประเภทเส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอนแทนเส้นโลหะ เพื่อแก้ปัญหาด้านการกัดกร่อนเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน เป็นต้น

2.1.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

พัฒนามาเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน สารเสริมแรงมี 3 ประเภท ได้แก่

1) แบบอนุภาคเสริมแรง ที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

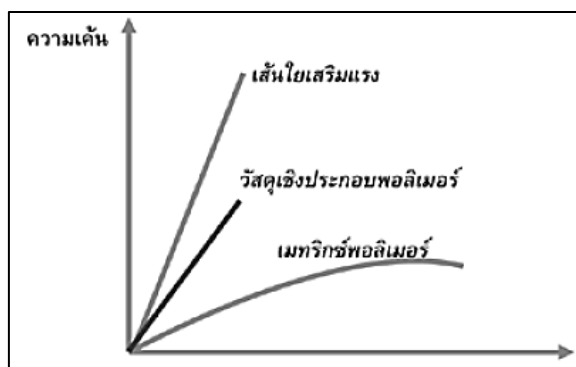
2) แบบเส้นใยเสริมแรง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) โดยอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ขึ้นไป จะเรียกสารเสริมแรงนั้นว่าเป็น “เส้นใย” โดยชนิดของเส้นใยจะมี 2 ชนิดหลัก คือ เส้นใยอินทรีย์ (Organic fiber) และเส้นใยอนินทรีย์ (Inorganic fiber) โดยทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นได้ทั้งเส้นใยแบบต่อเนื่อง และเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง

3) แบบวิสเกอร์ (Whisker) เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) มีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

สารเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรง ทนความร้อนสูงด้วย และไม่กัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ ทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์ และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้จึงต้องเป็นเซรามิกหรือโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น เมทริกซ์โลหะจะมีความทนทานต่อความล้า และอายุการใช้งานสูงขึ้นมาก อีกทั้งความหนาแน่นของสารเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง รวมถึงสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient temperature expansion, CTE) ลดลง เพราะสารเสริมแรงเป็นเซรามิกจึงมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าโลหะ

2.1.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

พอลิเมอร์ (Polymer) เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำๆ ต่อกันเป็นสายยาว จึงไม่ค่อยมีความแข็งแรง ความหนาแน่นต่ำ แต่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ คือ การเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ เพื่อรับและกระจายแรงกระทำ วัสดุเชิงประกอบจะแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง และทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ

เมทริกซ์พอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามพฤติกรรมเชิงความร้อนที่มีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ ได้แก่

1) เมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลซึ่งเป็นการผสมสารเสริมแรงเข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ จนเกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแห หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาลิ้นสุดอาจมีการบ่มแล้วจะเกิดการคงรูป จนไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก

2) เมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่ง สามารถหลอมเหลวได้เมื่อให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว และขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยถ้าหลังจากคงรูปแล้วได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ก็จะสามารถหลอมเหลวได้อีก วัสดุประเภทนี้จะมีความเหนียว และทนทานต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยิปซัม (Basic knowledge of gypsum)

2.2.1 ความหมายและที่มา

ยิปซัม คือ แร่ชนิดหนึ่ง ชื่อไฮเดรตแคลเซียมซัลเฟต (hydrated calcium sulphate) มีสูตร $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เมื่อนำมาเผาให้ร้อนถึง 120-130 องศาเซลเซียส จะได้ผงสีขาว โดยนิยมเรียกว่า ปูนปลาสเตอร์ ปูนพลาสติก หินฟองเต้าหู้ หรือเกลือจืด (พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน, 2554)

ยิปซัมหรือเกลือจืด หมายถึง แร่หรือสารที่มีแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Di-hydrate; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นแร่โลหะ ตัณฐานแบบมอนอคลินิก (Monoclinic) ที่มีความเปราะ มีค่าความแข็ง 1.5-2.0 ตามสเกลของมอสส์ (Moh's scale) ความถ่วงจำเพาะ 2.3-2.7 ลักษณะของเนื้อแร่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่พบ มีสีตั้งแต่ เทา ขาว แดงอมชมพู หรือ โปรงใสไป

จนกระทั่งโปร่งแสง มีค่าดัชนีหักเหแสง n_x 1.519-1.521, n_y 1.522-1.523 และ n_z 1.529-1.530 ตามลำดับ (Sebastian Förthner, 2017)

2.2.2 ประเภทของแร่ยิปซัม

สามารถจำแนกยิปซัมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (บรรเทิง จุนใจ, 2556)

2.2.2.1 ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum)

มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของเนื้อแร่

a) ซาตินสปาร์ (Satin Spar) เป็นแร่ยิปซัมลักษณะที่เป็นเส้นใยเหมือนก้อนเนื้อที่เห็นลายของเนื้อ มีความวาวคล้ายไหม



รูปที่ 2.3 แร่ยิปซัมชนิดซาตินสปาร์

b) อะลาบาสเตอร์ (Alabaster) มีเนื้อเป็นลักษณะมวลเม็ดอัดกันแน่น



รูปที่ 2.4 แร่ยิปซัมชนิดอะลาบาสเตอร์

c) ซีลีไนต์ (Selenite) เป็นผลึกใสไม่มีสี เนื้อแร่เป็นแผ่นบางโปร่งใส (คล้ายๆ ผลึกของสารส้ม)



รูปที่ 2.5 แร่ยิปซัมชนิดซีลีไนต์

แร่ยิปซัมที่พบในประเทศไทยจะมีลักษณะเนื้อเป็นเนื้อละเอียดอัดแน่นแบบอะลาบาสเตอร์ (มยุรี ปาลวงศ์, 2552) ซึ่งเกิดจากการเติมน้ำ (Rehydration) ให้กับช่วงบนสุดของมวลแอนไฮไดรต์ (Anhydrite ; CaSO_4) จนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

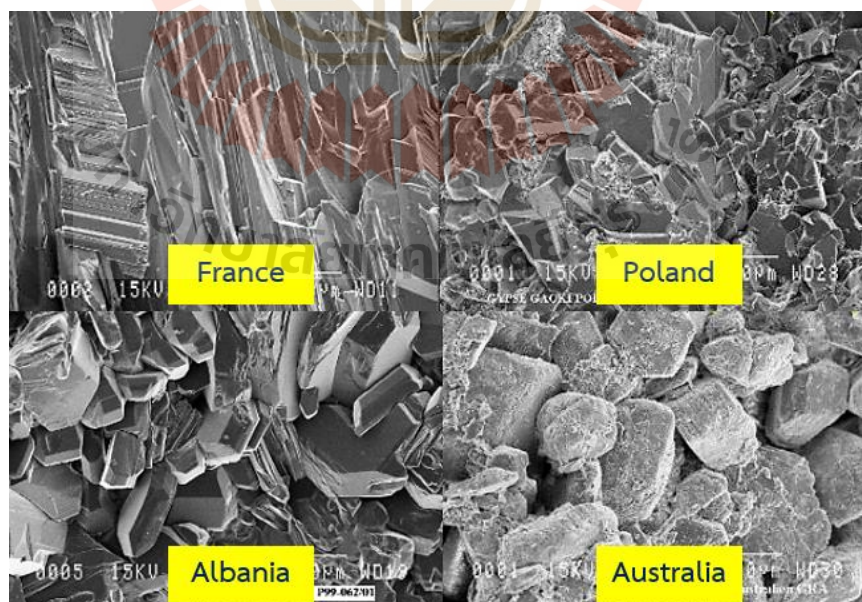


รูปที่ 2.6 แหล่งแร่ยิปซัมขนาดใหญ่ในประเทศไทย

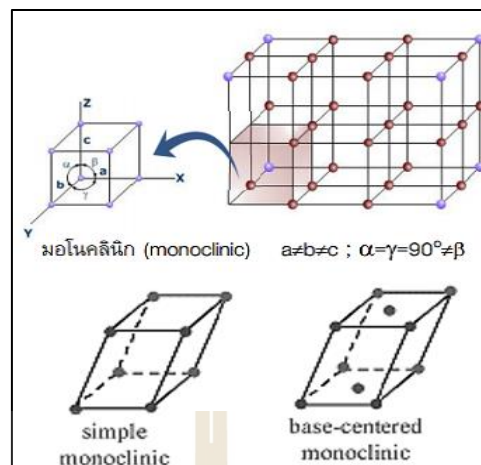
โดยในประเทศไทยพบแหล่งแร่ยิปซัมขนาดใหญ่อยู่บริเวณอำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร และอำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ และยังมีแหล่งแร่ชั้นรอง เช่น ที่ อำเภอนาสาร อำเภอเวียงสระ อำเภอกาญจนดิษฐ์ และอำเภอดอนสัก จังหวัดสุราษฎร์ธานี หรือที่อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช นอกจากนี้ก็พบได้บ้างที่อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย และอำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น



รูปที่ 2.7 รูปร่างของแร่ยิปซัมลักษณะอื่น ๆ ที่พบเห็นได้ (Sebastian Förthner, 2017)



รูปที่ 2.8 รูปร่างของผลึกแร่ยิปซัมธรรมชาติในแหล่งต่าง ๆ ของโลก (Sebastian Förthner, 2017)



รูปที่ 2.9 สัณฐานของแร่ยิปซัมมีรูปทรงแบบมอโนคลีนิก (Monoclinic)

ขั้นตอนการทำเหมืองแร่ยิปซัมธรรมชาตินั้นมี 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. เปิดหน้าดิน



รูปที่ 2.10 การเปิดหน้าดิน 6-8 เมตร ลงไปจนพบแผ่นยิปซัม



รูปที่ 2.11 แผ่นยิปซัมที่อยู่ไม่ไกลจากหน้าผาดิน



รูปที่ 2.12 ลักษณะแผ่นยิปซัมที่ไหลพื้นผิวดินจนกลายเป็นเหมือนภูเขาขนาดย่อม

2. การขุดเจาะแผ่นยิปซัมและการวางระเบิด เมื่อเปิดหน้าดินหรือเตรียมพื้นที่เสร็จแล้ว ลำดับต่อไปก็คือการเจาะรูบนแผ่นยิปซัมเพื่อวางวัตถุระเบิด ชนวน และ สายไฟที่ใช้ในการจุดชนวนระเบิด ได้แก่ Electric delay detonator, Emulsion explosive และระเบิด ANFO เป็นต้น



รูปที่ 2.13 เครื่องเจาะรูเพื่อวางวัดระยะเปิด



รูปที่ 2.14 รูที่เจาะบนแผ่นอิฐขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 76 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.15 รูปวัตถุระเบิดและการระเบิดแผ่นยิปซัม

3. การบดและแยกขนาดแร่ยิปซัม แร่ยิปซัมที่ได้จากการระเบิดยังเป็นแร่ก้อนใหญ่ จึงต้องนำแร่ก้อนที่ได้ไปผ่านกระบวนการบด และร่อนแยกขนาดแร่ยิปซัม โดยเครื่องบดที่เรียกว่า “Jaw Crusher” ขนาดของแร่ที่ต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับลูกค้ำรื่องขอ เพราะแร่ยิปซัมถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ปูนซีเมนต์ แผ่นและปูยิปซัม เครื่องสำอาง อาหาร ปุ๋ย เครื่องดื่ม เป็นต้น



รูปที่ 2.16 รูปเครื่องบดแร่ยิปซัม Jaw Crusher



รูปที่ 2.17 แร่ยิปซัมที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดแล้วจากอาคารบดแร่

4. การขนส่งแร่ แร่ยิปซัมขนาดต่าง ๆ กันจะถูกลำเลียงออกจากอาคารบดและร่อนแยกขนาดแร่โดยสายพานลำเลียง เพื่อแยกกองไม่ให้ปะปนกันระหว่างแร่ที่มีขนาดต่างกัน เพื่อรอรถตักมาตักขึ้นรถบรรทุกแล้วนำส่งไปยังลูกค้ำ

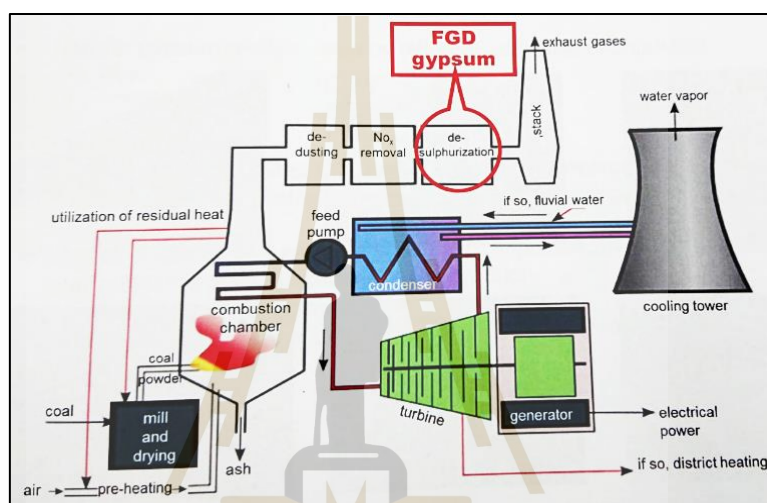


รูปที่ 2.18 รถบรรทุกรอการตักแร่ละเอียดขนาดน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ขึ้นบนรถเพื่อนำส่งลูกค้ำ

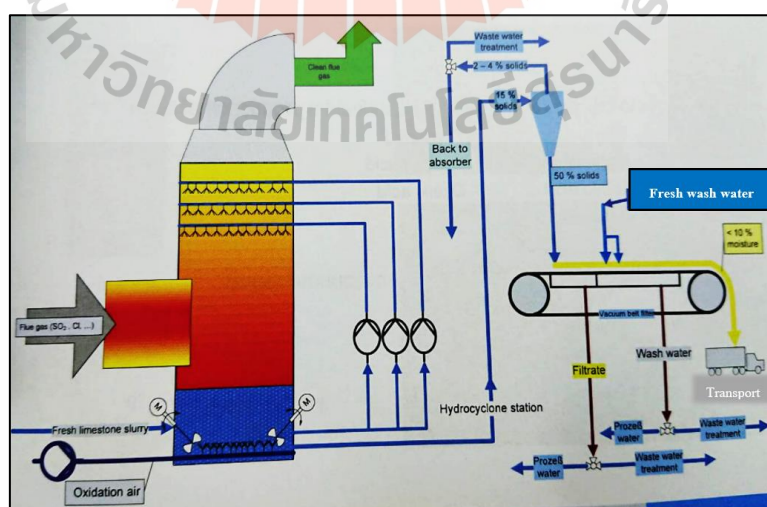
2.2.2.2 ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum)

ยิปซัมสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-product) ของกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการกำจัดอากาศเสีย (Flue gases) จากการเผาเชื้อเพลิงถ่านหินของโรงไฟฟ้า

พลังงานถ่านหิน การผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) การผลิตกรดซิตริก (Citric Acid) และการผลิตปุ๋ยฟอสฟอรัส แต่ที่ได้รับความนิยมสูงคือยับยั้งจากกระบวนการกำจัดอากาศเสียจากการเผาเชื้อเพลิงถ่านหินของโรงไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “Flue Gas Desulfurization (FGD)” ซึ่งก็คือกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ออกมาพร้อมก๊าซทิ้งแบบเปียก (Wet Type) โดยฉีดสารละลายหินปูน (CaCO₃) เข้าไปคลุมก๊าซซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับน้ำหินปูนจนยับยั้ง (CaSO₄•2H₂O) ตกลงมา ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20

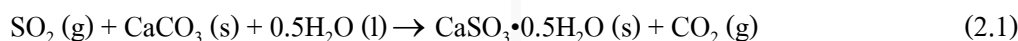


รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการเกิด FGD จากการเผาถ่านหิน (Dr. Sebastian Förthner, 2017)

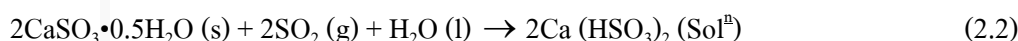


รูปที่ 2.20 การเกิด FGD (Dr. Sebastian Förthner, 2017)

ปฏิกิริยาการเกิดยิปซัมสังเคราะห์อธิบายได้ตามสมการที่ 2.1-2.4 ดังนี้



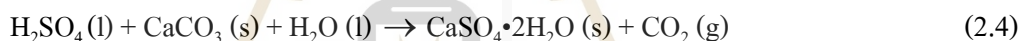
ขั้นตอนนี้จะเกิด Insoluble Calcium Sulfite ที่ pH 7-8



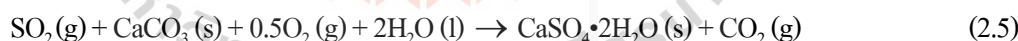
Calcium Sulfite ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนกลับไปเป็น Calcium Bisulfite ที่ pH 5



Calcium Bisulfite ถูก Oxidized ด้วยออกซิเจนในบรรยากาศที่ pH 5

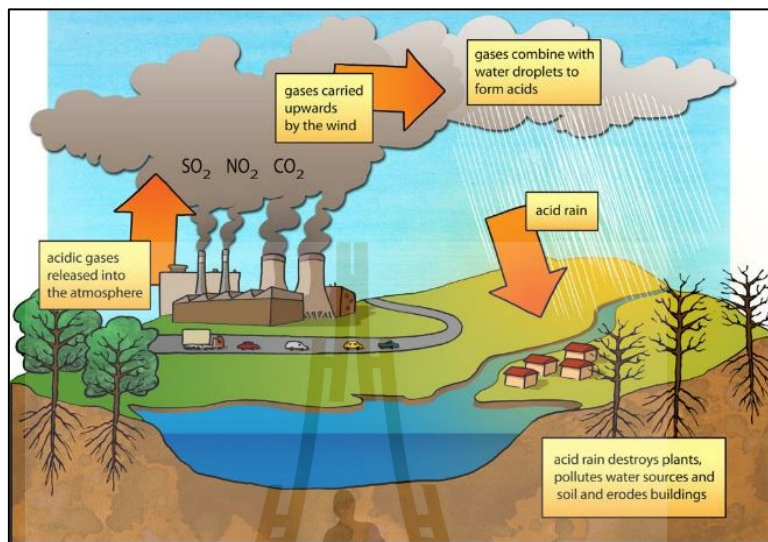


Calcium Carbonate ที่เหลือทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกที่เกิดขึ้น โดยมีปฏิกิริยารวมทั้งหมดแสดงในสมการที่ 2.5 ดังนี้



อากาศเสีย (Flue-gas) ของการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน จะมีก๊าซพิษสำคัญก็คือ “ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)” ซึ่งก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมได้มากมาย ที่ชัดเจนคือ กรณี “ฝนกรด (Acid Rain)” บริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เมื่อปลายปี พ.ศ. 2535 ซึ่งเกิดจากการที่น้ำฝนทำปฏิกิริยากับก๊าซพิษ SO₂ หรือก๊าซอื่นๆ ในอากาศน้ำในอากาศ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ทำให้เกิดกรดกำมะถัน (H₂SO₄) กรดไนตริก (HNO₃) และกรดคาร์บอนิก (H₂CO₃) ตามลำดับ ละลายปนมากับน้ำฝนก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ สภาพแวดล้อม อาคารสถานที่ และสิ่งที่มีในธรรมชาติ เช่น ผู้คน และสัตว์ได้รับบาดเจ็บจากการกัดกร่อนของกรด น้ำผิวดิน และดินมีสภาพเปรี้ยวเพราะค่า pH ต่ำลง เกิดปัญหาใน

การเพาะปลูกไม่ได้ผล โบราณสถาน หรืออาคารที่ก่อสร้างจากปูนหรือหินถูกกัดกร่อน พืช และป่าเสียหายจากการที่น้ำกรดสัมผัสกับใบ และส่วนต่าง ๆ จนแห้งตาย เป็นต้น



รูปที่ 2.21 การเกิดฝนกรด (ที่มา : www.renewableworld.net)



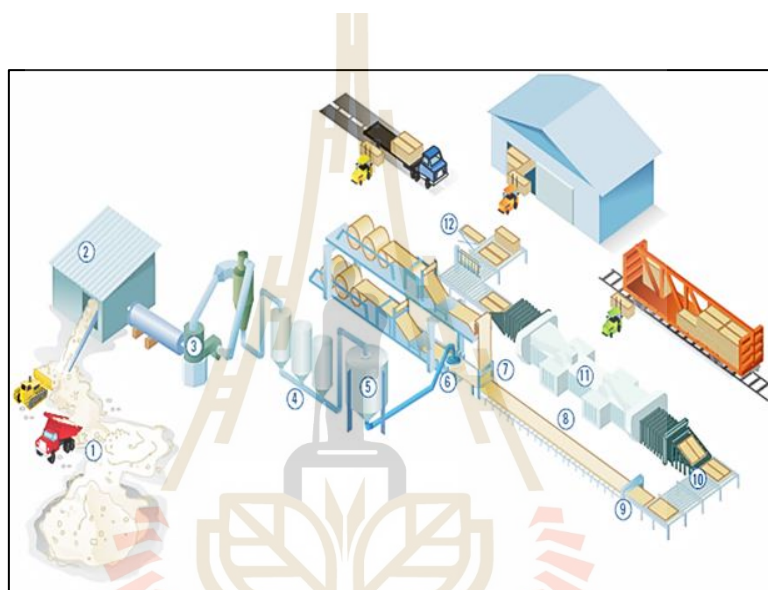
รูปที่ 2.22 ผลึกยิปซัมสังเคราะห์แต่ละชนิด

ยิปซัมสังเคราะห์ประเภทอื่น ๆ อาทิเช่น ที่ได้มาจากโรงงานผลิต Titanium Dioxide เรียกว่า “Titano-gypsum” ที่ได้จากโรงงานผลิต Phosphoric Acid และปุ๋ยฟอสฟอรัสถูกเรียกว่า “Phospho-gypsum” และที่ได้จากโรงงานผลิตกรดซัลฟูริก จะเรียกว่า “Citro-gypsum” เป็นต้น

ซึ่งจะให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดยิปซัมสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังให้ค่าความต้องการน้ำ (Charles Blow et al, 2010) ค่าความหนาแน่น (Bulk density) และค่าผลผลิต (Productivity) ที่ต่างกันด้วยเมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม โดย FGD gypsum จะมีความต้องการน้ำน้อยที่สุด และให้ Productivity ดีที่สุด จึงถูกเลือกใช้ในการผลิตมากที่สุดเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22

2.2.3 เทคโนโลยีการผลิตแผ่นยิปซัม

กระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งมีทั้งสิ้น 12 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.23 แผนผังกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม

1. การรับวัตถุดิบแร่ยิปซัม เป็นการตรวจรับวัตถุดิบทั้งที่เป็นยิปซัมธรรมชาติหรือยิปซัมสังเคราะห์เข้ามาในพื้นที่การผลิต โดยค่าควบคุมหลักที่ตรวจสอบคือ ค่าความบริสุทธิ์ (Purity) ค่าความชื้น (Moisture) ปริมาณเกลือในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ปริมาณเกลือในรูปของโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และปริมาณของดินพองตัว (Swelling Clay)

2. การบดหยาบ (Crusher) เป็นการบดแร่ยิปซัมธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงโดยเครื่องบดหยาบ (Jaw Crusher) โดยทั่วไปขนาดของแร่ยิปซัมธรรมชาติที่ระเบิดออกมาจะมีขนาดเล็กใหญ่ไม่เท่ากัน แต่ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีขนาดเล็กกว่า 600 มิลลิเมตร และในแต่ละอุตสาหกรรมก็มีความต้องการขนาดของยิปซัมที่ต่างกัน ขนาดของยิปซัมธรรมชาติที่ใช้ในอุตสาหกรรมแผ่นยิปซัมคือขนาดประมาณ 20-50 มิลลิเมตร เพราะต้อง

นำไปผ่านกระบวนการบดละเอียดในลำดับต่อไป การบดหยาบขีปนาวุธธรรมชาตินั้นจะใช้เครื่องมือบดหยาบที่เรียกว่า “Jaw Crusher”

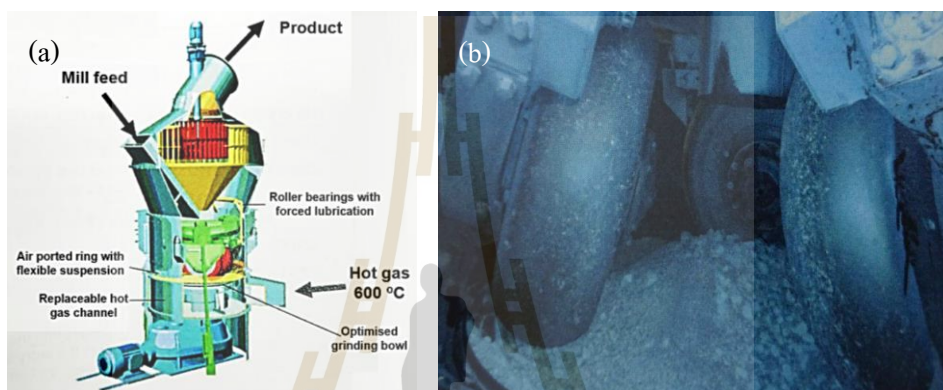
3. การบดละเอียด (Milling) เป็นการบดขีปนาวุธขนาดใหญ่ให้ละเอียดเพื่อผ่านเข้าสู่การเผาทำจัดน้ำหรือแคลซิเนชัน การบดขีปนาวุธให้มีขนาดที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำดีขึ้นและทำให้ได้ปูนพลาสเตอร์หรือสตัคโก้ (Stucco) ที่มีคุณภาพ เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตปูนหรือแผ่นขีปนาวุธต่อไป เครื่องมือที่ใช้ในการบดละเอียดมีอยู่หลายชนิด แต่มีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกัน ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมแผ่นขีปนาวุธคือ เครื่องมือบดละเอียดที่เรียกว่า “Grinding Mill” ซึ่งมีมากมายหลายประเภท แล้วแต่การเลือกใช้งานของผู้ผลิตแต่ละเจ้า ทั้งนี้การบดละเอียดในบาง Mill จะมีการให้ความร้อนและเผาแร่ขีปนาวุธให้กลายเป็นปูนพลาสเตอร์ไปเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกันเลยทีเดียว (ทำขั้นตอน Calcination ต่อเนื่องไปเลย) แต่คุณภาพของปูนพลาสเตอร์หรือเฮมิไฮเดรตที่ออกมาก็จะมีค่าต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เช่น ค่าน้ำในผลึก (Crystal water) ค่าเฟส (Phase) ทั้ง Dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), Anhydride (CaSO_4) และขนาดอนุภาค (Particle size) เป็นต้น



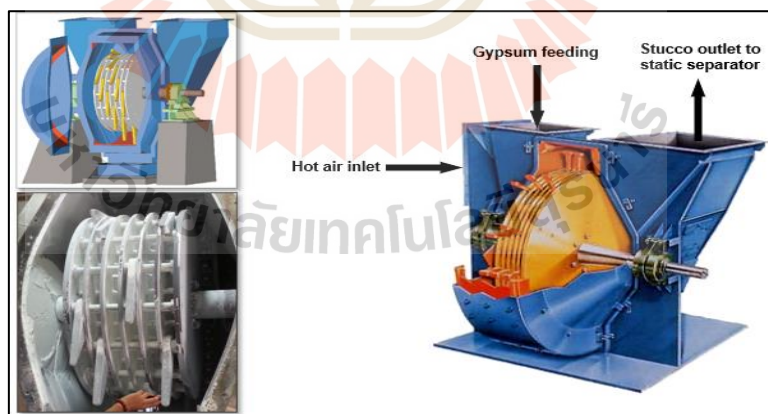
รูปที่ 2.24 Claudius-Peters Mill

เครื่อง Mill ลักษณะต่าง ๆ (Dr. Stephan Dietz, 2017) เช่น “Claudius-Peters Mill” ดังแสดงในรูปที่ 2.24 มีองค์ประกอบคือ ลูกบอลเหล็กสำหรับบดแร่ 5 ลูกอยู่ในห้องปิด (คล้าย ๆ หลักการของตลับลูกปืน) ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการหล่อลื่นและลดการกระชอมบำรุง ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (a) คือ Mill ที่เรียกว่า “Pffifer Mill-MPS” โดยจะมีโรลเลอร์ 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (b)

สำหรับบดอยู่ภายในเครื่อง แต่ Mill ประเภทนี้ต้องการการหล่อลื่นและหล่อเย็นจากภายนอก สามารถปรับอุณหภูมิแก๊สร้อนได้ถึง 600 °C ส่วนในรูปที่ 2.26 คือ “Impact Mill” หรือ “Hammer Mill” หรือเรียกสั้นๆ ว่า “Imp-Mill” อาศัยหลักการบดและเผาในเวลาเดียวกัน โดยตัวบดจะถูกแขวนไว้บนแกนที่ยึดอยู่กับสเตเตอร์ที่หมุนเหวี่ยงด้วยรอบจัด การหมุนเหวี่ยงจะทำให้แท่งค้อนที่เป็นตัวบดหมุน และตีแร่ปชัมให้แตกละเอียด การเพิ่มรอบการหมุน และจำนวนค้อนจะทำให้ได้แร่ละเอียดขึ้น



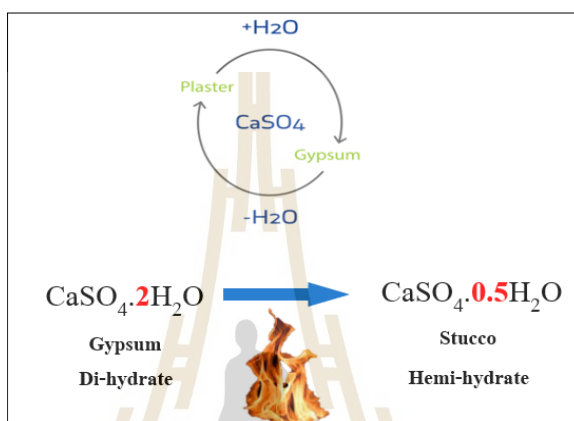
รูปที่ 2.25 (a) Pfeiffer Mill-MPS และ (b) The 3 rollers inside mill



รูปที่ 2.26 Impact / Hammer Mill (Imp-Mill)

4. การเผาเพื่อกำจัดน้ำหรือแคลซิเนชัน (Calcination) ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นตอนแรกที่ต้องมีการควบคุม ตรวจสอบ และปรับตั้งสภาวะการผลิตเป็นอย่างดี เพราะเป็นกระบวนการเปลี่ยนแร่ปชัมให้กลายเป็นปูน พลาสเตอร์ เป็นการเผาแร่ปชัมที่บดละเอียด

แล้วให้ปริมาณน้ำในผลึก (Crystal Water) หายไป 75% จนได้แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) หรือปูนพลาสเตอร์หรือสตัคโก้ (Stucco) อีกจุดประสงค์หนึ่งก็เพื่อกำจัดสารมลทินและสารอินทรีย์ระเหยได้ที่ตกค้างและปนเปื้อนในแร่ยิปซัม กระบวนการแคลซิเนชัน หรือปฏิกิริยาดิไฮเดรชัน (Dehydration) แสดงในรูปที่ 2.27 จากการเผาแร่ยิปซัมในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Phase ขึ้น



รูปที่ 2.27 กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) หรือปฏิกิริยาดิไฮเดรชัน (Dehydration)

ตารางที่ 2.1 ช่วงอุณหภูมิ และ Phase ที่เปลี่ยนไปของแร่ยิปซัมจากการแคลซิเนชัน

ชื่อทางเคมี	อุณหภูมิที่ใช้	ชื่อที่ใช้กันทั่วไป	หมายเหตุ
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	ไม่ให้ความร้อน	- Gypsum - Gypsum Dihydrate (DH)	ไม่เซ็ทตัวเมื่อผสมน้ำ
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	45-200 °C (ประมาณ 121 °C)	- Stucco - Hemi-Hydrate (HH) - Plaster of Paris	เปลี่ยนเป็นยิปซัมเมื่อผสมน้ำ
CaSO_4	180-220 °C (ประมาณ 176 °C)	- Soluble Anhydrite (AIII) - Stucco	เปลี่ยนเป็นยิปซัมอย่างรวดเร็วเมื่อผสมน้ำ
CaSO_4	300-700 °C (ประมาณ 426 °C)	- Insoluble Anhydrite (AII _s , AII _l) - Dead burn	ไม่เซ็ทตัว แต่ถ้าเดิมตัวแรง จะใช้เวลานานในการเซ็ทตัว
CaSO_4	1,200 °C	- N/A (only scientific interest)	ไม่มีประโยชน์ด้านเทคนิค

ตารางที่ 2.2 การเผาแร่ยิปซัมให้ได้ค่าสมบูรณ์แบบตามทฤษฎี (Perfect Calcination)

ยิปซัม		ปูนพลาสเตอร์
ความบริสุทธิ์ (%)	น้ำในผลึก (%)	น้ำในผลึก (%)
100	20.9	6.2
95	19.8	5.8
90	18.8	5.4
85	17.7	5.1
80	16.7	4.7
75	15.6	4.4

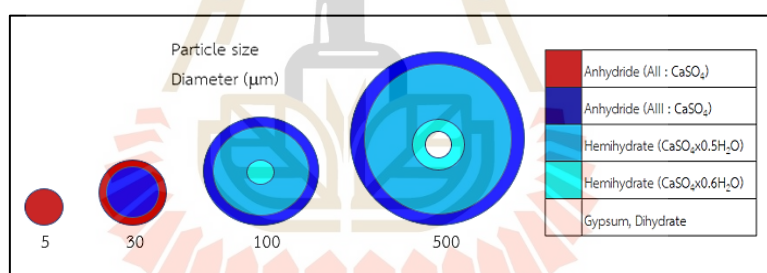
ทั้งนี้ได้มีการศึกษาเรื่องของ “Phase Diagram” ของยิปซัม ทั้งที่เป็นการแคลซิเนชันแบบแห้ง และแบบใช้ความชื้น จนได้ a-Hemihydrate และ b-Hemihydrate ไว้ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.28 (Franz Wirsching, 1985)

Characteristic	Calcium sulfate dihydrate	Calcium sulfate hemihydrate	Anhydrite III	Anhydrite II	Anhydrite I
Formula	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	CaSO_4	CaSO_4
Molecular mass M_r	172.17	145.15	136.14	136.14	136.14
Thermodynamic stability, °C	< 40	metastable*	metastable*	40–1180	> 1180
Forms or stages		two forms: α β	three stages: β -anhydrite III β -anhydrite III' α -anhydrite III	three stages: AII-s, slowly soluble anhydrite AII-u, insoluble anhydrite AII-E, <i>Estrichgips</i>	
Other names, often based on the application	gypsum raw gypsum synthetic gypsum chemical gypsum byproduct gypsum set gypsum hardened gypsum	α -form: α -hemihydrate autoclave plaster α -plaster β -form: β -hemihydrate stucco plaster β -plaster plaster of Paris [26499-65-0]	soluble anhydrite	raw anhydrite natural anhydrite anhydrite synthetic anhydrite chemical anhydrite byproduct anhydrite calcined anhydrite	high-temperature anhydrite
Synthesis conditions: temperature, °C, and atmosphere	< 40	α -form: > 45, from aqueous solution β -form: 45–200 in dry air	α - and β -AIII: 50 and vacuum or 100 in air β -AIII: 100 in dry air	200–1180	> 1180
Production temperature, °C	< 40	α -form: 80–180 β -form: 120–180	β -AIII and β -AIII': 290 α -AIII: 110	300–900, specifically AII-s: < 500 AIII-u: 500–700 AIII-E: > 700	not produced commercially

รูปที่ 2.28 Calcium sulphate phase diagram

การใช้แร่ยิปซัมต่างชนิดกัน ขนาดแร่ยิปซัมที่บดไม่เท่ากัน ใช้ Mill ต่างกัน และใช้แหล่งพลังงานต่างกันจะทำให้ได้คุณสมบัติของปูนพลาสเตอร์ที่ต่างกันออกไป ซึ่งการผลิตปูนพลาสเตอร์ชนิดเดียวกันแต่แตกต่างกันที่เครื่องบด Mill นั้นจะไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มากนัก แต่จะส่งผลให้การผลิตควบคุมได้ยากง่ายต่างกัน อีกทั้งปริมาณการใช้สารเติมแต่งก็จะต่างกันไปด้วย การใช้ปูนพลาสเตอร์ขนาดเล็กมากเกินไป หรือใหญ่มากเกินไปจะมีผลต่อค่าความต้องการน้ำของปูนพลาสเตอร์ เพื่อที่จะกลับไปเป็นยิปซัมด้วยปฏิกิริยา “รีไฮเดรชัน (Rehydration)”

การเผาแร่ยิปซัมหรือแคลซิเนชันที่เวลา อุณหภูมิ และขนาดแร่ที่เหมาะสมจะทำให้ได้ Phase ที่ต้องการและส่วนผสมของ Phase ที่ดี ในการผลิตแผ่นยิปซัมนั้นต้องการให้แร่ยิปซัมกลายเป็นเฮมิไฮเดรตในปริมาณที่มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในกระบวนการแคลซิเนชันจริง ๆ นั้นจะมี Phase ที่เป็นไดไฮเดรตและแอนไฮไดรด์ปะปนออกมา ปริมาณมากขึ้นกับคุณภาพ และการควบคุมขั้นตอนการเผา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการก่อตัวทั้งระยะต้น และระยะปลายเมื่ออยู่ในสายการผลิต



รูปที่ 2.29 การเผาแร่ยิปซัมที่ขนาดแร่เข้าต่างกันที่อุณหภูมิและเวลาเผาเท่ากัน

ค่าน้ำในผลึก (Crystal or Combine water; %CW) เป็นการตรวจวัดเพื่อคุณภาพของการเผาแร่ยิปซัมให้มั่นใจว่าไม่มีแร่ยิปซัมหลงเหลืออยู่แล้ว ไม่มีส่วนที่เผามากเกินไป (Anhydrite type AIII) ไม่ควรมีส่วนที่ถูกเผาจนตาย Dead Burn (Anhydrite type AII) โดยที่ Gypsum purity 100% และไม่มี AIII ในปูนพลาสเตอร์ และมีค่า % CW เท่ากับ 6.21 % แต่ในความเป็นจริงยิปซัมไม่ได้บริสุทธิ์ 100 % และการเผาก็จะมี AII ซึ่งต้องการน้อยมาก และ AIII ที่ต้องการไม่เกิน 10-15% (แล้วแต่ผู้ผลิตจะกำหนดเอง) เจือปนออกมาเช่นกัน จึงสามารถกำหนดสมการค่า % CW ที่ต้องการได้แสดงดังสมการที่ 2.6

$$\%CW \text{ target} = [\text{Gypsum purity min.} \times 0.071 - 0.9] \times (1 - \%AIII) \quad (2.6.)$$

ค่า Water to Stucco Ratio (WSR) หรือ Water to Gypsum Ratio (WGR) เป็นการหาปริมาณปูนปลาสเตอร์ที่ผลิตออกมาว่าต้องใช้ในปริมาณกี่หน่วย ให้พอดีกับน้ำสะอาด ปริมาณ 100 หน่วย โดยเป็นไปตามสมการที่ 2.7 ดังนี้ เพื่อนำไปกำหนดความข้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency; NC) และใช้หาค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting time; IS) และค่าการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting time; FS) ในลำดับต่อไป

$$\text{ค่า WSR/WGR} = \frac{\text{น้ำสะอาด 100 กรัม}}{\text{น้ำหนักปูนปลาสเตอร์ที่พอดีจากการทดลอง}} \quad (2.7)$$

ค่า WSR/WGR ที่เหมาะสม คือ ช่วงระหว่าง 0.6-0.8 แล้วแต่ผู้ผลิต (Dr. Sebastian Förthner, 2017)

ค่าการคงตัวระยะต้น (Initial setting time; IS) และการคงตัวระยะปลาย (Final setting time; FS) เมื่อได้ค่าความข้นเหลวมาตรฐาน และทราบ WSR/WGR ของปูนที่ผลิตในล็อตนั้นๆ แล้ว ก็จะเป็นการทดสอบหาค่าการก่อตัวระยะต้น และค่าการก่อตัวระยะปลาย โดยค่าที่จะใช้อ้างอิงได้ก็คือการทำตามวิธีการใน มอก.188-2547 หรือ ASTM C472-99 แต่สำหรับการควบคุมกระบวนการในสายการผลิต จะมีการทดสอบค่าการก่อตัวระยะปลายแบบใช้นิ้วหัวแม่มือกดด้วยแรงกดประมาณ 5 กิโลกรัม เรียกว่า “Thumb Setting” (ซึ่งใช้อ้างอิงเป็นวิธีมาตรฐานไม่ได้) ฝ่ายผลิตนิยมใช้เพื่อลดเวลาในการรอไวแคท ทั้งนี้การจะเลือกใช้หรือไม่ขึ้นอยู่กับแต่ละบริษัทผู้ผลิต

5. การจัดเก็บปูนปลาสเตอร์ ใช้เป็นถังจัดเก็บปูนปลาสเตอร์หรือสตั๊กโก้ที่ผ่านมาจากกระบวนการเคลซิเนชัน เป็นถังที่มีลักษณะมิดชิดและป้องกันการซึมผ่านของน้ำหรือความชื้นจากภายนอก เพราะหากปูนปลาสเตอร์สัมผัสกับความชื้นแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกลับไปเป็นยิปซัมและแข็งตัว

6. ถังผสม (Mixer) เป็นการผสมปูนปลาสเตอร์เข้ากับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารเร่ง (Accelerator) สารหน่วง (Retarder) แป้งมันสำปะหลังตัดแปร (Modified Tapioca Starch) สารช่วยการกระจายตัว (Dispersant or Liquefier) สารก่อฟอง (Foaming Agent) น้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) เป็นต้น โดยมีรอบการผสม และอัตราส่วนผสมแตกต่างกันไปตามประเภทของแผ่นยิปซัม

7. จุดขึ้นรูป (Forming Station) เป็นการฉีดส่วนผสมจากถังผสมเข้าไปในกระดวยรองด้านล่าง และกระดวยประกบจากด้านบน นอกจากนี้ยังมีการทากาวลงบนขอบกระดวย

ด้านใดด้านหนึ่งเพื่อประกบกับกระดาษอีกด้านหนึ่ง เป็นการห่อหุ้มส่วนผสมหรือ “Slurry” เอาไว้ ลักษณะการนึ่ง Slurry ลงบนกระดาษ แสดงดังรูปที่ 2.30 นอกจากนี้จะมีการปรับขอบของแผ่นบอร์ดให้ได้ความกว้าง ความหนา หรือความลาดเอียงตามต้องการ



รูปที่ 2.30 การนึ่ง Slurry ลงบนกระดาษรองด้านล่าง

8. สายพานเซ็ทตัว (Setting Belt) เป็นส่วนที่เกิดการเซ็ทตัวของส่วนผสม Slurry เกิดปฏิกิริยารีไฮเดรชัน (Rehydration Reaction) ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ที่ปูนพลาสเตอร์และแอนไฮไดรต์ทำปฏิกิริยารีไฮเดรชันกับน้ำ แล้วแข็งตัวจนกลายเป็นแผ่นยิปซัมภายในกระดาษที่ห่อหุ้มด้านบนและล่าง โดยปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเป็นปฏิกิริยา Exothermic การเซ็ทตัวบนสายพาน แสดงดังรูปที่ 2.31 และรูปที่ 2.32 ตามลำดับ





รูปที่ 2.31 สายพานเซ็ทตัว



รูปที่ 2.32 ความยาวของสายพานเซ็ทตัว

9. จุดตัดบอร์ด (Shear/Wet cutting) เป็นจุดที่ตัดบอร์ดออกมาเป็นแผ่นตามขนาดที่กำหนด โดยจุดตัดบอร์ดนี้ยังเป็นจุดที่มีการพิมพ์ข้อมูลต่าง ๆ เช่น เครื่องหมายการค้า วันเดือนปีที่ผลิต ขนาด รุ่น ชนิด ประเภท และข้อมูลมาตรฐานที่ผ่านการรับรองต่าง ๆ เป็นต้น ลักษณะของบอร์ดที่ถูกตัดเป็นแผ่นแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การตัดบอร์ดเป็นแผ่น

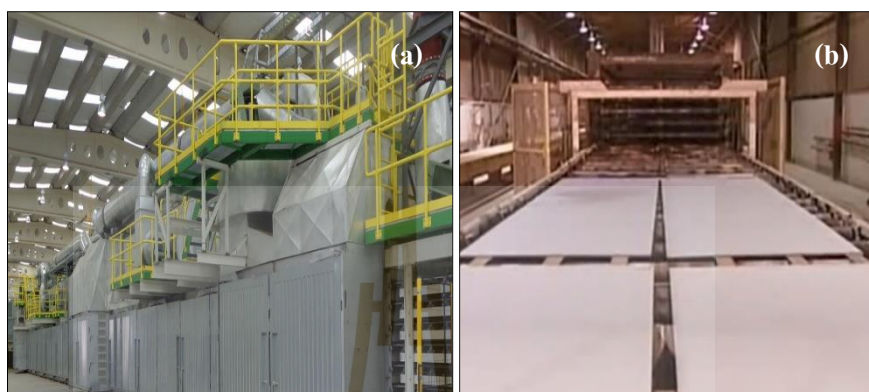
10. จุดกลับบอร์ด (Transfer Table) เป็นจุดกลับบอร์ดให้ด้านหน้าของบอร์ดหงายขึ้นเพื่อเข้าสู่ตู้อบ และสามารถตรวจสอบลักษณะปรากฏบนผิวหน้าบอร์ดได้ การกลับบอร์ดจะมีแขนพลิกบอร์ดดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 การพลิกบอร์ดก่อนเข้าสู่ตู้อบบอร์ด

11. ตู้อบ (Dryer) ใช้ความร้อนจากการผ่านอากาศร้อน (Hot Air) ที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ เช่น หม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือจากการผ่านอากาศเข้าแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องเผาไหม้ (Burner) ซึ่งเชื้อเพลิงอาจเป็นน้ำมันเตา แก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) หรือถ่านหิน (Coal) เป็นต้น แล้วผ่านอากาศร้อนที่ได้เข้าไปในตู้อบ เพื่ออบไล่ไอน้ำส่วนเกินและน้ำในผลิตภัณฑ์บางส่วนของบอร์ดออกไป จนบอร์ดแห้งมีน้ำหนักตามต้องการ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ตามข้อกำหนดด้วย เช่น ความแข็งแรงของพื้นผิวบอร์ด (Surface hardness) การรับน้ำหนักกดแตกหรือค่าการต้าน

แรงค้ำของบอร์ด (Breaking load or Flexural strength) การต้านแรงดึงตะปู (Nail-pull resistance) การต้านการแอ่นตัว (Sagging) และลักษณะปรากฏ (Appearance) เป็นต้น ตู้อบและการลำเลียงบอร์ดเข้าอบดังแสดงในรูปที่ 2.35 (a) และรูปที่ 2.35 (b) ตามลำดับ



รูปที่ 2.35 (a) ตู้อบแผ่นยิปซัม และ (b) การลำเลียงแผ่นยิปซัมเข้าตู้อบ

12. จุดตัดแต่งและบรรจุบอร์ด (Bundler and Stacker) เป็นจุดที่ตัดแต่งขอบบอร์ดให้มีขนาดความยาวและความได้ฉากตามต้องการติดเทปช่วยลอก (Zip tape) และเทปประกบคู่ (End tape) จากนั้นผ่านบอร์ดเข้าสู่จุดจัดเรียง (Stacker) ให้ได้จำนวนตามต้องการ แล้วนำไปจัดเก็บในโกดังสินค้าเป็นลำดับต่อไป

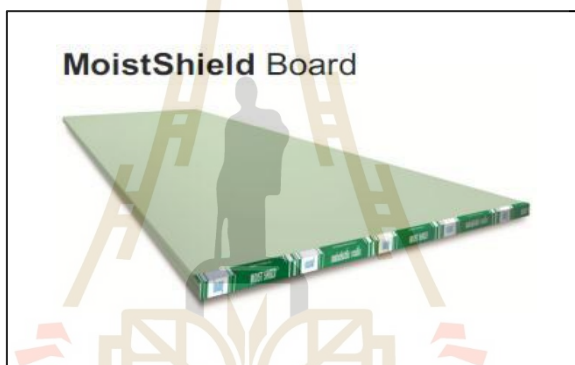
2.2.4 แผ่นยิปซัมตัวอย่างที่ขายในประเทศไทย เอกสารประชาสัมพันธ์ บริษัท คอนอฟ ยิปซัม ประเทศไทย จำกัด



รูปที่ 2.36 แผ่นยิปซัมประเภททั่วไป (Standard) ความหนาตั้งแต่ 9 มม. ขึ้นไป



รูปที่ 2.37 แผ่นฉนวนกันความร้อน (Heat Shield) ความหนาตั้งแต่ 9 มม. ขึ้นไป



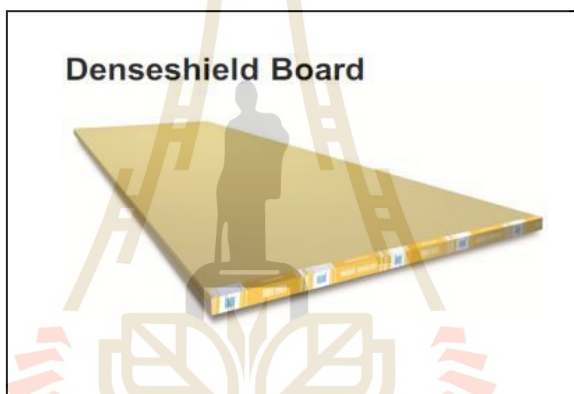
รูปที่ 2.38 แผ่นฉนวนกันความชื้น (Moist Shield) ความหนาตั้งแต่ 9 มม. ขึ้นไป



รูปที่ 2.39 แผ่นฉนวนกันไฟ (Fire Shield) ความหนาตั้งแต่ 13 มม. ขึ้นไป



รูปที่ 2.40 แผ่นยิปซัมประเภทกันเสียงสะท้อน (Sound Shield) ความหนาตั้งแต่ 13 มม. ขึ้นไป



รูปที่ 2.41 แผ่นยิปซัมประเภทกันกระแทก (Dense Shield) ความหนาตั้งแต่ 15 มม. ขึ้นไป

2.2.5 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการผลิตแผ่นยิปซัม

1. มาตรฐานภายในของแต่ละบริษัทที่กำหนดขึ้นมาเอง
2. มาตรฐานที่ออกโดยภาครัฐของแต่ละประเทศหรือกลุ่มการค้าในโซนเดียวกันแล้วเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เพื่อใช้ในการควบคุมผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแผ่นยิปซัม
 - (1) มาตรฐานในประเทศไทย คือ มอก.219-2552 ออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร
 - (2) มาตรฐานของแต่ละประเทศที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง ใช้ในประเทศผู้กำหนดมาตรฐาน และใช้ในระดับสากล เช่น American Standard Test Method (ASTM) โดยเฉพาะ ASTM C1396 ที่จะกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและทดสอบแผ่นยิปซัม ออกโดยสหรัฐอเมริกา

มาตรฐาน BS EN 520 (2004) ของอังกฤษและยุโรปมาตรฐาน AS/NZS 2588 (1998) ออกโดยกลุ่มประเทศออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ เป็นต้น

2.2.6 วัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัม

การเลือกใช้วัสดุเพื่อผลิตแผ่นยิปซมนั้นสามารถใช้วัสดุได้หลากหลายประเภท เนื่องจากวัสดุหลายชนิดให้คุณสมบัติที่เมื่อนำมาใช้กับแผ่นยิปซัมแล้วยังสามารถผลิตได้ ให้คุณภาพใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ยังอยู่ในข้อกำหนดตามเกณฑ์อ้างอิงที่นำมาใช้ เป็นต้น จึงทำให้เกิดการนำวัสดุต่าง ๆ ทั้งสารเคมี สารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ มาใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัม เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบหลายชนิด แต่ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้บริโภคเป็นอันดับแรก

โดยทั่วไปแล้วการผลิตแผ่นยิปซมมีการใช้วัสดุหลักๆ ดังนี้

1. ปูนพลาสเตอร์/สตั๊กโก้ (Plaster/Stucco)

ปูนพลาสเตอร์ที่ใช้ในการก่อสร้างต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 188-2547 (ปูนยิปซัมสำหรับการก่อสร้าง: Gypsum Plaster for Building Purpose) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม ถือเป็น “ปูนประเภทที่ 1” ซึ่งเป็นไฮดรตที่ไม่ได้เติมสารหน่วงการก่อตัว ทั้งนี้เป็นการอ้างอิงวิธีการ และค่าควบคุมตามแนวทางของ ASTM C472-99 (Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete) (American Society for Testing and Materials, 2009) ซึ่งมีค่าควบคุมดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าควบคุมของปูนพลาสเตอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง มอก.188-2547

ลำดับ	คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าควบคุม
1	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	%	≥ 2 ใน 3 ของ SO_3
2	ปริมาณเกลือแมกนีเซียม (Magnesium; Mg) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ MgO)	%	≤ 0.3
3	ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	%	≥ 35
4	ปริมาณเกลือคลอไรด์ (Chloride; Cl) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ NaCl)	%	≤ 0.2
5	การสูญเสียน้ำจากการเผา (Loss of ignition; LOI)	%	4 - 9
6	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1.4 mm (ประมาณ 4 เมช; 1.41 mm เท่ากับ 4 เมช)	%	100

ตารางที่ 2.3 ค่าควบคุมของปูนพลาสเตอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง มอก.188-2547 (ต่อ)

ลำดับ	คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าควบคุม
7	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 มม. (ประมาณ 100 เมช; 149 มม. เท่ากับ 100 เมช)	%	≥ 60
8	ค่าการก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time; IS)	min	5 - 35
9	ค่าการก่อดั้วระยะปลาย (Final setting time; FS)	min	10 - 50
10	ค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive strength)	N/mm ²	≥ 8.4
11	ค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural strength)	N/mm ²	≥ 2.5

โดยปูนพลาสเตอร์ได้มาจากการเผาแร่ยิปซัม (Raw gypsum) ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งยิปซัมธรรมชาติ (Natural gypsum) และยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic gypsum) โดยมีการควบคุมค่าการรับเข้าตามมาตรฐานของแต่ละผู้ผลิต เงื่อนไขการรับเข้าจะขึ้นกับคุณภาพแร่ยิปซัมและแหล่งที่มาที่ต่างกัน ก็ทำให้ค่าควบคุมบางอย่างแตกต่างกันออกไป ปริมาณการใช้แร่ยิปซัมในเครื่องผสมประมาณ 65-70% โดยน้ำหนัก การจัดเก็บที่ดีดังแสดงในรูปที่ 2.42 จะทำให้แร่มีความสม่ำเสมอของความชื้น และไม่กระทบต่อกระบวนการเผาแร่มากนักเพราะจะไม่มีน้ำฝนเข้ามาปะปนในกองแร่ อันจะส่งผลให้แร่ป้อนเข้าระบบมีความชื้นสูง ปัจจัยต่าง ๆ ของแร่ยิปซัมและผลกระทบจากแต่ละปัจจัย แสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.42 แร่ยิปซัมไว้ในโกดังที่มีหลังคาจะป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้ามาได้มาก

ตารางที่ 2.4 ผลจากปัจจัยต่าง ๆ ในเรอียิปซัมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

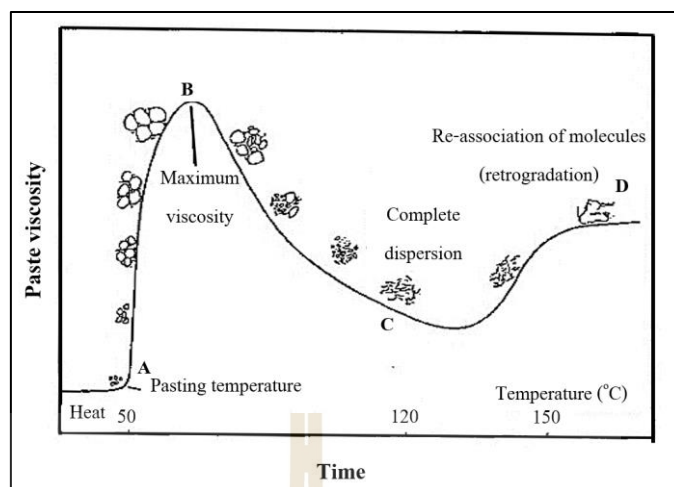
คุณสมบัติของเรอียิปซัม	ผลกระทบต่อคุณภาพและกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม
<p>ความบริสุทธิ์ต่ำ (Low purity)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • คุณสมบัติทางกลของบอร์ดต่ำลง • ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลต่ำลง • การก่อตัวผิปกติ • ความต้องการน้ำผิปกเพิ่มไป • กระทบกระบวนการเผาที่จะไม่เป็นไปตามหลักการเพราะมีสิ่งแปลกปลอมอยู่ในปริมาณมาก
<p>ความชื้นอิสระสูง (High free moisture)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • เคลื่อนย้ายลำบากและมีการติดกับท่อ สายพานลำเลียง • เสียต่อการอุดตันหรือบล็อกเส้นทางลำเลียง • ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการเผามากขึ้น • ป้อนแร่ได้ไม่สม่ำเสมอทั้งแบบที่ใช้น้ำหนักหรือปริมาตร
<p>ขนาดแร่ใหญ่เกินไป (Over particle size)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ค่าใช้จ่ายในการบดสูงขึ้น • อุปกรณ์ในการบดสึกหรือเร็วขึ้น • มีโอกาสปนเปื้อนขนาดที่ใหญ่เกินไปเข้าในกระบวนการผลิต • ป้อนแร่ได้ไม่สม่ำเสมอทั้งแบบที่ใช้น้ำหนักหรือปริมาตร
<p>รูปร่างผลึกไม่สม่ำเสมอ (Different crystal shape)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • มีผลต่อค่าความหนาแน่นโดยรวม (Bulk density) • มีผลต่อการบด
<p>ปริมาณแมกนีเซียมสูง (High Magnesium; Mg)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limit 400-1,000 ppm (MgO) • กระทบต่อเรื่องพันธะการยึดเกาะของแกนบอร์ด • กระทบคุณภาพหากเป็น Magnesium Chloride (MgCl₂)
<p>ปริมาณแอมโมเนียสูง (High Ammonia; NH₃)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • กระทบต่อเรื่องพันธะการยึดเกาะของแกนบอร์ด • เพิ่มการแอ่นตัว (Sagging) ดูดความชื้น และมีกลิ่น
<p>ปริมาณโพแทสเซียมสูง (High Potassium; K)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limit 600 ppm (K₂O) • กระทบต่อเรื่องพันธะการยึดเกาะของแกนบอร์ด
<p>ปริมาณโซเดียมสูง (High Sodium; Na)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limit 400 ppm (Na₂O) • กระทบต่อเรื่องพันธะการยึดเกาะของแกนบอร์ด
<p>ปริมาณคลอไรด์สูง (High Chloride; Cl)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limit 100 ppm (Free Chloride) • กระทบต่อเรื่องพันธะการยึดเกาะของแกนบอร์ด
<p>ปริมาณกำมะถันสูง (High Sulfur; S)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limit < 0.5% • มีกลิ่นและทำปฏิกิริยากับความชื้นเกิดกรดกำมะถัน

2. แป้งดัดแปร (Modified Starch)

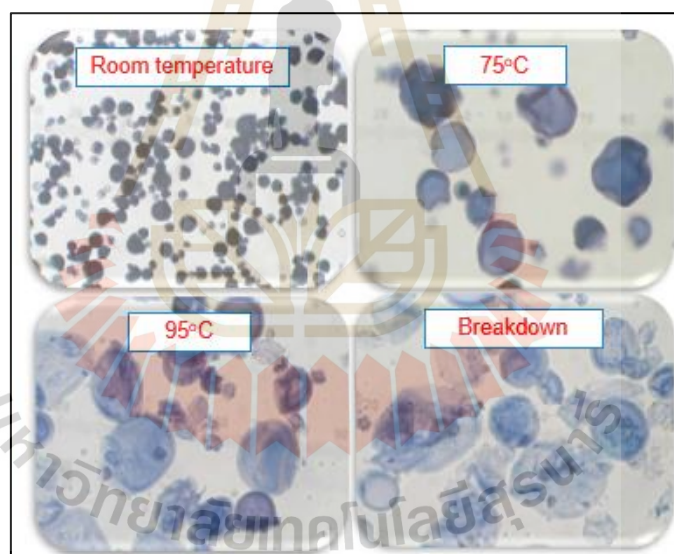
ใช้เพื่อให้เกิดพันธะระหว่างแกนยิปซัมกับกระดาษหน้า-หลังที่ใช้ห่อหุ้มแกนยิปซัม ส่วนมากใช้เป็นแป้งดัดแปรประเภทออกซิไดซ์ (Oxidization starch) เพราะโมเลกุลแป้งไม่ยาวมาก และมีการพองตัวเป็นเจลที่อุณหภูมิไม่สูงมาก (Gel-point) สามารถใช้ได้ทั้งแป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี แป้งข้าวโพด หรือแป้งมันสำปะหลังดังแสดงในรูปที่ 2.43 ซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมแผ่นยิปซัมในประเทศไทย เพราะปริมาณไขมัน และ โปรตีนน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ๆ แป้งที่ได้รับความร้อนจะพองตัวขึ้นจนถึงจุดที่เป็นเจล (Gelatinization point) ดังแสดงในรูปที่ 2.44 และรูปที่ 2.45 (ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ, 2563) ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชัน (Gelatinization temperature) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า “Pasting temperature” โดยจะเป็นอุณหภูมิที่น้ำแป้งเกิดเจลจากการพองตัวเต็มตัวของเม็ดแป้ง จากนั้นเม็ดแป้งจะแตกออก และกลายเป็นกาวยประสานอยู่ในแกนยิปซัมบริเวณรอยต่อของแกนยิปซัมและกระดาษหน้า-หลัง



รูปที่ 2.43 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Tapioca Starch) - แป้งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในการผลิตแผ่นยิปซัมในประเทศไทย



รูปที่ 2.44 ช่วงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของความหนืดแป้ง



รูปที่ 2.45 การพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น

โดยจะมีปริมาณแป้งที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นยิปซัมและกระดาษมากที่สุด เพราะระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาริไฮเดรชันในแกนยิปซมนั้นเม็ดแป้งเมื่อเริ่มดูดน้ำพร้อมรับความร้อนจากแกนบอร์ดก็มีการเคลื่อนตัวไปที่ผิวรอยต่อระหว่างเนื้อยิปซัมกับกระดาษ จนเมื่อผ่านแผ่นยิปซัมเข้าเตาอบ แป้งก็จะสุก และเม็ดแป้งแตกตัวเป็นกาวอยู่ใต้ผิวกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 2.46



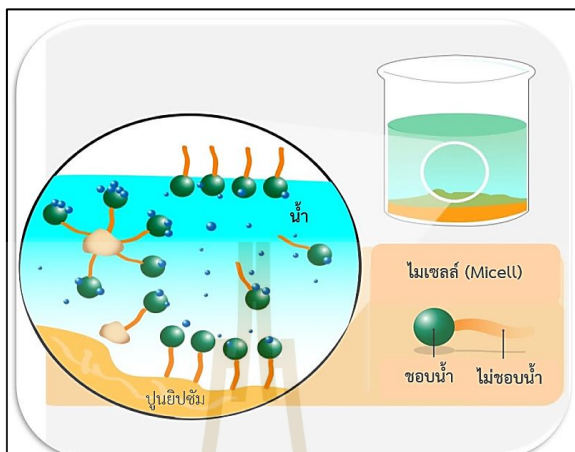
รูปที่ 2.46 บริเวณรอยต่อของแกนยิปซัมและกระดาศ คือ จุดที่มีปริมาณแฉังมากที่สุด

3. สารช่วยการกระจายตัวหรือสารลดน้ำ (Dispersant or Water reducer)

ปริมาณการใช้ประมาณ 0.2-0.4% โดยน้ำหนัก ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิด สารช่วยการกระจายตัวมีชื่อเรียกอีกหลากหลาย เช่น สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สารลดน้ำ (Water reducer) สารทำให้เหลว (Liquefier) สารช่วยการไหล (Fluidizer) สารช่วยแผ่ (Dispersant) หรือสารทำให้มีคุณสมบัติเหมือนพลาสติก (Plasticizer) เป็นต้น ซึ่งก็คือสารจำพวกเดียวกับสบู่มงชักฟอกหรือแชมพูนั่นเอง อาศัยหลักการของไมเซลล์ (Micell) ที่มีอยู่ในสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ช่วยป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของโมเลกุลยิปซัม โดยส่วนหัวจะไปจับกับโมเลกุลยิปซัม โดยใช้ส่วนหางไปจับแล้วล้อมรอบโมเลกุลนั้นไว้ พร้อมกับส่วนหัวก็ละลายในน้ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของยิปซัมได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.47 ซึ่งแสดงการทำงานของไมเซลล์นี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับทำให้อัตราการไหลของสารผสม (Slurry) ที่มีความคงตัวมากยิ่งขึ้น ค่าความข้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency) ที่เปลี่ยนไป โดยการทดลองหาความเหมาะสมของปริมาณการเติมสารช่วยการกระจายตัวนี้ จะทำผ่านการทดสอบที่เรียกว่า “Splat Test” ดังรูปที่ 2.48 ที่จะวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นปูนพลาสติกอร์ที่แผ่ออกบนพื้นผิวราบเรียบ ตามปริมาณของสารช่วยการกระจายตัวที่เปลี่ยนแปลงไป

สารช่วยการกระจายตัวจะลดปริมาณความต้องการน้ำในถังผสมลงได้ ซึ่งทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานในการอบไล่น้ำที่มากเกินไป สามารถเพิ่มความเร็วการผลิตได้ ความแข็งแรงของแกนยิปซัมเพิ่มมากขึ้นเพราะไปลดอัตราส่วน WSR/WGR ได้ ลดความหนืดของ Slurry ทำให้ฟอร์มตัวได้ง่ายขึ้น ช่วยทำให้พันธะระหว่างกระดาศและแกนยิปซัมดีขึ้นจากการที่ซึมเข้าไปใน

กระดาษแล้วทำให้เกิดการเติบโตของผลึกยิปซัมในกระดาษ ซึ่งทำให้พันธะระหว่างกระดาษกับแกนยิปซัมได้ค่าที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.47 การทำงานของสารช่วยกระจายตัวโดยไมเซลล์



รูปที่ 2.48 การแผ่ขยายของ Slurry จาก “Splash Test”

4. สารเร่ง (Accelerator)

ใช้เพื่อช่วยในการก่อตัวระยะต้น (Initial setting time; IS) และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time; FS) เกิดเร็วขึ้น เป็นการเพิ่มความเร็วปฏิกิริยารีไฮเดรชัน (Rehydration) ให้ได้ตามต้องการ ส่วนมากผลิตมาจากการบดแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตให้ละเอียดและมีพื้นที่ผิวมากถึง $7,000-8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ แล้วผสมสารเติมแต่งอื่น ๆ ลงไปด้วย เพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกัน

การจับตัวเป็นก้อน เช่น โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium Sulphate; K_2SO_4) สารลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulphonate) น้ำตาล (Sugar) เป็นต้น เพื่อให้ปูนพลาสเตอร์มีความสามารถในการละลายมากขึ้น และการฟอร์มตัวของผลึกในนิวเคลียสเพื่อเกิดเป็นชิปซัมเร็วขึ้น การเร่งการก่อตัวจะใช้หลักการในการเพิ่มซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) หลังจากละลายด้วยน้ำ เข้าไปใน Slurry จึงสามารถใช้เกลือซัลเฟตชนิดอื่นได้ แต่ต้องระวังคุณสมบัติของเกลือชนิดนั้นๆ ด้วยเช่นกัน เพราะอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของแผ่นบอร์ด เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) เป็นต้น

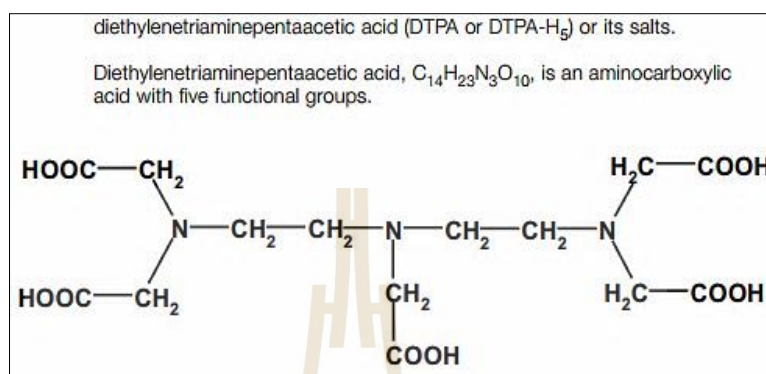
การเก็บสารเร่งในสถานะที่เปิดให้สัมผัสอากาศและน้ำโดยตรงจะทำให้สารเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น ทั้งนี้การใช้สารเร่งที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตัน หรือบล็อกลงถังผสมได้หรือเกิดเป็นก้อนแข็ง (Lump) ตามซอกของเครื่องผสม ท่อ และข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งก้อนแข็งนี้เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการผลิตจะทำให้กระดาษาขาดและต้องหยุดการผลิตลงทันที

5. สารหน่วง (Retarder)

สารหน่วงเป็นสารที่ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับสารเร่ง โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของปฏิกิริยารีไฮเดรชัน จะลดอัตราการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต โดยการหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันนั้น สามารถทำได้ทั้งแบบที่เป็นการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น กลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid groups; $-COOH$) สารกลุ่มโปรตีนที่มีหมู่ของกรดอะมิโน โอลิโกเมอร์ (Amino acid oligomers) ที่มีปริมาณการใช้เพียง 0.01-0.10 % โดยน้ำหนัก หรือจะเป็นกลุ่มของกรดอินทรีย์ (Organic acids) เช่น กรดซิตริก (Citric acid) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) ที่มีปริมาณการใช้เพียง 0.02-0.20 % นอกจากนั้นอาจจะเป็นสารอินทรีย์เคมี ซึ่งสามารถรวมกับธาตุอาหารที่มีประจุบวก เช่น เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส ที่เรียกว่า “คีเลต (Chelates)” ก็ได้ เช่น Diethylenetriamine Penta Acetic Acid Penta-Sodium salt (DTPA) หรือ Ethylene Diamine Tetra-Acetic Acid (EDTA) เป็นต้น ดังตัวอย่างในรูป 2.49. โดยคีเลตจะล้อม โมเลกุลแคลเซียม (Calcium ion; Ca^{2+}) ไว้ไม่เปิดโอกาสให้ประจุลบจากที่อื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้ และยังมีสารเคมีอีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ได้ คือ “อะครีเลตอินทรีย์ (Organic acrylates) เช่น สารประกอบกรดโพลีอะครีลิก (Polyacrylic acid compounds) ก็นำมาใช้ได้

นอกจากสารเคมีแล้วการเติมวัสดุเติมแต่งบางประเภทก็หน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันได้เพราะจะไปรบกวนอัตราเร็วในการตกผลึกของเอมิไฮเดรตไปเป็นไดไฮเดรต ทั้งนี้อาจเป็นการบดบังการเข้าทำปฏิกิริยาของน้ำ การดูดซับน้ำในตัวมันเอง หรือการเพิ่มระยะห่างระหว่างน้ำกับโมเลกุลของเอมิไฮเดรต เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่กล่าวถึง เช่น เส้นใย ไฟเบอร์ เศษพลาสติก เศษผ้า เศษด้าย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดวัสดุเชิงประกอบขึ้นมาใหม่ได้เช่นกันเพียงแต่จะมีคุณภาพเทียบเท่าหรือเหนือกว่าวัสดุดั้งเดิมเท่านั้น

ข้อดีของสารหน่วงคือสามารถช่วยในการผลิตที่มีสายการผลิตยาวทำให้เครื่องผสม (Mixer) สะอาด ไม่มีการการก่อตัวภายในจนเกิดเป็นก้อนแข็ง (Lump) ติดตามข้อต่อ ท่อหรือถังต่าง ๆ อันจะทำให้กระดาษขาดและต้องหยุดการผลิต



รูปที่ 2.49 คีเลต DTPA ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยารีดอกซ์

6. สารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent)

สารทำให้เกิดฟองเป็นสารจำพวก Anionic Fatty Alkyl Ether Sulfate หรือ Fatty Alkyl Sulfate ที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่สม่ำเสมอแทรกในแกนยิปซัมจนเกิดมีรูพรุนในแกนยิปซัม หลังฟองอากาศแตก การมีรูพรุนที่สม่ำเสมอจะทำให้แผ่นยิปซัมทนต่อแรงกดทางกลได้ดีขึ้น ทำให้แผ่นยิปซัมมีน้ำหนักเบา ลดความหนาแน่นของแผ่นยิปซัม เพิ่มคุณสมบัติการดูดซับเสียง ทำให้แผ่นยิปซัมยืดหยุ่น (Flexible) สามารถตัดได้เล็กน้อย โดยการเกิดโฟมนั้นเป็นการผสมกันระหว่าง เนื้อโฟม (Soap หรือ Pure foam) น้ำ และอากาศ รูปร่างฟองโฟมที่ดีต้องมีความเสถียร (Stable) คือ มีขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) ของแผ่นยิปซัมสูงขึ้น และการยึดติดดีขึ้น (Bonding) รูปแบบฟองโฟมขนาดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.50 ซึ่งรูพรุนที่สม่ำเสมอคล้าย ๆ รังผึ้ง คือ รูพรุนที่ดีที่สุด

การเติมมากเกินไปจะทำให้การยึดเกาะกระดาษกับแผ่นยิปซัมต่ำลง เพราะแรงดึงผิวต่ำลงในขณะที่ค่า การจม การแอ่น การหย่อนคล้อย การห้อย หรือที่นิยมเรียกว่า “Sagging” จะสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อคุณภาพของแผ่นยิปซัม อีกทั้งโฟมที่มากเกินไปจะแตกตัวเป็นน้ำและซึมเข้ากระดาษได้ดี ส่งผลต่อผิวหน้า และการการยึดติดของแกนยิปซัมกับกระดาษเช่นกัน



รูปที่ 2.50 รูพรุนในแกนแผ่นยิปซัมที่เกิดจากสารก่อโฟม

7. กระดาษ (Paper)

ใช้สำหรับห่อหุ้มเนื้อยิปซัมเอาไว้ โดยมีกระดาษ 2 ด้าน คือ กระดาษหน้า และกระดาษหลัง ประกอบกันทำให้ผิวหน้าของแผ่นยิปซัมสวยงาม และทำให้แผ่นยิปซัมมีความแข็งแรง เนื่องจากความแข็งแรงของแผ่นยิปซัม 70% มาจากกระดาษ จึงทำให้การรับกระดาษเข้ามาใช้ (In-coming) ต้องตรวจตราอย่างละเอียดถี่ถ้วน และครอบคลุมทุกปัจจัยด้านคุณภาพ กระดาษหน้าจะใช้แกรม (น้ำหนักเป็นกรัมต่อตารางเมตร; g/m^2) สูงกว่ากระดาษหลัง โดยเฉลี่ยมากกว่า 10 แกรมขึ้นไป และกระดาษหน้าจะมีการย้อมสีกระดาษเพื่อเป็นตัวชี้บ่งประเภทของแผ่นยิปซมนั้น ๆ เช่น กระดาษหน้าสีงาช้าง (Ivory) จะใช้กับแผ่นยิปซัมประเภททั่วไป (Standard board) กระดาษหน้าสีงาช้าง (Ivory) จะใช้กับแผ่นยิปซัมประเภททั่วไป (Standard board) กระดาษหน้าสีเขียว (Green) จะใช้กับแผ่นยิปซัมประเภททนชื้น (Moisture resistant board) กระดาษหน้าสีชมพู (Pink) จะใช้กับแผ่นยิปซัมประเภททนไฟ (Fire resistant board) และกระดาษหน้าสีเหลือง (Yellow) จะใช้กับแผ่นยิปซัมประเภททนแรงกระแทกสูงเป็นพิเศษ (Impact resistant board) เป็นต้น ส่วนกระดาษหลังจะมีความกว้างน้อยกว่ากระดาษหน้าและนิยมใช้สีน้ำตาล (Brown) ซึ่งการเลือกใช้สีจะเป็นที่รู้จักกันในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมและผู้บริโภค ตัวอย่างในรูปที่ 2.51 แสดงกระดาษหลังสีน้ำตาล สิ่งที่ต้องตรวจสอบเมื่อรับกระดาษเข้ามาใช้ เช่น วันเดือนปีที่ผลิต (Manufacturing date) ประเภท (Type) แกรม (Grammage) ความสมบูรณ์ของม้วนกระดาษ ค่าแรงดึง (Tensile strength) ค่าการดูดซับน้ำ (Cobb's Test) ค่ารูพรุน (Porosity) ค่าการซึมผ่านของน้ำร้อน (Boiling test) ค่าการขยายตัว (Expansion test) ปริมาณเม็คน้ำมันในกระดาษ (Wax test) การทดสอบการยึดเกาะของเนื้อกระดาษ (Split test) และการทดสอบการติดกาว (Adhesion test) เป็นต้น



รูปที่ 2.51 ม้วนกระดาษที่ใช้ในการผลิตแผ่นยิปซัม

8. กาวทาขอบ (Edge glue)

กาวทาขอบเป็นกาวที่ยึดกระดาษด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นยิปซัมเข้าด้วยกันต้องมีความหนืด (Viscosity) ที่เหมาะสม ยึดติดกระดาษกันได้เร็ว แน่นหนา ไม่ทำให้เนื้อยิปซัมไหลทะลักออกมา และที่สำคัญต้องไม่สลายตัวและเสียคุณสมบัติกาวที่อุณหภูมิสูง เพราะต้องผ่านแผ่นยิปซัมเข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่า 150-300 °C

9. สารเคมีที่ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษ (Special chemicals for technical board)

นอกเหนือไปจากวัตถุดิบพื้นฐานแล้ว การผลิตแผ่นยิปซัมยังต้องการแผ่นชนิดพิเศษหรือคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมด้วย จึงมีการเติมสารเติมแต่งอื่น ๆ เข้าไป เช่น

- 1) กรดบอริก (Boric acid) เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของแผ่นยิปซัม
- 2) โซเดียมไตรเมตตะฟอสเฟต (STMP) เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของแผ่นยิปซัม
- 3) ไยแก้ว (Glass fiber) เพื่อเสริมแรงและป้องกันการทรุดตัวของแผ่นยิปซัมชนิด

แผ่นทนไฟและทนแรงกระแทกสูงเป็นพิเศษ หรือชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติการรับแรงและคงตัวได้ดี

4) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) เพื่อเป็นตัวต้านไฟป้องกันไฟลามในแผ่นยิปซัมชนิดทนไฟหรือชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติทนไฟ

5) ไมโครซิลิกา (Micro Silica) เพื่อเป็นตัวต้านไฟป้องกันไฟลามในแผ่นยิปซัมชนิดทนไฟ หรือชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติทนไฟ

6) น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) เพื่อป้องกันการควบแน่นเข้าไปในแกนยิปซัมใช้ในแผ่นยิปซัมชนิดทนชื้นหรือชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการคุณสมบัติทนชื้น

7) โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulphate) เพื่อช่วยเร่งการก่อตัวระยะปลาย

8) เพอร์ไรท์ (Perrite) เพื่อช่วยในการดูดซับเสียงในแผ่นยิปซัมชนิดดูดซับเสียง

9) แบเรียมซัลเฟต (Barium sulphate; BaSO₄) เพื่อป้องกันไม่ให้รังสี X-ray ผ่านแผ่นยิปซัมชนิดสะท้อนกลับรังสี X ได้

นอกจากนี้ยังมีอีกหลายชนิดของสารเติมแต่งที่ขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของแผ่นยิปซัมหรือจุดประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้ และเป็นหน้าที่ของผู้ผลิตที่จะเลือกใช้และผลิตแผ่นยิปซัมคุณภาพออกมาสู่ผู้บริโภค

2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมลามีน (Basic knowledge of Melamine)

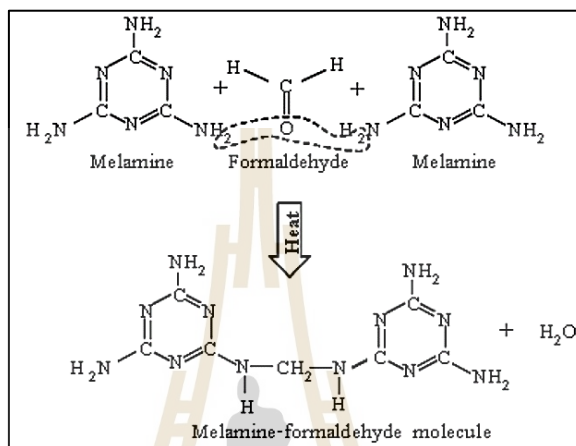
2.3.1 ความหมายและที่มา

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (เฉลิมชัย ไชยณรงค์, 2559)

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) หรือเรซิน (Resin) เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในโลก เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและแข็งตัวเมื่อเย็นลง สามารถเปลี่ยนรูปได้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกครั้ง เมื่อผ่านกระบวนการหลอมและรีไซเคิล (Recycle) เพราะมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว การเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถหลอมเหลวหรือผ่านการอัดด้วยแรงดันสูง ซึ่งโครงสร้างเดิมจะไม่ถูกทำลายไปด้วย เพียงแต่เมื่อผ่านกระบวนการรีไซเคิลเข้าไปซ้ำมาหลายรอบอาจทำให้คุณสมบัติที่ได้ด้อยลงไปหากมีสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ (Impurities) ทั้งนี้เทอร์โมพลาสติกมีชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน สไตรีนอะครีโลไนไตรล์ อะครีโลไนไตรล์บิวตะสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิคาร์บอนเนต และไนลอน เป็นต้น

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) คือ พลาสติกที่มีรูปทรงถาวร เมื่อผ่านการผลิตโดยผ่านความร้อน (Heat) และแรงอัด (Pressure) จะนำกลับไปหลอมละลายอีกไม่ได้เปรียบ แต่มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อเย็นตัวลงจะแข็งมาก ทำให้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมีได้ดี คงรูปหลังผ่านความร้อนและความดันเพียงครั้งเดียว เกิดรอยได้ยาก จากนั้นจะไม่อ่อนตัวและไม่เปลี่ยนรูปร่าง แต่จะเผาไหม้ และเกิดแก๊สสีดำเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสลายตัวเนื่องจากมีโมเลกุลที่เชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น เชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์หรือเมลามีนเรซิน ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ อีพ็อกซีพอลิเอสเตอร์ ยูรีเทน และพอลิยูรีเทน เป็นต้น (บุญยมาศ วอขวา, 2559)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์หรือเมลามีนเรซินเรียกสั้น ๆ และเป็นที่รู้จักกันว่า “เมลามีน (Melamine)” จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชันแบบควบแน่น จนได้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำเป็นผลพลอยได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.52 (สุชน เกลียรยานนท์, 2551)



รูปที่ 2.52 ปฏิกิริยาการเกิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

ทั้งนี้เมลามีนมีประวัติว่าถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus Von Liebig ในปี ค.ศ. 1834 หรือ พ.ศ. 2377 จากการเปลี่ยน Calcium Cyanamide (CaCN₂) ไปเป็น Melamine ด้วยวิธีการทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว แต่ในปัจจุบันการผลิตเมลามีน (C₃H₆N₆) จะผลิตจากยูเรีย (NH₂-CO-NH₂) หรือ (NH₂)₂CO ซึ่งเป็นสารเคมีประเภทสารอินทรีย์ (Organic) ประเภทเอไมด์ (Amide) อันมีสูตรทั่วไปเป็น R-CO-NH₂ และปฏิกิริยาการผลิตเมลามีนจากยูเรียมี 2 ขั้นตอนดังแสดงในสมการที่ 2.10-2.12

ขั้นที่ 1 : ยูเรีย (Urea : 6(NH₂)₂CO) สลายตัวให้กรดไซยานิก (HCNO) และแอมโมเนีย (NH₃) ออกมา ดังสมการที่ 2.10



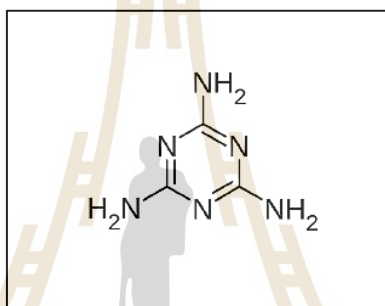
ขั้นที่ 2 : ปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชันของกรดไซยานิก (HCNO) จะได้เมลามีนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมา ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังสมการที่ 2.11



ปฏิกิริยารวม : เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังแสดงในสมการที่ 2.12



ทั้งนี้เมลามีนมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.53 และคุณสมบัติดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.53 สูตรโครงสร้างของเมลามีน

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเมลามีน (สุชน เกลียรยานนท์, 2551)

คุณสมบัติ	หน่วย	รายละเอียด
ชนิดสารเคมี (Chemical type)	---	สารเบสอินทรีย์ (Organic base)
สถานะ (Phase)	---	ผงของแข็งสีขาว
สูตรโมเลกุล (Molecular formula)	---	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$
สูตรเอมพิริกัล (Empirical formula)	---	CH_2N_2
มวลโมเลกุล (Molecular weight)	g/mol	126.12
ความหนาแน่น (Density)	kg/m^3	1,574
จุดหลอมเหลว (Melting point)	$^{\circ}\text{C}$	345 (662 $^{\circ}\text{F}$ หรือ 623 $^{\circ}\text{K}$)
จุดเดือด (Boiling point)	---	จุดที่สารระเหิด (Sublimes)
ความสามารถในการละลายน้ำที่ 20 $^{\circ}\text{C}$ (Water solubility at 20 $^{\circ}\text{C}$)	g/L	3.1

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเมลามีน (สุชน เสถียรยานนท์, 2551) (ต่อ)

ชื่อทางเคมีตาม International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC Name)	---	<ul style="list-style-type: none"> • 1, 3, 5-Triazine-2, 4, 6-Triamine • 2, 4, 6-Triamino-s-triazine • Cyanurotriamide • Cyanurotriamine • Cyanuramide
CAS number	---	108-78-1

เมื่อเมลามีนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นกับฟอร์มัลดีไฮด์ จะได้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และน้ำ ดังที่กล่าวข้างต้นในรูปที่ 2.52 ทั้งนี้นอกจากจะมีส่วนประกอบของเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์แล้ว ยังมีแอลฟาเซลลูโลส (Alpha cellulose) ที่ใช้เพื่อลดการหดตัว (Shrinkage) และแตกร้าว (Crack) ของผลิตภัณฑ์ การขึ้นรูปจะใช้แม่พิมพ์ ความดัน 30-60 เมกะปาสกาล (Dweik et al, 2008) ที่อุณหภูมิประมาณ 145-165 องศาเซลเซียส จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น โดยสมบูรณ์ จึงได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ไม่อ่อนตัวเมื่อโดนความร้อนอีกแต่จะไหม้เกรียมเป็นเถ้า ทนทาน เหนียว ไม่แตกหักง่าย ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี และการฟอกสี ไม่ติดไฟ เป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่สามารถหลอมละลายใหม่ได้อีก ด้วยคุณลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้ จึงมักนำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ ได้แก่ จาน ชาม ถ้วย แก้วน้ำ เครื่องใช้ในครัว แก้วไอศะ ชั้นวางของ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.54 ซึ่งสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ แสดงดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.54 เครื่องใช้ในครัวที่ผลิตมาจากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (ที่มา : www.facebook.com)

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกล และทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Panyakapo et al, 2008)

ลักษณะคุณสมบัติ	คุณสมบัติ
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	1.48
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength, MPa)	60
การยืดตัวแรงดึง (Tensile Elongation, %)	0.79
ความทนแรงกระแทก (Notched Izod Impact, J/m)	16.0
ความต้านทานอุณหภูมิ (Temperature Resistant, °C)	300
การดูดซึมน้ำ (Water Absorption, %)	5.6
การนำความร้อน (Thermal Conductivity, W/m.K)	0.27-0.42

2.4 การนำความร้อน (Thermal conduction)

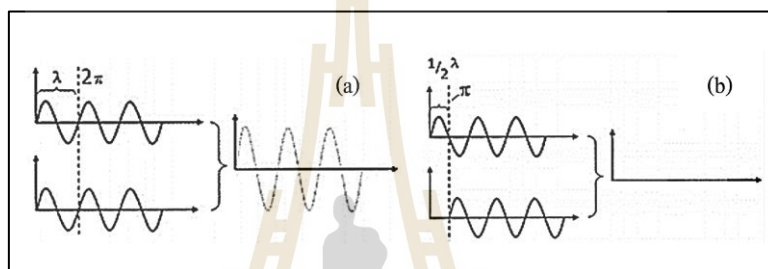
การนำความร้อน (Thermal conduction) เป็นสมบัติของสารที่เกิดจากโมเลกุลที่อยู่ติดกันและสัมผัสกันส่งผ่าน หรือถ่ายเทความร้อนไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งโดยตรง ซึ่งการถ่ายเทจะเกิดจากที่ที่มีความร้อนมากกว่าไปในที่ที่มีความร้อนน้อยกว่า สามารถเกิดขึ้นได้ทุกทิศทางไม่เกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับสมบัติสาร โครงสร้างโมเลกุล ความหนาแน่นหรือสถานะของสาร เป็นต้น แต่ความร้อนจะไม่สามารถผ่านไปในที่สุญญากาศ หรือไม่มีการเรียงต่อกันของโมเลกุลได้ การจะแสดงให้เห็นว่าวัสดุใดนำความร้อนได้ดีกว่ากันจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นตัวชี้บ่ง (Thermal conductivity; k) คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของตัวนำมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K) หรือวัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (W/m-°C) สมการที่ 2.13 แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (2.13)$$

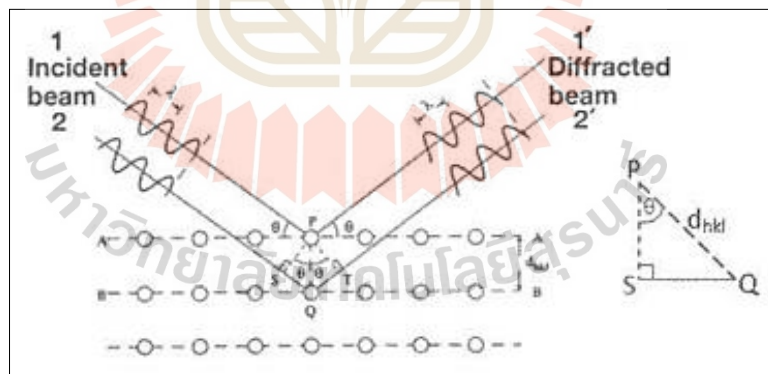
เมื่อ	k	คือ Thermal conductivity (W/m.K) หรือ (W/m.°C)
	Q	คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ (วัตต์; W)
	L	คือ ความยาวหรือหนาของตัวอย่างที่ทดสอบ (m)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่ทดสอบ
	ΔT	คือ ผลต่างของจุดที่วัดอุณหภูมิ (K หรือ °C)

2.5 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิค X-ray diffraction

เทคนิคการวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สารองค์ประกอบในระดับโครงสร้างผลึก ซึ่งจะทำให้ทราบชนิดของธาตุ สารประกอบ ระบบผลึก ขนาดผลึก และค่าแลตติซพารามิเตอร์ เป็นต้น รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-10.0 นาโนเมตร ซึ่งคลื่นในย่านนี้ จะสามารถเกิดการแทรกสอดได้ทั้งแบบเสริมสร้างและหักล้าง ดังรูปที่ 2.55 (a) และรูปที่ 2.55 (b) ตามลำดับ



รูปที่ 2.55 (a) การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง และ (b) การแทรกสอดแบบหักล้าง



รูปที่ 2.56 แบบจำลอง Bragg's Law

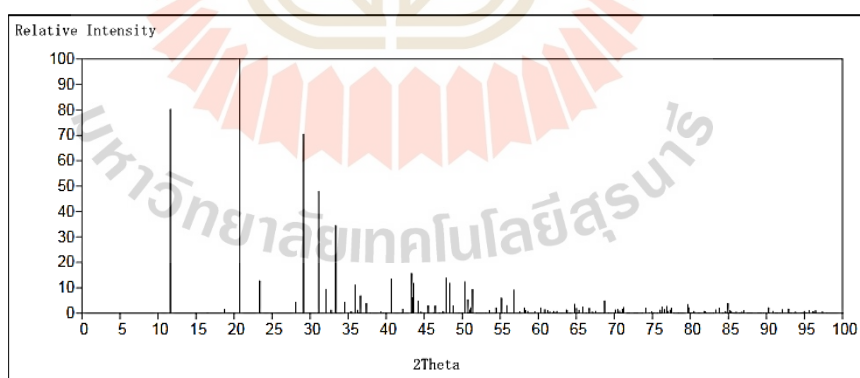
ในปี ค.ศ. 1912 เซอร์วิลเลียม เฮนรี แบร็กก์ (W.H. Bragg) และเซอร์วิลเลียม ลอว์เรนซ์ แบร็กก์ (W.L. Bragg) ได้เสนอว่าโครงสร้างผลึกประกอบไปด้วย “ชั้น (Layer)” หรือ “ระนาบ (Plane)” ของอะตอมที่สามารถจะสะท้อนคลื่นตกกระทบได้ โดยมุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อนและคลื่นที่สะท้อนออกมาจากระนาบจะมีความเข้มสูงเกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้างได้ แต่ต้องมี

ความแตกต่างของระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นที่ถูกสะท้อนออกมาจากแต่ละระนาบใด ๆ กับระนาบข้างเคียงกันด้วย โดยจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.56 และ ยังทำให้ได้สมการที่ 2.14 ที่ใช้ในการอธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยโครงสร้างผลึกที่มีชื่อว่า “กฎของแบร็ก (Bragg’s Law)”

$$2d_{hkl} \sin q = n\lambda \quad (2.13)$$

เมื่อ	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (nm)
	n	คือ ลำดับการสะท้อน
	d_{hkl}	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ h, k, l
	q	คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเครื่อง X-ray Diffractometer จะแสดงเป็นกราฟที่บันทึกค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้กับมุมที่ทำการวัด (2θ , $2q$) ซึ่งพีคที่แสดงออกมาจะสามารถระบุได้ว่าเป็น โครงสร้างผลึกของสารชนิดใด โดยมีองค์กร “International Center for Diffraction Data (ICDD)” เป็นผู้เก็บรวบรวมข้อมูลพีคอ้างอิง ลักษณะของพีคแสดงในรูปที่ 2.57



รูปที่ 2.57 ตัวอย่าง Peak ของ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

2.6 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

เนื่องจากการศึกษาเรื่องวัสดุเชิงประกอบของการผลิตแผ่นยิปซัมยังมีอยู่น้อยและเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเป็นส่วนมาก เพราะการทดลองผลิตแผ่นยิปซัมจริงนั้นจำเป็น

ต้องหยุดสายการผลิต การเตรียมสูตรการผลิต การเตรียมสารเติมแต่งต่าง ๆ หรือการเตรียมคน เพื่อพร้อมรับภาวะฉุกเฉินจากปัญหาการผลิต เช่น การอุดตันของการเติมสารเติมแต่งในเส้นท่อ กระดาษขาดจากความชื้นหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายยิปซัม การไม่ก่อตัวของสารละลายยิปซัม ความผิดปกติด้านสภาพปรากฏ เป็นต้น แต่จากการสืบค้นก็ยังพบวารสารและงานวิจัยบางส่วนที่สามารถนำมาศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่สนใจได้อีกดังต่อไปนี้

Franz Wirsching (1985) เขียนหนังสือเรื่อง “Calcium Sulfate” ลงใน Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry”, 5th Edition เป็นภาษาเยอรมัน ได้รับการแปลและเรียบเรียงเป็นภาษาอังกฤษ โดย Freda Zu Castell-Ruedenhausen อธิบายรายละเอียดของระบบ $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ที่เกี่ยวกับเรื่องสถานะ (Phases) การสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ การเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration Reaction) ของยิปซัม โครงสร้างและการละลาย การเกิดยิปซัมสังเคราะห์ การผลิตปูนปลาสเตอร์ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแผ่นยิปซัม การวิเคราะห์ทางเคมีที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยิปซัมทั้งหมด

เพ็ญพร พุ่มกumar (2001) การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วนในการผลิต แผ่นยิปซัม (The Feasibility Study of Producing Gypsum Plasterboards by Using Marble Powder Instead of Gypsum Jointing Plaster) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นหินอ่อนมาใช้แทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วนในการผลิตแผ่นยิปซัม รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุ และเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วน เป็นการเพิ่มพูนมูลค่าของฝุ่นหินอ่อนและลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากฝุ่นหินอ่อน ทดลองโดยนำฝุ่นหินอ่อนหาส่วนประกอบทางเคมี และนำฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัม ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30, 40 50, 60 และยิปซัมปลาสเตอร์ร้อยละ 100 จำนวน 7 กลุ่มตัวอย่าง มาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนยิปซัมสำหรับการก่อสร้าง มอก.188-2527 ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยิปซัม มอก. 219-2524 และทดสอบสภาพการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C-177 ผลการวิจัยการศึกษาคือความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วนในการผลิตแผ่นยิปซัม พบว่าฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วนในการผลิตแผ่นยิปซัมได้ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐาน มอก.188-2527 มีส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Loss of Ignition และอื่น ๆ ด้านความละเอียด และความอยู่ตัวเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน การหาเวลาก่อตัว การต้านแรงอัดรวมทั้งคุณสมบัติเชิงกล แรงกดประลัย และ โมดูลัสแตกร้าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 7 กลุ่มตัวอย่างสภาพการนำความร้อนตาม ASTM C-177 มีสภาพเป็นฉนวนกันความร้อน ปัญหา และข้อเสนอแนะจากการศึกษาคือ ปัญหาที่พบปูนยิปซัมสำหรับการก่อสร้าง ตาม มอก. 188-2527 ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาด จึงใช้ปูนยิปซัมปลาสเตอร์ G-200 ทรายข้างแทน การทดลองเพิ่มเติมคือ

นำฝุ่นหินอ่อนผสมกับเส้นใย และสารเคมีที่ใช้ควบคุมเวลา ของการแข็งตัวและสารเคมีที่ช่วยให้ การผสมสารเคมีต่าง ๆ เข้ากันได้ดีขึ้น

เมทีนี มาให้ (2012) คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่าง ๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น โดยนำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine Formaldehyde Resins) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตที่ไม่สามารถนำกลับมาหลอมให้อ่อนตัว ซ้ำได้ ในกระบวนการผลิตจะเกิดเศษครีบและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียจำนวนหนึ่งไม่สามารถนำมา ขึ้นรูปซ้ำได้อีก วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเชิงทดลองการนำเอาเศษครีบที่เหลือจากกระบวนการผลิต ตกแต่งและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียมาผสมกับผงเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ที่ยังไม่ผ่าน กระบวนการขึ้นรูป โดยจะทดลองวิธีการขึ้นรูปสองวิธีคือขึ้นรูปด้วยการอัดพร้อมกับการให้ความร้อน (Compression Molding) และขึ้นรูปด้วยการอัดและให้ความร้อนภายหลังการอัด (Cold Molding) ซึ่งคาดว่าวิธีที่สองจะใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าและศึกษาการกำหนดปริมาณส่วนผสม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติเชิงกลซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบ การต้านแรงอัด แรงดัด แรงกระแทก คาดว่าจะสามารถกำหนดวิธีเพิ่มมูลค่าให้กับเศษเมลามีนได้ ผลการศึกษาพบว่า การอัดแบบแม่พิมพ์เย็นให้ความแข็งแรงของวัสดุที่น้อยกว่าเนื่องจากข้อด้อย ของวิธีการขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพการบรรจุอนุภาคสาร (Packing) ต่ำกว่า จากการหาขอบเขต การขึ้นรูปเย็นพบว่าขอบเขตการขึ้นรูปเย็นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือหลังจากอัดด้วยแม่พิมพ์เย็น Pre-heating ที่ 100 °C 15 ชั่วโมง จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 160 °C 1 ชั่วโมง จากการศึกษาวัสดุ รีไซเคิลพบว่า การเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีนเข้าไปในเมลามีนใหม่ทำให้ความแข็งแรงดัด (Flexural strength) และแรงกระแทก (Impact strength) ลดลง แต่ช่วยปรับปรุงความสารณในการรับ แรงอัด (Compressive strength) ได้ดีขึ้นเมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม

เฉลิมชัย ไชยธรรพ์ (2016) ผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกล ของคอนกรีตมวลเบา ใช้เศษเมลามีนเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายบางส่วนโดยมีอัตราส่วน วัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และ 0.5 ตามลำดับ การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเมลามีนโดยน้ำหนักร้อยละ 15, 25 และ 35 ตามลำดับ และการแทนที่ วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสด เท่ากับ 1,000 1,100 1,200 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และอายุบ่มเท่ากับ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุยึดประสาน และมวลรวมละเอียด อีกทั้งยังศึกษาความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ความพรุน โครงสร้างจุลภาคและการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ที่ผสมเศษเมลามีนพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน 25% จะรับแรงอัดได้สูงสุด และการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10% ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองเชิง

แฟกทอเรียล โดยมี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ มีค่าความหนาแน่นแห้งแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย ขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนยังส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ปกติ ซึ่งการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ปกติ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่งผลให้ปริมาณรูพรุนรวมของเพสต์เพิ่มมากขึ้นและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเพสต์ลดลงเมื่อเทียบกับเพสต์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ปกติ สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพบว่า เศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีการกระจายตัวได้ดี ทั้งที่ผิวหน้าตัดเรียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งดูได้จากความเป็นเนื้อเดียวระหว่างซีเมนต์เพสต์ และเศษฝุ่นเมลามีน อีกทั้งการรีไซเคิลเศษเมลามีน โดยใช้แทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ยังสามารถช่วยให้การชะละลายของสารปนเปื้อนโลหะหนักลดลงได้ เมื่อเทียบกับการชะละลายเศษเมลามีนโดยตรง ซึ่งการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีค่าไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ผลการศึกษาทำให้ทราบผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์และสามารถใช้เป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีศักยภาพมากพอในการนำไปใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเดิมฟองอากาศ

หฤทัทก์ กิรติเสวี ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล และอภิรัตน์ เล้าห์บุตรี (2010) อธิบายความหมายวิวัฒนาการความเป็นมา ประเภท ประโยชน์ การนำไปประยุกต์ใช้ และบทสรุปของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

บรรเทิง จุนใจ (2013). การศึกษาความเป็นไปได้เพื่อลดปริมาณความต้องการน้ำในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม : กรณีศึกษา บริษัท คนอพยบยิปซัม (ประเทศไทย) จำกัด เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษา 3 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณความต้องการน้ำในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม ได้แก่ ปูนพลาสเตอร์ขนาด 32-63 μm ขนาด 63-200 μm และชนิดของสารเคมีช่วยการกระจายตัว โดยปูนพลาสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะสุ่มเพียงครั้งเดียว โดยมีค่า Water to Stucco Ratio (WSR) 0.78 เหมิไฮเดรตเฉลี่ย 78.63% แอนไฮไดรต์ชนิดละลายได้เฉลี่ย 12.63% และแอนไฮไดรต์ชนิดละลายได้ช้าเฉลี่ย 0.97 % จากนั้นใช้ 2^k Design Of Experiment

ออกแบบ และวิเคราะห์ผลการทดลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ละเงื่อนไขทำ 3 ซ้ำ 24 การทดลอง พบว่าค่าที่เหมาะสมของอนุภาคปูนพลาสเตอร์ขนาดระหว่าง 32-63 μm คือ 60 % w/w ขนาดอนุภาค 63-200 μm คือ 31 % w/w และชนิดสารเคมีช่วยการกระจายตัวแบบ โพลีคาร์บอกซีเลทตามลำดับ โดยปัจจัยจากสารเคมีช่วยการกระจายตัวชนิด โพลีคาร์บอกซีเลทที่มีอิทธิพลสูงที่สุด จากนั้นทดลองลด ปริมาณน้ำ 0-25 % w/w และใช้สารเคมีช่วยการกระจายตัวชนิด โพลีคาร์บอกซีเลท 1.0 % w/w พบว่า ลดค่า WSR ได้อย่างมีนัยสำคัญจนถึงระดับ 0.62-0.66 คิดเป็นปริมาณน้ำ 15-20 % w/w โดยที่ คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับตัวเปรียบเทียบ (Blank) จากการทดลองอบไล่ น้ำ ที่ 40 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำที่เดิมลงไปแปรผัน โดยตรงกับปริมาณน้ำที่ระเหย ออกมา และการทดลองเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีช่วยการกระจายตัวชนิด โพลีคาร์บอกซีเลท 0-1% w/w กับค่าการก่อดั้วระยะต้น (IS) พบว่าค่าการก่อดั้วระยะต้นแปรผันตรงกับปริมาณสารเคมี ช่วยการกระจายตัวที่ใช้ และปริมาณสารเคมีช่วยการกระจายตัวสามารถใช้ได้น้อยกว่า 0.5 % w/w จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการผลิตที่ความเร็วการผลิต 30 m/min กำลังการผลิต 45,520 $\text{m}^2/\text{วัน}$ และ 22 ชั่วโมง/วัน พบค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการใช้สารเคมีช่วยการกระจายตัว Poly Carboxylate base เท่ากับ 10,014 บาทต่อวัน ในขณะที่ค่าใช้จ่ายก๊าซธรรมชาติที่ใช้อบบอร์ดจากการลดน้ำ 15 % w/w และ 20 % w/w เท่ากับ 18,200 และ 24,211 บาทต่อวัน ตามลำดับ เมื่อหักลบผลต่างค่าสารเคมีช่วย การกระจายตัวจะได้ผลประหยัดจากการลดน้ำ 8,186 และ 14,197 บาทต่อวัน ตามลำดับ

มยุรี ปาลวงศ์ (2009) ได้เรียบเรียงข้อมูลเพื่อใช้เป็นเอกสารเผยแพร่และอ้างอิงของ สำนักบริหารยุทธศาสตร์ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม อธิบายประวัติของอุตสาหกรรมยิปซัมในประเทศไทย ประโยชน์ของยิปซัม กระบวนการผลิตแผ่น ยิปซัม และประเภทของแผ่นยิปซัม

Sebastian Förthner (2017) Basic Training Research & Development Document ซึ่งเป็น เอกสารที่สอนเกี่ยวกับเรื่องพื้นฐานของอุตสาหกรรมยิปซัม (Gypsum basic) จากบริษัท Knauф Gypsum สำนักงานใหญ่ เมืองอิโฟเฟิน (Iphofen) ประเทศเยอรมันนี้ ในปี ค.ศ. 2017 ซึ่งคนอพยพ ยิปซัม คือ บริษัทที่มีประวัติศาสตร์เกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม และปูนยิปซัมมานาน กว่า 80 ปี ในยุโรป เนื้อหาจะอธิบายตั้งแต่เริ่มแรกการเกิดแร่ยิปซัม จนกระทั่งการนำมาผลิต เป็นผลิตภัณฑ์

Charles Blow Bob Bruce and Gary Murray (2010) ได้อธิบายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการลด ปริมาณความต้องการน้ำของ Hemihydrate Plasters ที่มีปัจจัยมาจากสถานะ (Phase) ขนาดอนุภาค (Particle size) การเข้ากันได้ (Disintegration) และพลังงานของพื้นผิวพลาสเตอร์ (Surface Energy) ซึ่งการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อปริมาณความต้องการน้ำของกระบวนการผลิต

แผ่นยิปซัม และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแผ่นยิปซัมที่ผลิตออกมา ทำให้เข้าใจปัจจัยกระทบบางอย่างที่ต้องระมัดระวังเมื่อดำเนินงานวิจัย

Dr.Stephan Dietz (2017) Basic Training Research & Development Document ซึ่งเป็นเอกสารที่สอนเกี่ยวกับเรื่องพื้นฐานการเผาแร่ยิปซัม (Calcining of gypsum, Influence on the products) จากบริษัท Knauf Gypsum สำนักงานใหญ่ เมืองอิโฟเฟิน (Iphofen) ประเทศเยอรมันนี้ ในปี ค.ศ. 2017 ซึ่งคอนอพิยซัมคือบริษัทที่มีประวัติศาสตร์เกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมและปูนยิปซัมมานานกว่า 80 ปี ในยุโรป เนื้อหาเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาแร่ยิปซัม หลักการตั้งค่าควบคุมเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง วิธีการวัดคุณสมบัติปูนพลาสเตอร์ และการควบคุมคุณภาพ

บุษยมาศ วอชวา (2016) การแปรรูปเศษเมลามีนเป็นวัสดุบริไซเคิลเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เมลามีน เป็นงานวิจัยการลดปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนโดยนักวิจัยจะนำเศษวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาแปรรูปเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยศึกษาเทคนิคการแปรรูปอัตราส่วน และขนาดที่เหมาะสม เพื่อจะนำมาใช้เป็นวัสดุบริไซเคิล แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของชิ้นงานตามวิธีการใน มอก. 1245-2553 (มาตรฐานสารอัดแบบฟอร์มัลดีไฮด์) พบว่า สามารถบดย่อยเศษเมลามีน ร่อนแยกขนาดให้ได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นตัวเติม (Filler) ร่วมกับการใช้ผงเมลามีนใหม่ในกระบวนการผลิตเมลามีนครั้งต่อไป ในอัตราการเติม 0, 25, 50 และ 75% โดยน้ำหนัก ขนาดเล็ก (Small : S) < 600 ไมโครเมตร ขนาดกลาง (Middle : M) 2 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่ (Large : L) > 2 มิลลิเมตร นำส่วนผสมมาอัดร้อนที่ 180 °C แรงแัด 100 kg/cm² เมื่อวัดคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพ พบว่าขนาดและอัตราส่วนผสมส่งผลต่อค่าด้านทานแรงดัดโค้ง ค่าการดูดซึมน้ำก่อนและหลังต้ม โดยขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าด้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ลดลง และค่าการดูดซึมน้ำทั้งก่อนและหลังต้มสูงขึ้น การผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณที่มากขึ้น แต่ขนาดอนุภาคและสัดส่วนผสมไม่ส่งผลต่อค่าการต้านทานการกัดกร่อนของกรดกำมะถัน (H₂SO₄) รวมไปถึงลักษณะทางกายภาพที่ไม่ได้เปลี่ยนไป ค่าที่ดีที่สุดคือเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร (mm) ผสมไม่เกิน 50% ซึ่งมีค่าด้านทานแรงดัดโค้งอยู่ในช่วง 99.46-110.61 MPa ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 0.13-0.20% และค่าการดูดซึมน้ำหลังต้มอยู่ในช่วง 0.27-0.70% ซึ่งทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสารอัดแบบเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (มอก. 1245 – 2553) ที่กำหนดค่ามาตรฐานการต้านทานแรงดัดโค้งที่ ≥ 79 MPa ค่าการดูดซึมน้ำ ≤ 0.8 % และค่าการดูดซึมน้ำหลังต้ม ≤ 1.0 % ตามลำดับ จึงพบว่า สามารถบดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์แล้วนำไปใช้เป็นตัวเติมได้เลยโดยไม่ต้องคัดแปรสภาพของมัน

Yi Ding Youchun Fang Hui Fang Qicai Zhang, fengjun Zhang and Won-Chun Oh (2015) Study on the Retarding Mechanism and Strength Loss of Gypsum from Hydrolyzed Wheat Protein

Retarder ศึกษาการปกปิดการเป็นสารหน่วง (Retarder) และการสูญเสียความแข็งแรงของยิปซัมสังเคราะห์แบบ FGD (Flue-gas Desulfurization ; FGD) ที่ได้มาจาก Huainan heat-engine plant มีความบริสุทธิ์ 71.4% การทดลองใช้อัตราส่วน Water to Stucco/Gypsum Ration (WSR/WGR) 0.59 และโปรตีนข้าวสาลีที่ผ่านการไฮโดรไลซิสแล้วชนิดที่มีขายในท้องตลาดเรียกว่า QWP-40 การศึกษาการเติบโตของผลึกจากเริ่มผสมน้ำ และโปรตีนข้าวสาลี QWP-40 ลงไป 0.2% โดยน้ำหนัก ไปจนกระทั่งเกิดการแข็งตัว และก่อผลึกสมบูรณ ศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในเฟสของเหลววัดโดยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectrometry (AAS) ส่วนความเข้มข้นของปริมาณไอออน SO_4^{2-} วัดโดยใช้ Weighting method of $BaSO_4$ ผลการทดลองจะดูผลกระทบจากการใช้โปรตีนข้าวสาลีที่มีต่อกระบวนการรีไฮเดรชันหรือการดูดน้ำกลับเพื่อก่อผลึก ความเข้มข้นของไอออนในเฟสที่เป็นของเหลว ค่าองศาของการเหนียวจุดอมตัว และรูปร่างของผลึกปูนยิปซัม และยังศึกษาการลดลงของความแข็งแรงของผลึกปูนยิปซัมที่เกิดขึ้นใหม่จากการผสมโปรตีนข้าวสาลีด้วยการใช้ตรวจสอบ ผลการทดลองพบว่า โปรตีนข้าวสาลีมีผลทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชัน พร้อมทั้งความแข็งแรงที่ลดลงของผลึกกันท์ โดยไปลดอัตราการรีไฮเดรชันของ Ca^{2+} ในเฟสของเหลว ทำให้ทิศทางของผลึกไม่เป็นระเบียบเล็กน้อย แต่ส่งผลให้ปริมาณผลึกรูปเข็ม (Needle-shaped) ลดลง เกิดการก่อผลึกที่ช้าลงอย่างมีนัยยะสำคัญ QWP-40 ทำให้ผลึกรูปเข็มที่ไม่หักลดลง การไขว้ทับกันของผลึกรูปเข็มน้อยลง การเชื่อมโยงผลึกจึงลดลง อีกทั้งการที่ QWP-40 ไปเคลือบนิวเคลียสของผลึกและรวมตัวกับ Ca^{2+} ที่อยู่บนพื้นผิวยิปซัม (Dihydrate) ทำให้ไปขัดขวางการก่อผลึกยิปซัม โดยไปลดค่าพลังงานที่พื้นผิวของนิวเคลียสผลึก ยับยั้งการเติบโตของผลึก และทำให้การก่อตัวยาวนานขึ้น การทดลองในโครงการนี้ เพื่อให้ทราบถึงจำนวนการทดลองที่เหมาะสมและมีความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

มณเฑียร โอทองคำ สุจิระ ขจรจิตต์เมตต์ และปิติกานต์ กร้ามาต (2009) การใช้เศษฝุ่นฝ้ายเป็นวัสดุผสมในแผ่นยิปซัม Dust Cotton Fiber as an Added Material in Gypsum Boards) ศึกษาการใช้เศษฝุ่นฝ้ายมาเป็นวัสดุผสมในแผ่นยิปซัม โดยนำเศษฝุ่นฝ้ายจากโรงงานปั่นด้าย ทดลองผสมกับปูนยิปซัมในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนัก ตามลำดับ นำมาหล่อในแบบขนาด $300 \times 400 \times 9$ มิลลิเมตร และใช้ปริมาณน้ำที่ร้อยละ 77 ของน้ำหนักปูนยิปซัม จากนั้นนำมาทดสอบน้ำหนัก แรกกดประลัยและโมดูลัสแตกร้าว พบว่า แผ่นยิปซัมที่ไม่ได้ผสมเศษฝุ่นฝ้ายจะมีค่าแรงกดประลัย และโมดูลัสแตกร้าวผ่านตามเกณฑ์ มอก.219-2524 คือ 169.38 นิวตัน และ 3.62 เมกะปาสกาล ส่วนแผ่นยิปซัมที่ผสมเศษฝุ่นฝ้ายนั้นมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ทั้งค่าแรงกดประลัย และค่าโมดูลัสแตกร้าว แต่น้ำหนักจะมีค่าที่ลดลงเมื่อผสมเศษฝุ่นฝ้ายที่เพิ่มขึ้น นักวิจัยต้องการเพิ่มปริมาณของเศษฝุ่นฝ้ายมากยิ่งขึ้นจึงทดลองผสมสารยึดติด 2 ชนิด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และพอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) ผลการทดลองที่เป็นที่ยอมรับ

ตามเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวคือ แผ่นยิปซัมที่ใส่สารยึคติดชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยที่แผ่นยิปซัมที่มีส่วนผสมของเศษฝุ่นฝ้ายร้อยละ 10 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 6 ของปริมาณน้ำที่ใช้ได้ค่าแรงกดประลัย และโมดูลัสแตกร้าวผ่านตามเกณฑ์ มอก.219-2524 คือ 135.52 นิวตัน และ 3.12 เมกะปาสคาลตามลำดับ (ข้อกำหนดของ มอก. 219-2524 คือ ค่าแรงกดประลัยมากกว่า 135 นิวตัน และ โมดูลัสแตกร้าวมากกว่า 3.0 เมกะปาสคาลตามลำดับ) และน้ำหนักที่ได้มีค่าที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 17 ของแผ่นยิปซัมที่ไม่ได้ผสมเศษฝุ่นฝ้าย เศษฝุ่นฝ้ายสามารถนำไปพัฒนาเพื่อการผลิตเป็นแผ่นยิปซัมสำหรับงานก่อสร้างในอนาคตต่อไป

ปิยะวดี บัวจงกล วัลยุทธ เฟื่องวิวัฒน์ และวีรญา ธรรมจันทร์ (2014) แผ่นใยไม้อัดยิปซัมจากไม้อูคาลิปตัสยูโรฟิลลา (Gypsum Fiber Boards from *Eucalyptus urophylla*) นำไม้อูคาลิปตัสยูโรฟิลลา (*Eucalyptus urophylla*) ผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัดยิปซัมที่ทำจากเส้นใยยูคาลิปตัส ยูโรฟิลลา ผสมกับยิปซัมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 15 : 85, 20 : 80, 25 : 75 และ 30 : 70 โดยแผ่นที่ผลิตได้นำไปทดสอบคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D1037 จากนั้น นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ และสมบัติด้านต่าง ๆ ของแผ่นใยไม้อัดยิปซัมจากไม้อูคาลิปตัส ยูโรฟิลลาสรุปได้ว่า อัตราส่วนของเส้นใยยูคาลิปตัส ยูโรฟิลลากับยิปซัมมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลสมบัติของแผ่นใยไม้อัดยิปซัม และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำมาผลิตแผ่นใยไม้อัดยิปซัมคือ 25:75

Ana Jiménez Rivero Ana de Guzmán Báez and Justo García Navarro (2014) New composite gypsum plaster-ground waste rubber coming from pipe foam insulation งานวิจัยเพื่อหาสารประกอบคอมโพสิต (Composite) ชนิดใหม่จากของเสียโรงงานผลิตฉนวนยางหุ้มท่อในประเทศสเปน เพื่อนำมาบดผสมลงในแผ่นยิปซัม สืบเนื่องจากมีของเสียในปี ค.ศ. 2004-2010 เฉลี่ย 39,750 ตันต่อปีหรือคิดเป็น 400 ตันต่อปีต่อโรงงาน เกิดปัญหาในการกำจัดแบบฝังกลบ (Landfill) ยางหุ้มฉนวนมีความหนาแน่น 45-100 kg/m³ การทดลองทำในห้องปฏิบัติการทางกายภาพและทางกล มหาวิทยาลัยมาดริด (UPM) โดยอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 25.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 36.3% ใช้ปูนยิปซัมเกรด E-35 ตามมาตรฐานยุโรป UNE-EN-13279-1 และยางหุ้มฉนวนจากโรงงานผลิตฉนวนหุ้มท่อที่ได้รับการขึ้นทะเบียนของเสียใน European List of Waste (ELW) โดยก่อนนำยางหุ้มฉนวนมาใช้ต้องนำไปบดและร่อนแยกขนาดให้ได้ 1-2, 2-4, 4-6 และ 20-25 mm แล้วนำมาผสมในยิปซัมที่อัตราส่วนน้ำต่อยิปซัม (w/p) 0.70-0.76 โดยผสมยางหุ้มฉนวนที่บดแล้ว 1.25-7.50 % โดยน้ำหนักยิปซัม หล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด 40×40×160 mm ปล่อยให้แห้ง 6 วันในห้องแล็บอบ 1 วันในตู้อบ 38-42 °C ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพตามมาตรฐานการทดสอบ UNE-EN-13279-2 และ UNE-EN-102-039-85 จากการทดลองพบว่าปริมาณการเติมยางหุ้มฉนวนมากที่สุดที่ทำได้ คือ 7.50% โดยน้ำหนักยิปซัม การผสมเข้ากัน

ได้ดีไม่มีการลอยตัวของยางในแท่งปริซึม ให้น้ำหนักมวลสารที่เบาขึ้น เพราะลดความหนาแน่นลง ได้มากที่สุดถึง 49 % แต่ค่าความแข็งแรงทางกลจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมและเมื่อขนาดเม็ดยางหุ้มฉนวนใหญ่ขึ้น แต่ก็ยังอยู่ในมาตรฐานของ UNE-EN 13279 ยกเว้นขนาด 20-25 mm ที่ปริมาณการเติม 5.0 และ 7.5% หนึ่งขนาดที่เหมาะสมที่สุดของเม็ดยางหุ้มฉนวนคือ 4.6 mm งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการลดปริมาณขยะที่จะฝังกลบ ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและประหยัดเงินในการจัดการของเสีย

Ángel Serna Mercedes del Río José Gabriel Palomo and Mariano González (2012) ศึกษาเรื่อง Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres ซึ่งเป็นการศึกษาการปรับปรุงค่าความเครียด (Strain) และการยืดหยุ่นของปูนยิปซัม โดยการผสมผงจากการบดยางรถยนต์ที่ใช้แล้วลงไป เนื่องจากในยุโรปมียางรถยนต์ที่ใช้แล้วปีละประมาณ 3,300,000 ตัน มีค่าใช้จ่ายในการจัดการ 600 ล้านยูโร การศึกษาทำในห้องปฏิบัติการประเทศสเปน โดยการหล่อชิ้นงานตัวอย่างเป็นปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 160$ mm ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 55% และ 22°C เนื่องจากปูนยิปซัมจะให้คุณสมบัติที่ต่างกันเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เช่น ความชื้น สัดส่วนน้ำต่อเนื้อปูน อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งงานจริงจะควบคุมยากกว่าในโรงงานผลิต ทำให้เกิดรอยแตกขึ้นได้ จึงทำการออกแบบการทดลองแบบ 33 Full factorial จาก 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อเนื้อปูน (0.6, 0.7 และ 0.8) ขนาดของผงยางรถยนต์ที่บดแล้ว (0-1, 1-2 และ 2-4 mm) และสัดส่วนการเติมโดยปริมาตร (1%, 3% และ 3%) ตามลำดับ ทุกการทดลอง และการเตรียมสถานะการผลิตทำตามมาตรฐาน UNE-EN 13279-2 ซึ่งการทดลองนี้พบว่าผงยางรถยนต์ที่บดแล้วเข้ากันได้กับปูนยิปซัม การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงยางรถยนต์ที่บดแล้วจะทำให้ค่าการทดสอบทางกลต่าง ๆ ลดลง แต่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อเนื้อปูน (Water to plaster ratio; w/p) ที่ต่างกันจะส่งต่อการทดสอบทางกลมากกว่า และแม้ว่าค่าทดสอบแรงกดจะลดลง 16 % และค่าทนแรงอัดจะลดลง 18.3% แต่ก็ยังอยู่ในสเปคของมาตรฐาน UNE-EN 13279-1 การทดสอบลดการแตกของปูนยิปซัมไม่เห็นผลชัดเจนในการทดลองนี้ ส่วนการผสมเป็นเนื้อเดียวกันก็ทำได้ยากโดยเฉพาะที่ปริมาณผงยางรถยนต์ที่บดแล้วน้อย ๆ กับค่า w/p สูง ๆ และยังทำให้แท่งปริซึมชิ้นงานเป็นสีดำทั้งหมดด้วยการเพิ่มปริมาณผงยางรถยนต์ที่บดแล้วแปรผันตรงกับการลดลงของการคงตัวของน้ำในเนื้อยิปซัม และท้ายที่สุดคือไม่มีนัยยะสำคัญในการเติมผงยางรถยนต์ที่บดแล้วที่มีขนาดต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อยที่ 1-5 % เท่านั้น หรือการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของเม็ดยางเล็ก ๆ ที่แยกไม่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรง

Zhao Feng-qing Liu Hong-jie Hao Li-xia, Li Qian (2012) ศึกษาเรื่อง Water resistant block from desulfurization gypsum ซึ่งเป็นการศึกษาการนำยิปซัมสังเคราะห์ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือ Flue-gas Desulfurization Gypsum (FGD) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

(SO₂) กับน้ำหินปูน (CaCO₃) มาเตรียมเป็นบดลือกกันน้ำ โดยนำยิปซัมสังเคราะห์จากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน Xibaipo มาผสมกับ Granulate Blast-Furnace Slag (GBFS) กับเถ้าลอยแคลเซียมสูง (High Calcium Fly Ash ; HCFA) โพลีคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต ปูนเม็ด โซเดียมซิลิเกต และน้ำ หล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด 40×40×160 mm จากนั้นอบให้แห้ง 24 ชั่วโมงที่ 36-44 °C จนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปจุ่มในน้ำอุณหภูมิ 17-23 °C เวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และ Orthogonal test พบว่า แท่งปริซึมให้ค่าแรงกดอัดที่ดีสูงกว่า 12.5 MPa และได้สภาวะการผสมที่เหมาะสมระหว่าง Water reducing agent, Modifier, Temperature และ Curing Time ที่สัดส่วน 35 %, 0.56 %, 60 °C และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การอ่อนตัวมากกว่า 0.84 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 0.15 W/(mK) เมื่อใช้ SEM และ XRD ทดสอบกลไกต้านทานการดูดน้ำพบว่า การปรับปรุงคุณสมบัติของ FGD โดยใช้ GBFS, HCFA และสารเคมีเติมแต่งอื่นๆ สามารถลดการดูดซึมน้ำเข้าไปในโครงสร้างยิปซัมได้ เพราะมีการฟอร์มตัวเป็นรูปร่างแท่ง และลักษณะแบบวุ้นที่ต้านทานการดูดซึมน้ำได้

S. Gutiérrez-González J. Gadea, A. Rodríguez M.T. Blanco-Varela V. Calderón (2012) ศึกษาเรื่อง Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties ซึ่งเป็นการศึกษาการเข้ากันได้ของยิปซัม และผงโพลีเอไมด์เหลือทิ้งเพื่อนำไปผลิตเป็นบอร์ดมวลเบา และเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานความร้อน เนื่องจากการใช้โพลีเอไมด์ในงานก่อสร้างส่วนมากใช้ในรูปแบบเส้นใยเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แต่หากเป็นลักษณะผงโพลีเอไมด์มักจะไม่นิยมใช้และจะถูกกำจัดทิ้ง จึงมีแนวความคิดที่จะนำผงโพลีเอไมด์ดังกล่าวนี้มาเป็นสารเติมแต่งมวลเบาในวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ๆ การทดสอบความแข็งใช้เครื่อง Shore C ความสามารถในการทะลุผ่านของไอน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างของรูพรุนที่ทดสอบโดยการแทรกซึมผ่านของปรอท (Mercury Intrusion Porosimeter; MIP) การทดสอบการเข้ากันได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดเร็ว (Fast Scanning Electron Microscopy ; FSEM) เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากโพลีเอไมด์ในโครงสร้างระดับจุลภาคของบอร์ดมวลเบา วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ปูนยิปซัมชนิด B1 ตามมาตรฐานของ EN 13279-1 เครื่อง X-ray diffraction ยี่ห้อ Philips รุ่น PW 1830 ลักษณะของผงโพลีเอไมด์ทดสอบองค์ประกอบ โดยเครื่อง FSEM องค์ประกอบทางเคมีในผงโพลีเอไมด์ทดสอบด้วยเครื่อง LEO CHNS-932 ขนาดของผงโพลีเอไมด์ที่แขวนลอยในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ใช้เครื่อง HELOS 12K SYMPATEC ค่าความหนาแน่นของผงโพลีเอไมด์ใช้ไซโนมิเตอร์ และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ซึ่งได้ค่าประมาณ 1.07 g/cm³ ค่าการเซ็ทตัวใช้กรวยไวแคท (Vicat) แรงกดแตกใช้การหล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด 160×40×40 mm³ แรงกดอัดใช้แท่งปริซึมจากการกดแตกมากัดด้วยแรงในพื้นที่ 40×40 mm² จากการทดลองสรุปผลโดยคร่าว ๆ ได้ว่า

การเพิ่มปริมาณผงโพลีเอไมด์จะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง แรงทางกลและความแข็งแรงลดลง การทะลุผ่านของไอน้ำมากขึ้น และการต้านทานความร้อนมากขึ้นตามลำดับ

A.A. Khalil A. Tawfik A.A. Hegazy, M.F. El-Shahat (2014) ศึกษาเรื่อง Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites ซึ่งเป็นการศึกษาคคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของยิปซัมที่เปลี่ยนไปเมื่อเติมสารเติมแต่งบางชนิด เช่น จีเถ้า แกลบ เศษสะเก็ดจากเตาเผา (Slag) แคลเซียมคาร์บอเนต หรือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นต้น ทำการทดลองในประเทศอียิปต์ โดยบดผสมปูนยิปซัมกับสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วน 0.2-10.0% โดยน้ำหนัก ผสม 15 นาที จนเข้ากันดี ภายใต้อุณหภูมิ 20-25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70% การทดสอบชิ้นงานทำในวันที่ 7 และ 28 หลังการขึ้นรูป เครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยวิธี BET เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซเรย์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอกซเรย์ (XRF) เครื่องฉายรังสีอินฟราเรด (IR) และเครื่อง DTA โดยวัดค่าการคงตัวมาตรฐาน (Normal consistency; NC) เวลาในการก่อตัว (Setting time; ST) ขนาดรูพรุน (Apparent porosity ; AP) ความหนาแน่น (Bulk density ; BD) และค่าต้านแรงกดอัด (Compressive strength ; CS) ผลการทดลองพบว่าค่า NC สูงขึ้นเมื่อใช้จีเถ้าแกลบ แคลเซียมคาร์บอเนต และ PVA แต่จะต่ำลงเมื่อใช้ Slag ในขณะที่ค่า ST จะหน่วงมากขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งทั้งสี่ชนิด แต่ค่า BD จะต่ำลง ในขณะที่พบว่าค่า CS เพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารเติมแต่งในปริมาณน้อย ๆ แต่จะลดลงเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้น งานวิจัยนี้เป็นผลดีกับการก่อสร้างที่ต้องการวัสดุมวลเบา รูพรุนสูง ไม่ใช่คอนกรีต ผนังไม่สูง เช่น อาคารในพื้นที่ทะเลทรายหรือลักษณะอากาศที่ใกล้เสียอีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ราคาถูก และลดขยะสู่สิ่งแวดล้อมได้ด้วย

Marcos Lanzón P.A. García-Ruiz (2012) ศึกษาเรื่อง Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters ซึ่งเป็นการศึกษาการใช้กรดซิตริกในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วง (Retarder) ในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม โดยใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0, 125, 250, 500, 1000, 1500 และ 3000 ppm ผสมลงในส่วนผสมปกติของการผลิตแผ่นยิปซัม โดยคงสัดส่วนของน้ำต่อปูนยิปซัมเท่าเดิมตลอดการทดลอง การก่อตัว (Setting time) ใช้วิธีการ Knife-setting การฟอร์มตัวกลับเป็นยิปซัม (Calcium sulfate di-hydrate) ใช้การทดสอบด้วยค่า Conductivity และการสะท้อนกลับของรังสี Infrared ใช้ Scanning Electron Microscopy; SEM ตรวจสอบการฟอร์มตัวขณะที่กรดซิตริกทำหน้าที่เป็น Retarder พบว่ากรดซิตริกทำหน้าที่เป็นสารหน่วงที่ดีมากแม้ใช้ในปริมาณน้อย ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้เข้าใจว่ายิปซัมสังเคราะห์มีหลายประเภท ทั้ง Flu-gases desulfurization gypsum (FGD), Titano gypsum และที่สำคัญคือ Citro gypsum ซึ่งเป็น Waste จากการผลิตกรดซิตริกหากนำมา ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม ได้อาจจะเป็นการลด

ค่าใช้จ่ายค่า Retarder ได้มากอีกทั้งยังทำให้เข้าใจหลักการในการตรวจสอบการฟอร์มตัวของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และสามารถเลือกใช้เครื่องมือได้เหมาะสม

R.X. Magallanes-Rivera C.A. Juarez-Alvarado P. Valdez and J.M. Mendoza-Rangel (2012) ศึกษาเรื่อง Modified gypsum compounds: An ecological-economical choice to improve traditional plasters. ซึ่งเป็นการศึกษาการนำวัสดุปอซโซลาน ซึ่งได้แก่ เถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash; PFA) ตะกรันเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag ; GGBS) และ ผงฝุ่นซิลิกา (Microsilica ; MS หรือ Silica Fume ; SF) มาใช้ในกระบวนการผลิตปูนยิปซัม ให้มีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยศึกษาปฏิกิริยาจากการเติมสารปอซโซลานในยิปซัม โดยปฏิกิริยาหลักคือ ไฮเดรชัน ปฏิกิริยาเมื่อ Calcium Aluminate ทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟต จนได้ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต หรือเอททริงไทต์ (Ettringite) และปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) ทดลองโดยหล่อชิ้นงานแล้ว Cure ใต้น้ำที่ $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 180 วัน แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาทดสอบ พบว่า Density สูงกว่า ปูนยิปซัมดั้งเดิมเล็กน้อย ในขณะที่ค่า Flexural และ Compressive สูงขึ้นเกือบ 3 เท่า มีแนวทางในการเลือกใช้วัสดุอื่น ๆ เพิ่มเติมจากตัวอย่างวัสดุกลุ่มปอซโซลาน งานวิจัยนี้ทำให้เข้าใจวิธีการทดสอบทางวิศวกรรมโยธาในการ Cure ชิ้นงาน และทดสอบชิ้นงานเพิ่มเติม

Mridul Garg and Aakanksha Pundir (2012) ศึกษาเรื่อง Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash-alpha gypsum plaster-Portland cement ซึ่งเป็นการศึกษาคูณสมบัติการเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงหรือแรงยึดเกาะ (Binder) จากการใช้เถ้าลอยแบบ High strength, Hydrated lime sludge, ซีเมนต์ปอร์ซเลน และแอลฟา-ยิปซัม การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการก่อตัวของขนาดเล็กลง ใช้ Different Thermal Analysis, X-ray diffraction และ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าการพัฒนาค่า Strength ของ Binder เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Ettringite และ Tobermorite จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่าสามารถนำ Binder ไปใช้ในการผลิตปูนสำหรับงานก่อสร้าง อิฐ หรือคอนกรีตต่าง ๆ แทนที่ใช้ซีเมนต์บางส่วนได้ มีแนวทางในการนำวัสดุมูลค่าต่ำอย่าง Fly ash มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง และเข้าใจปฏิกิริยาใหม่จากการเกิด Ettringite และ Tobermorite ซึ่งพบมากในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง หรือการทดสอบวัสดุใหม่ๆ

M.S. Morsy S.H. Alsayed and Y.A. Salloum (2012) ศึกษาเรื่อง Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash-lime-anhydrous gypsum ซึ่งเป็นการศึกษา Cementless mortar โดยใช้วัสดุยึดเกาะ (Binder) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่ไม่ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังมีต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำ จนถึงเป็นวัสดุที่เป็น Waste ทดลองโดยการใช้เถ้าลอย (FA) ปูนขาว (Lime; L) และดินขาวชนิดแอกติเวตเต็ดที่มีซิลิกา และอลูมินาในปริมาณมาก (Activated Kaolin) และปูนยิปซัม การเตรียมเมตะคาโอลิน (MK) เตรียมได้โดยอบดินขาวชนิดแอกติเวตเต็ด (Activated Kaolin) 3 ชั่วโมงที่ 750°C สัดส่วน FA : MK : L (30 : 40 : 30) โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมยิปซัมแอนไฮเดรตในสัดส่วน

0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 % โดยน้ำหนักของไบน์เดอร์ (Binder) ส่วนของมอร์ตาร์เตรียมโดยสัดส่วนไบน์เดอร์ : ทราย ที่สัดส่วน 1.0 : 1.5 โดยน้ำหนัก และสัดส่วน น้ำ : ไบน์เดอร์ ที่ 0.50 แล้ววางชั้นงานมอร์ตาร์ในแบบที่ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเอาออกจากแบบ และวางที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน จึงวัดค่าแรงกดอัด (Compressive strength) และความหนาแน่นรวม (Apparent Density) จากผลการทดลองพบว่า การใช้ขี้ปิ้งปริมาณ 5-10% ก็สามารถทำให้ค่า Strength ได้ตามข้อกำหนดวัสดุก่อสร้างแล้ว โดยค่าแรงกดอัด (Compressive strength) เพิ่มขึ้น 56 % และค่าแรงกดแตกหรือแรงกดประลัย (Flexural Strength) เพิ่มขึ้น 45 % มากกว่าชั้นงานมอร์ตาร์ที่ปล่อยให้เกิดไฮเดรชันที่ 28 วัน ทำให้สรุปได้ว่า โครงสร้างระดับไมโครของไบน์เดอร์ ประกอบไปด้วยการ โยงใยกันของไฮเดรชันเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติคือฐานแกร่ง จากผลงานวิจัยพบว่าวัสดุที่ได้ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำลงด้วย มีแนวทางในการนำวัสดุมูลค่าต่ำอย่าง Fly ash มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง อีกทั้งยังเข้าใจหลักการในการตรวจสอบการฟอร์มตัวของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และเลือกใช้เครื่องมือได้เหมาะสม

Monower Sadique Hassan Al-Nageim William Atherton Linda Seton and Nicola Dempster (2013) ศึกษาเรื่อง Mechano-chemical activation of high-Ca fly ash by cement free blending and gypsum aided grinding ซึ่งเป็นการศึกษาการนำเถ้าลอยแคลเซียมสูงมาบดผสมแบบระบบไร้ซีเมนต์ การทำให้เกิดสารผสมที่ไม่มีการเสริมแรงของคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีกันทำได้โดยบดผสมเถ้าลอยที่มีด่างซัลเฟตกับฟลูมซิลิกา นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ปิ้ง FGD เป็นสารช่วยการบดผสม (Grinding aid) ได้เหมือนซัลเฟตในเถ้าลอยได้ด้วยเช่นกัน เป็นการหาสารประกอบใหม่ที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดย Blend สารประกอบต่าง ๆ ร่วมกับสารเติมแต่งของปูนขี้ปิ้ง ศึกษาอิทธิพลของ Calcium, Aluminium, Potassium และ Sulphate ในเถ้าลอยที่มาจาก Biomass การกระจายตัวของอนุภาคสารประกอบที่ Blend ใหม่ ด้วย Plasticizer ที่ให้ผลดีกว่าการใช้ Sodium Hydroxide (NaOH) จากการทดลองพบว่าสารใหม่ที่เกิดขึ้นจากการบดผสมกันสามารถทดแทนซีเมนต์ได้ การศึกษานี้ต้องการพัฒนาให้เกิดสารผสมที่มีลักษณะคล้ายซีเมนต์ ความก้าวหน้าของมอร์ตาร์ คือ ค่าแรงกดอัด (Compressive strength) ที่เพิ่มขึ้น 46 kPa จากการบ่มงานจากเดิมที่เคยมีรายงานที่ 28 วัน เป็น 90 วัน ในระบบการผสมที่ปราศจากซีเมนต์ของเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้น สรุปคืองานวิจัยทำให้มีแนวทางในการนำวัสดุมูลค่าต่ำอย่าง Fly ash มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง เป็นวัสดุที่ราคาถูก และลดขยะสู่สิ่งแวดล้อม มีแนวทางในการเลือกใช้วัสดุเหลือทิ้งจากหลากหลายอุตสาหกรรมมากขึ้น และเข้าใจการจำลองการทำงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการมากขึ้น

ปัญช ม่วงทอง, ชีรินทร์ คงพันธุ์ และบรรกิตต์ เนคมานุรักษ์ (2557) ศึกษาเรื่องอิทธิพลของวัสดุปอซโซลานประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์ (Influence of Pozzolan Materials, Agricultural Waste, on Mechanical Properties of Soil-Cement

Brick) ซึ่งเป็นงานวิจัยโดยการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ โดยศึกษาอิทธิพลของวัสดุปอชโซลาน จำพวกวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น เถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบ บางส่วนมาผสมและขึ้นรูปเป็นอิฐดินซีเมนต์ ทดสอบสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์ โดยผสมเศษวัสดุในอัตราส่วน 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก แล้วบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นทดสอบความต้านทานการรับกำลังแรงอัดและการดูดซึมน้ำ พบว่าเถ้าแกลบให้ผลดีกว่าเถ้าชานอ้อย ที่อัตราส่วน 20% โดยน้ำหนัก (C80RHA20) เมื่อเทียบกับอิฐดินซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าอิฐดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และเถ้าชานอ้อยทุกอัตราส่วนมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานกำลังอัดของอิฐประสาน และยังให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำไม่เกินมาตรฐานอ้างอิงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงกว่าเถ้าชานอ้อย อีกทั้งยังมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าด้วย จึงทำปฏิกิริยาปอชโซลานได้ดี



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

จากเนื้อหาในบทที่ 2 ซึ่งเป็นปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผู้วิจัยได้ศึกษามาได้นำมาสู่การดำเนินงานวิจัย “สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนพลาสติก” ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาเอาไว้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้และวิธีการทดลอง
- 3.2 การออกแบบการทดลอง
- 3.3 วิธีการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบวัสดุเชิงประกอบ
- 3.4 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

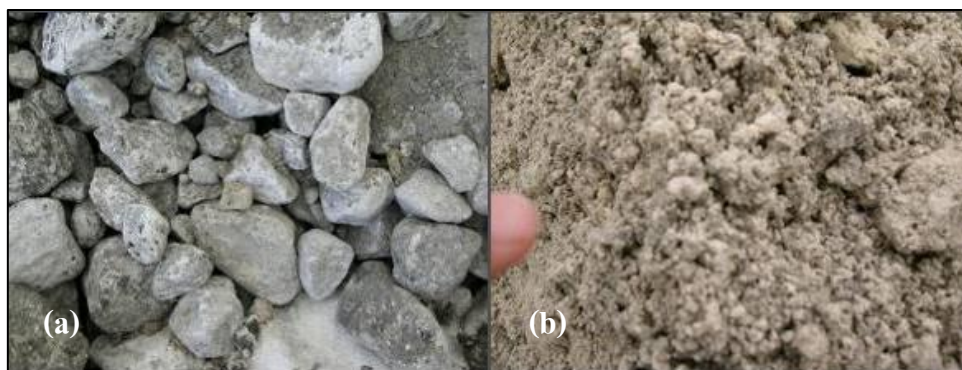
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้และวิธีการทดลอง

3.1.1 แร่ยิปซัม

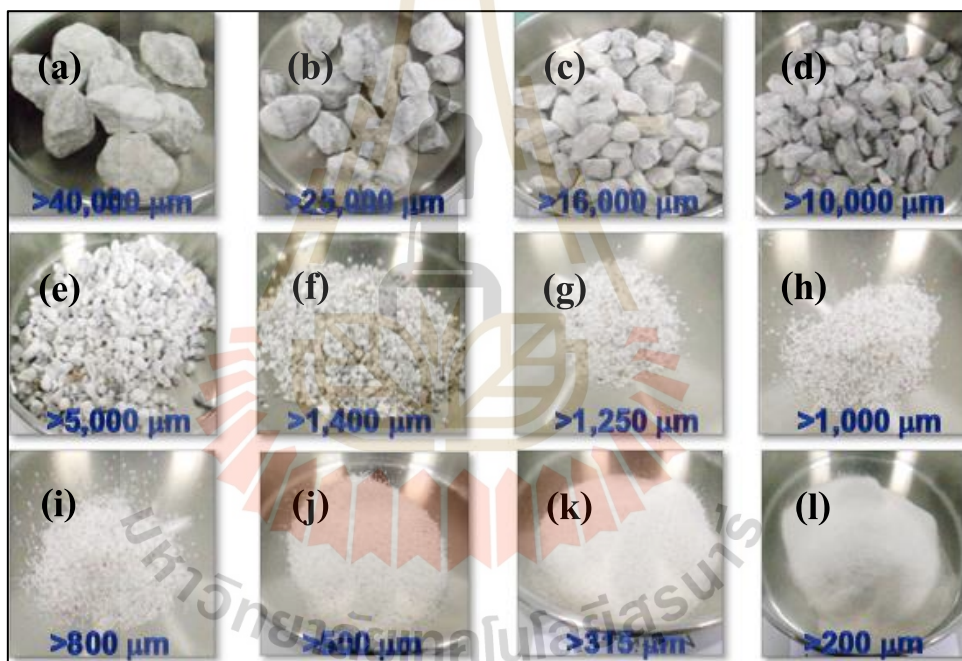
ใช้แร่ยิปซัมธรรมชาติดังรูปที่ 3.1 (a) และรูปที่ 3.1 (b) และรูปที่ 3.2 (a)-(l) จากเหมืองแร่แห่งหนึ่งในเขตอำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ โดยมาตรฐานการรับเข้าแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์ของยิปซัมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม
1	ความชื้น (Free moisture)	%	≤ 3
2	น้ำในผลึก (Crystal water)	%	≤ 20.93
3	ความบริสุทธิ์ (Purity)	%	≥ 95
4	ขนาดอนุภาค (Particle size)	mm	≤ 100
5	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	--	5.0 - 9.0
6	เกลือโซเดียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (Na_2O water soluble)	%	≤ 0.04
7	เกลือโพแทสเซียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (K_2O water soluble)	%	≤ 0.06
8	คลอไรด์อิสระ (Free Chloride, Cl)	%	≤ 0.01



รูปที่ 3.1 (a) และ (b) แสดงแรยิปซัมแบบก้อนและแบบป่นที่ปนกันมา



รูปที่ 3.2 (a)-(l) แสดงแรยิปซัมขนาดต่าง ๆ ที่ปนกันมาเมื่ออบแห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรง

1. การวัดค่าความชื้น (Free moisture)

ใช้เครื่อง Precisa XM 120-HR พิกัดสูงสุด 124 กรัม ค่าความละเอียด (d) เท่ากับ 0.0001 กรัม โดยเลือกโหมดการวิเคราะห์ความชื้นแรยิปซัมที่โปรแกรมไว้ในเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (a) และรูปที่ 3.3 (b) ซึ่งจะต้องบดแร่ที่รับเข้ามาให้มีขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร แล้วตักใส่ถาดรองรับในเครื่อง 8-2 กรัม เกลี่ยให้แร่กระจายทั่วทั้งจานสม่ำเสมอ แล้วกดเข้าโหมดการวัดค่าความชื้น



รูปที่ 3.3 (a) และ (b) เครื่อง Precisa XM 120-HR

2. การวัดค่าน้ำในผลึก (Crystal water or Combined water, CW)

ใช้เครื่อง Precisa XM 120-HR วิธีการดำเนินงานเช่นเดียวกับข้อที่ 1 โดยเลือกโหมดการวัดเป็น “Crystal water or Combine water”

3. การหาค่าความบริสุทธิ์ (Purity) คำนวณจากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละของความบริสุทธิ์ (\%)} = (\%CW) * \left\{ \frac{\text{MW of CaSO}_4 * 2\text{H}_2\text{O}}{\text{MW of H}_2\text{O}} \right\} \quad (3.1)$$

$$\text{ร้อยละของความบริสุทธิ์ (\%)} = (\%CW) * 4.7785 \quad (3.2)$$

4. การหาขนาดอนุภาค (Particle size) อบเรย์ปซัมที่สุ่มมาจากกองแร่ในตู้อบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 ด้วยอุณหภูมิ 40-45 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 15 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เตาเผา (Muffle furnace) Nabertherm รุ่น B-180



รูปที่ 3.5 ตะแกรง (Sieve) ที่ใช้ร่อนแร่ิปซัม

5. การหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ละลายแร่ิปซัม 9.9-10.1 กรัม ลงในน้ำกลั่น 90 กรัม กวนด้วย Magnetic stirrer 5 นาที แล้ววัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH Meter) ดังรูปที่ 3.6 ค่าความละเอียด ทศนิยม 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ยี่ห้อ Mettler Toledo

6. การหาค่าเกลือ โซเดียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (Na_2O water soluble)

7. การหาค่าเกลือ โพแทสเซียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (K_2O water soluble) โดยใช้เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 410 โดยชั่งแร่ยิปซัมที่อบแห้งแล้วที่ 40°C มา 1.0XX กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ ใส่เม็ดควนสารละลาย แล้ววางบน Hot plate ต้มและกวนจนสารละลายเหลือประมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นจึงกรองสารละลายขณะร้อนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 392 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน แล้วปรับปริมาตรขวดเป็น 250 มิลลิลิตร ปิดฝาขวด และวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายความเข้มข้น 4,000 mg/L หรือ 4,000 ppm (ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้วัด) จากนั้นจึงนำไปวัดหาค่า Na_2O , K_2O ที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่อง Flam Photometer ซึ่งหากความเข้มข้นเริ่มต้นมากเกินไป สามารถเจือจางสารละลายตัวอย่างได้อีก จากนั้นจึงเตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น Na และ K 0, 10 และ 1,000 ppm จากสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น Na และ K 1,000 ppm และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 ส่วน ต่อน้ำ 1 ส่วน โดย

- สารละลายมาตรฐาน Na และ K 0 ppm ได้จากปิเปต HCl 1:1 ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำปรับปริมาตรจนครบ 100 มิลลิลิตร
- สารละลายมาตรฐาน Na และ K 10 ppm ได้จากปิเปตสารละลายมาตรฐาน Na และ K 1,000 ppm ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปต HCl 1:1 ปริมาตร 12 มิลลิลิตรลงไป แล้วเติมน้ำปรับปริมาตรจนครบ 100 มิลลิลิตร

• สารละลายมาตรฐาน Na และ K 1,00 ppm ได้จากสารละลายมาตรฐาน Na และ K 1,000 ppm โดยตรง

วัดค่าโดยการสร้าง Calibration curve ก่อน แล้ววัดสารละลายตัวอย่างตามวิธีการใช้เครื่อง ผลที่ได้นำไปคำนวณค่าตามสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$\text{ร้อยละของ Na}_2\text{O (\%)} = \frac{(\text{ค่า Na ที่วัดได้เป็น ppm}) \times (100) \times (1.3480)}{(\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้วัดเป็น ppm})} \quad (3.3)$$

$$\text{ร้อยละของ K}_2\text{O (\%)} = \frac{(\text{ค่า K ที่วัดได้เป็น ppm}) \times (100) \times (1.2046)}{(\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้วัดเป็น ppm})} \quad (3.4)$$

โดยค่าคงที่ 1.3480 และ 1.2046 คือ อัตราส่วนมวลโมเลกุลของ Na_2O ต่อ Na และ K_2O ต่อ K ตามลำดับ ซึ่งจะรายงานผลเป็นร้อยละของ Na_2O และ K_2O ตามลำดับเช่นกัน ด้วยค่าความละเอียด 0.01 %

8. การหาค่าคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ด้วยเครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 926 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยเตรียมสารละลายโดยชั่งแร่ปัมที่อบแห้งแล้วที่ 40°C



รูปที่ 3.7 เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 410

- ชั่งแร่มา 30.0XX กรัม ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรณีความเข้มข้นคลอไรด์ < 100 mg/Kg
- ชั่งแร่มา 30.0XX กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กรณีความเข้มข้นคลอไรด์ 100-500 mg/Kg
- ชั่งแร่มา 10.0XX กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กรณีความเข้มข้นคลอไรด์ > 500 mg/Kg

ก่อนเติมน้ำกลั่นให้ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของแร่ที่ใช้ (E; g) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนได้ปริมาตรที่ต้องการ (V_1 ; ml) ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ ใส่เม็ดกวนสารละลาย แล้ววางบน Hot plate ต้มและกวนจนสารละลายที่ 80 °C เวลา 15 นาที รอสารละลายเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงปิเปตสารละลายตัวอย่าง (V_2 ; ml) ไปวัดที่เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 926 อ่านค่า (c; mg/l) และคำนวณค่าตามสมการที่ 3.5 ค่าความละเอียด 0.0001 %

$$\text{ปริมาณคลอไรด์ (ppm)} = \frac{(c) \times (500) \times (V_1) \times (1,000)}{(V_2) \times (E) \times (1,000) \times (1,000)} \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.8 เครื่อง Flame Photometer ของ Sherwood รุ่น 926

3.1.2 ปูนพลาสติกหรือสตั๊ก

ได้จากการนำแร่ยิปซัมธรรมชาติจากข้อที่ 3.1.1 มาผ่านกระบวนการเผาด้วย Impact Mill (Imp-Mill) จนได้ปูนพลาสติก โดยมีข้อกำหนดมาตรฐานของปูนพลาสติกมาตรฐานตาม มอก.188-2547 และของบริษัทผู้ผลิต ดังแสดงข้อกำหนดในตารางที่ 3.2 และมาตรฐานบริษัทตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดมาตรฐานปูนพลาสเตอร์ตาม มอก. 188-2547 ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม
1	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	%	≥ 2 ใน 3 ของ SO_3
2	ปริมาณเกลือแมกนีเซียม (Magnesium ; Mg) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ MgO)	%	≤ 0.3
3	ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	%	≥ 35
4	ปริมาณเกลือคลอไรด์ (Chloride ; Cl) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ NaCl)	%	≤ 0.2
5	การสูญเสียน้ำจากการเผา (Loss of ignition ; LOI)	%	4 - 9
6	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1.4 mm (ประมาณ 4 เมช ; 1.41 mm = 4 เมช)	%	100
7	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 mm (ประมาณ 100 เมช ; 149 mm = 100 เมช)	%	≥ 60
8	ค่าการก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time; IS)	min	5 - 35
9	ค่าการก่อดั้วระยะปลาย (Final setting time; FS)	min	10 - 50
10	ค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive strength)	N/mm ²	≥ 8.4
11	ค่าความต้านทานแรงคด (Flexural strength)	N/mm ²	≥ 2.5

ตารางที่ 3.3 ข้อกำหนดมาตรฐานปูนพลาสเตอร์ของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม
1	ความชื้น (Moisture)	%	≤ 1.0
2	น้ำในผลึก (Crystal water)	%	< 6.21
3	ค่า Water to Gypsum/Stucco Ratio (WGR or WSR)	--	0.6 – 0.8
4	Calcium Sulphate Hemihydrate (HH)	%	As much as possible
5	Soluble Anhydrite (AIII)	%	5.0 – 15.0
6	Low soluble Anhydrite (AIIIs)	%	≤ 2.0
7	ขนาดอนุภาค ≥ 32 mm	%	50.0
8	ขนาดอนุภาค ≥ 63 mm	%	25.0 – 31.0
9	ขนาดอนุภาค ≥ 200 mm	%	≤ 2.0

1. การหาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ข. การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านเคมี ข้อที่ ข.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)
2. การหาปริมาณเกลือแมกนีเซียม (Magnesium; Mg) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของแมกนีเซียมออกไซด์; MgO) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ข. การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านเคมี ข้อที่ ข.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
3. การหาปริมาณปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ข. การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านเคมี ข้อที่ ข.6 วิธีวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃)
4. การหาปริมาณเกลือคลอไรด์ (Chloride; Cl) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของโซเดียมคลอไรด์; NaCl) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ข. การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านเคมี ข้อที่ ข.7 วิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ (คิดเป็นโซเดียมคลอไรด์; NaCl)
5. ปริมาณการสูญเสียน้ำจากการเผา (Loss of ignition; LOI) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ข. การวิเคราะห์คุณลักษณะด้านเคมี ข้อที่ ข.9 วิธีวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition)
6. ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1.4 mm และ 150 mm ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ค. การทดสอบหาความละเอียด
7. ค่าการก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time; IS) และค่าการก่อดั้วระยะปลาย (Final setting time; FS) ปฏิบัติตามขั้นตอน และวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ง. การทดสอบหาระยะเวลาการก่อดั้ว
8. ค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) ปฏิบัติตามขั้นตอนและวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ฉ. การทดสอบความต้านทานแรงอัด
9. ค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural strength) ปฏิบัติตามขั้นตอน และวิธีการในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 188-2547 ในภาคผนวก ช. การทดสอบหาความต้านทานแรงดัด
10. ค่าความชื้น (Moisture) และค่าน้ำในผลึก (Crystal water) ทดสอบโดยการใช้เครื่อง Precisa XM 120-HR เหมือนวิธีใช้ตามที่ทำในข้อที่ 1 และ 2 ของการวิเคราะห์หาค่าความชื้น

อิสระและน้ำในผลึกของแร่ยิปซัม แต่ต้องเลือกโหมดการทำงานเป็น “ปูนพลาสเตอร์” ตามการตั้งค่าการวัดที่โปรแกรมไว้ในเครื่อง

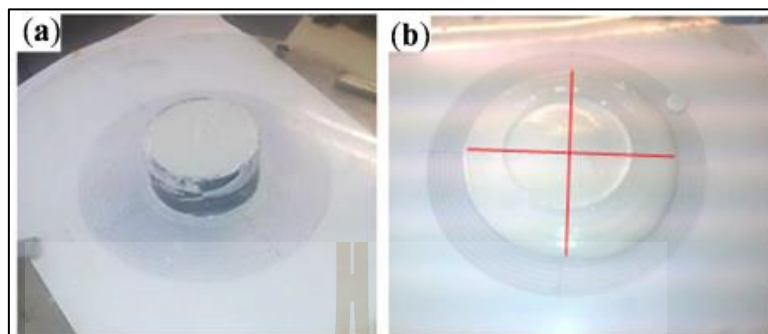
11. ค่า Water to Gypsum/Stucco Ratio (WGR or WSR) นำตัวอย่างปูนพลาสเตอร์ที่ผลิตในวันและเวลาเดียวกันกับปูนพลาสเตอร์ที่จะใช้ในการทดลอง (ปูนทั้งหมดต้องเก็บใส่ภาชนะที่ปิดสนิทไม่ให้น้ำหรืออากาศเข้าไปได้) โดยชั่งน้ำมา 100 กรัม แล้วโรยผงปูนพลาสเตอร์ลงไปให้ทั่วทั้งแก้ว (อัตราเร็วการโรยคือปูนพลาสเตอร์ถึงขีดครึ่งแก้วในเวลาประมาณ 30 วินาที และขีดน้ำเต็มแก้วใช้เวลาประมาณ 1 นาที) โดยห้ามเคาะแก้ว ครบ 1 นาที ก็โรยปูนพลาสเตอร์ต่อ รอจนกระทั่งปูนอึดตัวด้วยน้ำ และหยุดจุดน้ำเกิดเป็นบริเวณคล้าย ๆ เกาะเล็ก ๆ แห่ง ๆ ไม่ดูดซึมน้ำนานกว่า 5-10 วินาที จากนั้นจึงนำแก้วไปชั่งหาน้ำหนักปูน เพื่อคำนวณหาค่า WSR/WGR โดยค่าที่เหมาะสมคือ 0.6-0.8 แล้วแต่ผู้ผลิตจะกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูป 3.9 การหาค่า WSR/WGR

เมื่อได้ค่า WGR/WSR เบื้องต้นมาแล้วต้องหาค่า “ความชื้นเหลวมาตรฐาน (Normal consistency; NC)” ของปูนพลาสเตอร์ด้วย เพื่อเป็นแนวทางให้ฝ่ายผลิตนำไปใช้ตั้งสูตรการผลิต ให้ได้สัดส่วนปูนกับน้ำและความชื้นเหลวที่ปรับแต่งได้ เพราะค่าที่ไม่เหมาะสมจะก่อปัญหาในกระบวนการผลิตหลายอย่าง ซึ่งทำได้โดยการชั่งปูนพลาสเตอร์ตามค่า WGR/WSR ที่กำหนด (อยู่ระหว่าง 0.6-0.8) โรยปูนพลาสเตอร์ลงในน้ำภายใน 30 วินาที ปล่อยให้ปูนดูดซับน้ำ 30 วินาที และกวนส่วนผสม 60 วินาที แล้วจึงเทส่วนผสมลงในกระบอกลมวงที่ทำจากวัสดุกันการกัดกร่อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และสูง 50 มิลลิเมตร ปาดผิวหน้าให้เรียบ เวลาเริ่มเทส่วนผสมลงในกระบอกลมวงรวม 30 วินาที ก่อนที่จะยกกระบอกลมวงขึ้น แล้วให้เกิด

การแผ่ของส่วนผสม (Slurry) แล้ววัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยที่สุดและมากที่สุดมาหาค่าเฉลี่ย ค่าที่ได้ต้องอยู่ที่ประมาณ 78-80 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10



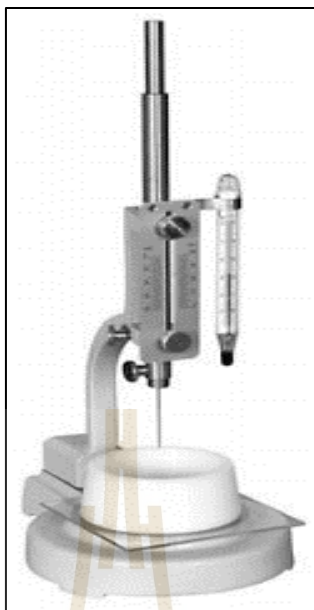
รูปที่ 3.10 ค่าความชื้นเหลวมาตรฐาน (Susana Serrano et al, 2015)

เมื่อหาค่า WSR/WGR แล้ว ก็ทดสอบค่าการคงตัวระยะต้น (Initial setting time; IS) และการคงตัวระยะปลาย (Final setting time ; FS) ด้วยวิธีที่อ้างอิงตาม มอก.188-2547 (ในการผลิตจริงจะมีวิธีการที่แต่ละบริษัทกำหนดขึ้นมาเองด้วย) คือ การใช้ “เครื่องไวแคท (Vicat)”

- การก่อดั้วระยะต้น (Initial Setting Time; IS) คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนพลาสติกอร์และน้ำจนกระทั่งยิปซัมเริ่มก่อตัว ซึ่งทำให้ทราบถึงระยะเวลามากสุดในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาด รูปร่าง หรือความหนาตามความต้องการ อีกทั้งยังแสดงถึงพันธะการเชื่อมต่อนของเนื้อยิปซัมที่สามารถยึดติดกันได้ ทดสอบได้จากการรับน้ำหนักของเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ปลายเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยเข็มไวแคตจมลงใน ยิปซัมเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 472-99 และ ASTM C1396

- การก่อดั้วระยะปลาย คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนพลาสติกอร์ และน้ำ จนกระทั่งปลายเข็มไวแคตไม่สามารถเกิดการจมหรือยุบตัวเมื่อทำการปล่อยเข็ม

- เครื่องมือไวแคท (Vicat) แสดงในรูปที่ 3.11 อันประกอบไปด้วย เข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ปลายเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร แบบหล่อทรงกรวยตัดสูง 40 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 60 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านล่าง 70 มิลลิเมตร พร้อมแผ่นรองแก้วผิวเรียบ อาจมีการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิส่วนผสมระหว่างการวัดค่าการก่อดั้ว หรือไม่มีก็ได้



รูปที่ 3.11 ไวแคต (Vicat)

12. การหาค่าเฟส (Phases analysis) ค่าเฟสที่จะทำการทดลองนั้นเป็นการนำตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ที่ผลิตในวันและเวลา เดียวกันกับปูนปลาสเตอร์ที่จะใช้ในการทดลอง (ปูนทั้งหมดต้องเก็บใส่ภาชนะที่ปิดสนิทไม่ให้น้ำหรืออากาศเข้าไปได้) โดยเฟสที่สนใจได้แก่ Soluble Anhydrite (AIII), Low soluble Anhydrite (AIIIs) และ Calcium Sulphate Hemihydrate (HH)

1) การวิเคราะห์หา Soluble Anhydrite (AIII)

นำครุชีเบิ้ลที่เผาและเย็นตัวแล้วมาชั่งน้ำหนัก “Empty” แล้วเทปูนปลาสเตอร์น้ำหนัก 7.000-7.0099 กรัม ลงไป นำไปชั่งน้ำหนัก “A” จากนั้นฉีดพรมเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ความเข้มข้น 95% ชนิดใช้ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory grade) ให้เปียกชุ่มทั่วถึงกัน พร้อมเกาะครุชีเบิ้ลเบา ๆ เพื่อไล่ฟองอากาศ โดยให้ระดับเอทิลแอลกอฮอล์ท่วมปูนปลาสเตอร์อย่างน้อย 1 มิลลิเมตร ปล่อยให้มีการดูดซึมประมาณ 5 นาที แล้วนำไปอบ 40 °C อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบที่ตู้อบ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นตัวในหม้อดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก “B” คำนวณค่า AIII ดังสมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7

กรณีที่ 1 น้ำหนัก B > น้ำหนัก A

น้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนจาก AIII ไปเป็น HH เนื่องจากตัวอย่างแห้งมากและไม่มี ความชื้น

$$a = \frac{B - A}{A - \text{Empty}} \quad (3.6)$$

$$\% \text{ Soluble Anhydride (AIII)} = (a \times 15.11 \times 100) \quad (3.7)$$

โดย 15.11 มาจากมวลโมเลกุลของ AIII (g/mol) หารด้วยมวลโมเลกุลของ $0.5\text{H}_2\text{O}$ (g/mol)

กรณีที่ 2 น้ำหนัก A > น้ำหนัก B

น้ำหนักลดลงเนื่องจากตัวอย่างขึ้น ไม่มี AIII คำนวณความชื้นได้ตามสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.9

$$a' = \frac{A - B}{A - \text{Empty}} \quad (3.8)$$

$$\% \text{ Humidity content} = (a' \times 100) \quad (3.9)$$

2) การวิเคราะห์หา Calcium Sulphate Hemihydrate (HH)

นำครุชิเบิ้ลที่เผาและเย็นตัวแล้วมาชั่งน้ำหนัก “g” แล้วเทปูนพลาสติกอร์น้ำหนัก 7.00XX กรัม ลงไป นำไปชั่งน้ำหนัก “C” แล้วฉีดน้ำกลั่นใส่ผนังครุชิเบิ้ลเบา ๆ ไม่ให้ปูนฯ กระเด็นออกมา โดยระดับน้ำต้องท่วมปูนพลาสติกอร์ 1 มิลลิเมตร โดยกระแทกครุชิเบิ้ลเบา ๆ เพื่อให้ฟองอากาศตลอดระยะเวลาที่ฉีดพรมน้ำ ทิ้งไว้ 60 นาที แล้วนำไปอบ 40°C จนน้ำหนักคงที่ และเย็นตัวในหม้อดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนัก “D” คำนวณค่า HH ดังสมการที่ 3.10 ถึงสมการที่ 3.12

$$b = \frac{D - C}{C - g} \quad (3.10)$$

กรณีที่ 1 น้ำหนัก B > น้ำหนัก A

$$\% \text{ Hemihydrate (HH)} = (b - 4a) \times 5.37 \times 100 \quad (3.11)$$

กรณีที่ 2 น้ำหนัก A > น้ำหนัก B

$$\% \text{ Hemihydrate (HH)} = (b + a') \times 5.37 \times 100 \quad (3.12)$$

โดย 5.37 มาจากมวลโมเลกุลของ HH (g/mol)หารด้วยมวลโมเลกุลของ $1.5\text{H}_2\text{O}$ (g/mol)

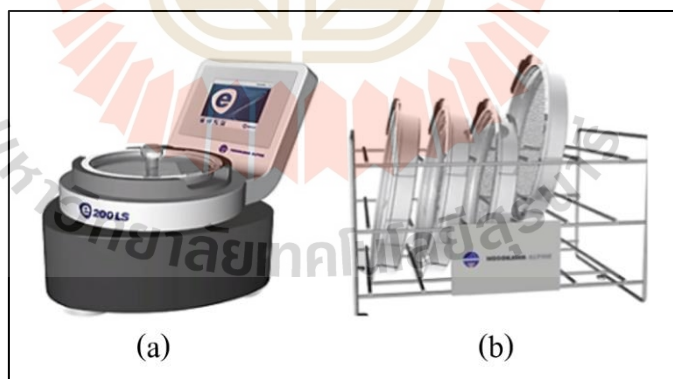
3) การวิเคราะห์หา Anhydrite ชนิด Low Soluble (AIIs)

ทำตามวิธีการในการหา HH แต่นำครุชิเบิ้ลมาจัดน้ำกลั่นจนเปียกและท่วมปูน 1 mm เคาะครุชิเบิ้ลไล่ฟองอากาศ แล้วนำไปวางในตู้หรือกล่องเปียก (Wet box) ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100 % เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ ถ้าให้น้ำหนักปูนพลาสติกในครุชิเบิ้ลตอนเริ่มต้นเป็นน้ำหนัก “E” และน้ำหนักสุดท้ายตอนออกจากเตาอบเป็น “F” แล้วคำนวณหาปริมาณ AIIs ดังสมการที่ 3.13

$$\% \text{ Low soluble anhydride (AIIs)} = (c + b) \times 3.78 \times 100 \quad (3.13)$$

โดย 3.78 มาจากมวลโมเลกุลของ AIIs (g/mol) หารด้วยมวลโมเลกุลของ $2\text{H}_2\text{O}$ (g/mol)

การหาอนุภาคปูนพลาสติกขนาดมากกว่า 32, 63 และ 200 ไมโครเมตร ใช้เครื่องร่อน Air jet แบบสูญญากาศ ยี่ห้อ Alpine Hosokawa Alpine รุ่น e200LS ดังรูปที่ 3.14 (a) ที่เป็นการคัดอนุภาคละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.14 (b) โดยใช้หลักการ Vacuum cleaner คัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงออกไป เหลือแต่ขนาดใหญ่ค้างบนผิวหน้าตะแกรง ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ตะแกรงขนาด 32, 63 และ 200 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.12 (a) เครื่อง Alpine ยี่ห้อ Hosokawa Alpine รุ่น e200LS

(b) ตะแกรงมาตรฐานขนาดต่าง ๆ

3.1.3 เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde Waste, MFW)

เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์จะใช้เศษชนิดที่เป็นเศษจากการบดย่อยคริบตรงขอบผลิตภัณฑ์เมลามีน (Melamine scrap) ดังรูปที่ 3.15 จากนั้นมีการนำมาบดซ้ำด้วยเครื่องบด Retsch

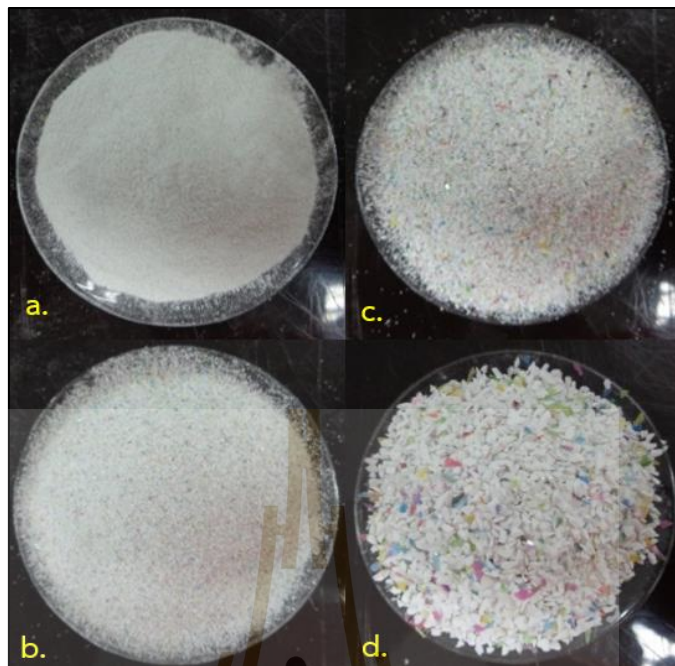
รุ่น ZM200 ดังแสดงในรูปที่ 3.16 วิเคราะห์หาค่าความชื้น ก่อนนำไปผ่านเครื่องร่อนและตะแกรง จนได้เศษเมลามีนขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 0-200, 200-500, 500-1,000 และ 1,000-5,000 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 (a), (b), (c) และ (d) ตามลำดับ ทั้งนี้เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ทั้งหมดได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 3.13 เศษครีบบเมลามีนที่ได้จากการตกแต่งขอบผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงาน



รูปที่ 3.14 เครื่องบดเศษครีบบเมลามีน Retsch รุ่น ZM200



รูปที่ 3.15 เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ผ่านการบดและร่อนแยก (a) ขนาดน้อยกว่า 200 ไมโครเมตร (b) 200-500 ไมโครเมตร (c) 500-1,000 ไมโครเมตร และ (d) 1,000-5,000 ไมโครเมตร

จากนั้นนำชิ้นงานที่บดแล้วไปทดสอบหาความชื้นอิสระด้วยวิธีการในข้อที่ 1 เรื่อง การวัดค่าความชื้น (Free moisture) แร่ยิปซัม โดยใช้เครื่อง Precisa XM 120-HR และหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM C128 - Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่นำมาทดสอบ ในงานวิจัยนี้คำนวณความถ่วงจำเพาะรวมที่เรียกว่า “Bulk Specific Gravity” ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุ (Saturated surface dry) ดังสมการที่ 3.14

$$\text{Specific gravity } (S_g) = \frac{B}{B-C} \quad (3.14)$$

โดย S_g คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุนั้น ๆ
 B คือ น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ชั่งในอากาศ (g)
 C คือ น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวชั่งในน้ำ (g)

3.1.4 น้ำ (Water)

ใช้น้ำประปาที่สะอาดและมีข้อกำหนดตามตารางที่ 3.4 (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550)

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดคุณภาพน้ำประปาที่ใช้ในโรงงานผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม
1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	--	6.5 - 8.5
2	สี (Color)	Pt-Co	≤ 15
3	ความขุ่น (Turbidity)	NTU	≤ 5
4	ซัลเฟต (Sulphate ; SO ₄ ²⁻)	mg/l	≤ 250
5	ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solid ; TDS)	mg/l	≤ 600
6	ความกระด้าง (Hardness)	mg/l	≤ 300
7	เหล็ก (Ferrous, Fe)	mg/l	≤ 0.3
8	แมงกานีส (Manganese ; Mn)	mg/l	≤ 0.4
9	ทองแดง (Copper ; Cu)	mg/l	≤ 2.0
10	สังกะสี (Zinc ; Zn)	mg/l	≤ 3.0
11	ตะกั่ว (Lead ; Pb)	mg/l	≤ 0.01
12	โครเมียม (Chromium ; Cr)	mg/l	≤ 0.05
13	แคดเมียม (Cadmium ; Cd)	mg/l	≤ 0.003
14	ปรอท (Mercury ; Hg)	mg/l	≤ 0.001
15	สารหนู (Arsenic ; As)	mg/l	≤ 0.01
16	คลอไรด์ (Chloride ; Cl)	mg/l	≤ 250
17	ไนเตรท (Nitrate ; NO ₃)	mg/l	≤ 50
18	ฟลูออไรด์ (Fluoride ; F)	mg/l	≤ 1.0
19	เซเลเนียม (Selenium ; Se)	mg/l	≤ 0.01
20	ไซยาไนด์ (Cyanide ; CN ⁻)	mg/l	≤ 0.07
21	แบเรียม (Barium ; Ba)	mg/l	≤ 0.07
22	โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (Total Coliform bacteria; TCB)	MPN/100 mg	ต้องตรวจ ไม่พบ
23	ฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Faecal Coliform Bacteria ; FCB)	MPN/100 mg	ต้องตรวจ ไม่พบ

3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบวัสดุเชิงประกอบ

3.2.1 การทดสอบค่าการก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time; IS)

การทดสอบค่าการก่อดั้วระยะต้น คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ และน้ำ จนกระทั่งยิปซัมเริ่มก่อดั้ว โดยการก่อดั้วระยะต้นสามารถทำให้ทราบถึงระยะเวลามากสุดในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาด รูปร่าง หรือความหนาตามความต้องการ อีกทั้งยังแสดงถึงพันธะการเชื่อมต่อนของเนื้อยิปซัมที่สามารถยึดติดกันได้ โดยการทดสอบสามารถทำได้จากการรับน้ำหนักของเข็ม ใว้แคะมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ได้ โดยเข็มจมลงในยิปซัมเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 472-99 และ ASTM C1396

3.2.2 การทดสอบค่าการก่อดั้วระยะปลาย (Final Setting Time; FS)

การทดสอบค่าการก่อดั้วระยะปลาย คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำ จนกระทั่งเข็ม ใว้แคะไม่สามารถเกิดการจมหรือยุบตัวเมื่อทำการปล่อยเข็มตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 472-99 และ ASTM C1396

จากตารางที่ 3.5 จะผสมปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ กัน ในสัดส่วน 5, 10 และ 20% โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ ค่า WSR/WGR 0.75 โดยหล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร (UNE-EN 13279-2 : 2006, 2549) เริ่มจากเทส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในเครื่องผสมมอร์ต้าจนผสมกันเป็นอย่างดี จากนั้นเทน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดจนได้เนื้อตัวอย่างเข้ากันแล้วเทลงแบบหล่อตามขนาดที่ใช้ในการทดสอบกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กกลมเพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างที่เต็มแบบ ปล่อยให้วางเกิดการก่อดั้วระยะปลายสมบูรณ์ แล้วแกะออกจากแบบหล่อจากนั้นวางชิ้นงานไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่หรือเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.18 ก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (ไมโครเมตร)	สัญลักษณ์	ปูนปลาสเตอร์หรือสตั๊กโก้ (ร้อยละ)	เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (ร้อยละ)
PSM10/50	1,000 - 5,000	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM05/10	500 - 1,000	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM02/05	200 - 500	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM00/02	< 200	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
Ref.	ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้อ้างอิง		100	0



รูปที่ 3.16 แท่งปริซึมขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร

3.2.3 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

นำตัวอย่างไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องหรือ 25 ± 2 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยระดับน้ำท่วมผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่าง จากนั้นนำขึ้นมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินที่ผิวชิ้นงานภายใน 30 วินาที แล้วชั่งน้ำหนักเป็น “น้ำหนักเปียก” ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกจากเตาอบ เก็บในหม้อสุญญากาศ และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนักเป็น “น้ำหนักแห้ง” คำนวณร้อยละของค่าการดูดซึมน้ำคำนวณจากสมการที่ 3.15 วิธีการเป็นไปตาม ASTM C1403

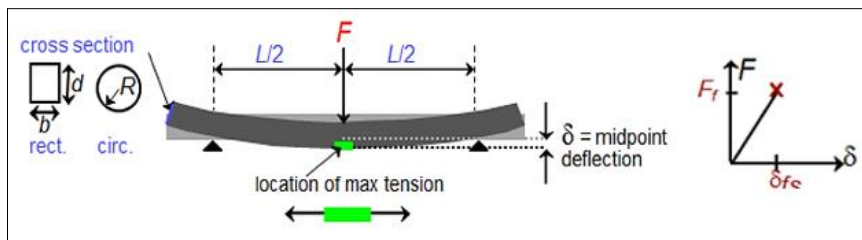
$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}) \times 100}{(\text{น้ำหนักแห้ง})} \quad (3.15)$$

3.2.4 ค่าการต้านแรงดัด (Flexural strength)

นำตัวอย่างชิ้นงานที่หล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด ขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร ไปทดสอบหาค่าการต้านแรงดัด ด้วยเครื่องทดสอบแบบยูนิเวอร์แซล ยี่ห้อ Zwick/Roell กำลังกดสูงสุด 10,000 นิวตัน ดังรูปที่ 3.19 (a) เครื่องทดสอบขณะกดชิ้นงาน และ (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบค่าการต้านแรงดัดและขาดออกจากกันแล้ว การแสดงค่าการต้านแรงดัด จะแสดงออกในหน่วยนิวตัน (N) ซึ่งสามารถแปลงค่าเป็นเมกะปาสคาล (MPa) ได้จากรายละเอียดในรูปที่ 3.20 และสมการที่ 3.16 และสมการที่ 3.17 ขึ้นกับภาคตัดชิ้นงานว่าเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมหรือทรงกลมตามลำดับ



รูปที่ 3.17 (a) เครื่องทดสอบค่าการต้านแรงดัดขณะกดชิ้นงาน
(b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบค่าการต้านแรงดัดแล้ว



รูปที่ 3.18 รูปแบบแรงกดของการทดสอบการต้านแรงดัด

$$\text{Flexural strength } (S_{fs}) \text{ (MPa)} = \frac{3F_f L}{2db^2} \quad \text{Rectangular cross section sample} \quad (3.16)$$

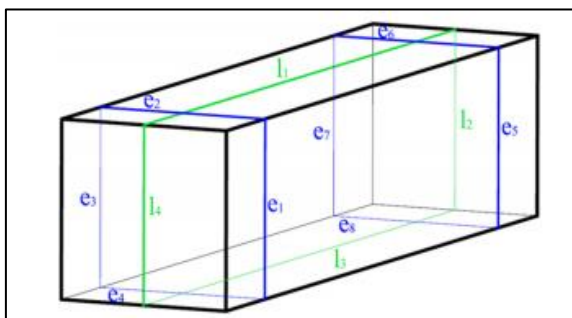
$$\text{Flexural strength } (S_{fs}) \text{ (MPa)} = \frac{F_f L}{\pi R^2} \quad \text{Circular cross section sample} \quad (3.16)$$

3.2.5 ค่าการต้านแรงอัด (Compressive strength)

นำตัวอย่างชิ้นงานหล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด ขนาด 40×40×160 มิลลิเมตร ตัดเป็นชิ้นงานขนาด หล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด ขนาด 40×40×40 มิลลิเมตร ทดสอบหาค่าการต้านแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบการต้านแรงอัด รุ่น ELE ค่า Max. 200 MT

3.2.6 การวัดค่าความหนาแน่น (Density)

ชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งแล้วในตู้อบที่ 40°C จนน้ำหนักคงที่ หรือไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ทุกชิ้นอย่างละเอียดด้วยตาชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นวัดขนาดชิ้นงานด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว โดยวัดตามจุดและทิศทางต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 3.21 (Susana Serrano et al, 2015)



รูปที่ 3.19 ทิศทางต่าง ๆ ของการวัดขนาดชิ้นงาน

3.2.7 การวัดค่าการขยายตัว (Expansion)

จากขนาดชิ้นงานที่วัดได้ในข้อที่ 3.3.4 สามารถนำมาคำนวณร้อยละการขยายตัวของชิ้นงานได้ ขนาดเริ่มต้น คือ $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร คำนวณร้อยละการขยายตัวจากสมการที่ 3.18

$$\text{ร้อยละการขยายตัว (\%)} = \frac{(\text{ขนาดที่วัดได้} - \text{ขนาดของแบบที่ใช้หล่อชิ้นงาน}) \times 100}{(\text{ขนาดของแบบที่ใช้หล่อชิ้นงาน})} \quad (3.18)$$

3.2.8 ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Surface hardness)

นำตัวอย่างชิ้นงานที่หล่อเป็นแท่งปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 40$ มิลลิเมตร ไปทดสอบหาค่าความแข็งของพื้นผิวด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล ยี่ห้อ Zwick / Roell ในข้อที่ 3.3.3 แต่เปลี่ยนหัวกดเป็นแบบตะปูเข็ม (ASTM C472-99, 2009) โดยกด 5 จุดต่อด้านของปริซึม (6 ด้าน)

3.2.9 การวิเคราะห์โครงสร้างของยิปซัมกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)

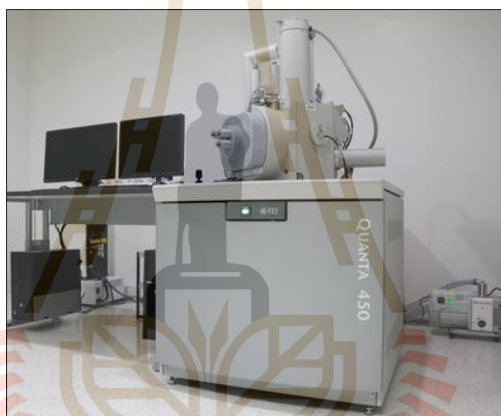
นำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปเป็นปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร มาตัดขวาง (Cross section) เป็นชิ้นงานขนาดประมาณ $20 \times 20 \times 20$ มิลลิเมตร นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น CX23 ดังรูปที่ 3.22 กำลังขยายต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ว่ามีการวางตัวหรือฝังตัวของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในเนื้อปูนพลาสเตอร์ในลักษณะเช่นใด



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น CX23

3.2.10 การวิเคราะห์โครงสร้างของยิปซัมกับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

นำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปเป็นปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 60$ มิลลิเมตร มาตรฐาน (Cross section) เป็นชิ้นงานขนาดประมาณ $20 \times 20 \times 20$ มิลลิเมตร นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น QUANTA 450, FEI-EDS (XMax 50 SDD, Oxford) กำลังขยายต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.23 เพื่อตรวจสอบลักษณะของวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ว่ามีการวางตัวหรือฝังตัวของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในเนื้อของปูนปลาสเตอร์ในลักษณะใดบ้าง หรือมีผลกึ่งยิปซัมที่เปลี่ยนแปลงไปจากผลึกแบบทั่วไปอย่างไรบ้าง (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2562)



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) รุ่น QUANTA 450, FEI-EDS (XMax50 SDD, Oxford)

3.2.11 การวิเคราะห์หาสารองค์ประกอบที่เกิดขึ้นของยิปซัมกับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)

นำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปเป็นปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร มาตรฐาน และเตรียมการวัดชิ้นงานตามมาตรฐาน และวิธีการของการมาใช้เครื่อง เพื่อตรวจสอบหาสารองค์ประกอบใหม่ที่อาจเกิดขึ้นจากการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ลงในปูนปลาสเตอร์ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction) และใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab แสดงดังรูปที่ 3.24 (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2562)

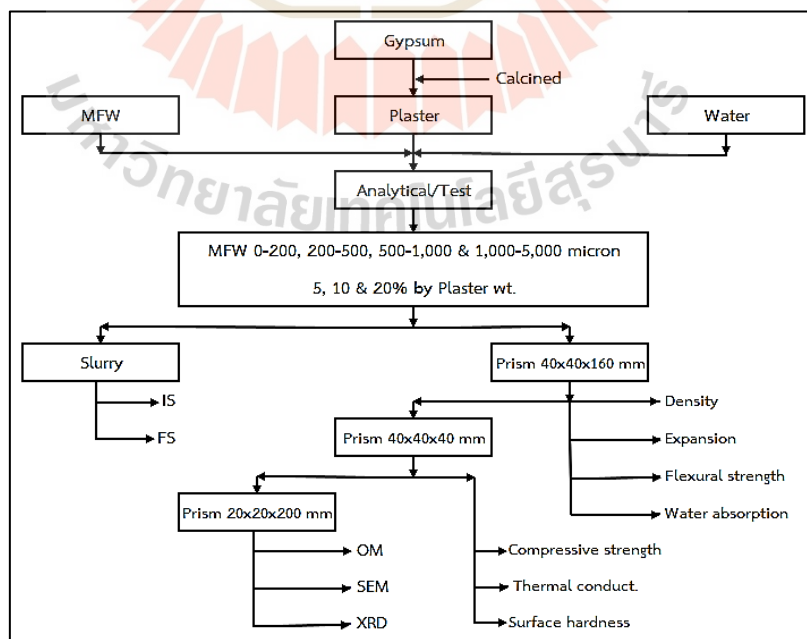


รูปที่ 3.22 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer)
ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab

3.2.12 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conduction)

นำชิ้นงานที่หล่อขึ้นรูปเป็นปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร มาเตรียมการทดสอบตามวิธีการใน ASTM E1225

3.3 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.23 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

บทนี้จะนำเสนอผลที่ได้จากวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งได้อธิบาย “สมบัติของยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนกับปูนปลาสเตอร์” โดยศึกษาและทดลองตั้งแต่วัตถุดิบที่นำมาใช้ จนถึงขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลวิเคราะห์แร่ยิปซัม
- 4.2 ผลวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์
 - 4.2.1 ผลวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ตามวิธีการใน มอก.188-2547
 - 4.2.2 ผลวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ตามวิธีการเฉพาะของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี
- 4.3 ผลวิเคราะห์เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์
- 4.4 ผลวิเคราะห์น้ำประปา
- 4.5 ผลทดสอบค่าการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.6 ผลทดสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.7 ผลทดสอบการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.8 ผลทดสอบค่าการต้านแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.9 ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.10 ผลทดสอบค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.11 ผลทดสอบค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ
- 4.12 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล
- 4.13 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 4.14 การตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 4.15 ผลทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

4.1 ผลวิเคราะห์แร่ยิปซัม

แร่ยิปซัมที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นแร่ยิปซัมธรรมชาติจากเหมืองแร่แห่งหนึ่งเขต อำเภอนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ รับเข้าวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 โดยมีค่าการวิเคราะห์ แร่รับเข้าตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า แร่ยิปซัมได้มาตรฐานตามที่กำหนด โดยมีค่าความเป็นกรดอ่อน ๆ และมีเกลือโซเดียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ และเกลือโพแทสเซียม-ออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ในปริมาณค่าที่ 0.01 และ 0.01 % ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 วัตถุประสงค์แร่ยิปซัมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้	มาตรฐาน
1	ความชื้น (Free moisture)	%	≤ 3	0.53	*Individual
2	น้ำในผลึก (Crystal water)	%	≤ 20.93	20.22	*Individual
3	ความบริสุทธิ์ (Purity)	%	≥ 95	96.62	*Individual
4	ขนาดอนุภาค (Particle size)	mm	≤ 100	< 100	*Individual
5	ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)	--	5.0 -9.0	6.5	*Individual
6	เกลือโซเดียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (Na ₂ O water soluble)	%	≤ 0.04	0.01	*Individual
7	เกลือโพแทสเซียมออกไซด์ที่ละลายน้ำได้ (K ₂ O water soluble)	%	≤ 0.06	0.01	*Individual
8	คลอไรด์อิสระ (Free Chloride; Cl)	%	≤ 0.01	0.00	*Individual

* Individual คือ มาตรฐานของโรงงานผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในเขต อ.หนองแค จ.สระบุรี

4.2 ผลการวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์

ผลการวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นสตั๊กโก้ที่ทำการผลิตในวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ด้วยเครื่องบด Impact Mill ของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งใน จังหวัดสระบุรี ซึ่งข้อมูลการวิเคราะห์จะแสดง 2 แบบ ได้แก่

4.2.1 ผลวิเคราะห์ปูนพลาสเตอร์ตามวิธีการใน มอก.188-2547

แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าปูนพลาสเตอร์ได้ตามมาตรฐานตามที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดลอง

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้	มาตรฐาน
1	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	%	≥ 2 ใน 3 ของ SO ₃	32.6	มอก.188 - 2547
2	ปริมาณเกลือแมกนีเซียม (Magnesium; Mg) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ MgO)	%	≤ 0.3	0.02	มอก.188 - 2547
3	ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	%	≥ 35	45.7	มอก.188 - 2547
4	ปริมาณเกลือคลอไรด์ (Chloride; Cl) ที่ละลายได้ (คิดในรูปมวลของ NaCl)	%	≤ 0.2	0.1	มอก.188 - 2547
5	การสูญเสียน้ำจากการเผา (Loss of ignition; LOI)	%	4 - 9	4.8	มอก.188 - 2547
6	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 1.4 mm (ประมาณ 4 เมช; 1.41 mm = 4 เมช)	%	100	100	มอก.188 - 2547
7	ความละเอียดเมื่อร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 150 mm (ประมาณ 100 เมช; 149 mm = 100 เมช)	%	≥ 60	78.8	มอก.188 - 2547
8	ค่าการก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time; IS)	min	5 - 35	9.40	มอก.188 - 2547
9	ค่าการก่อดั้วระยะปลาย (Final setting time; FS)	min	10 - 50	13.57	มอก.188 - 2547
10	ค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive strength)	N/mm ²	≥ 8.4	8.46	มอก.188 - 2547
11	ค่าความต้านทานแรงดัด (Flexural strength)	N/mm ²	≥ 2.5	3.23	มอก.188 - 2547

4.2.2 ผลวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ตามวิธีการเฉพาะของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า ค่าที่ควบคุมทุกค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการควบคุมการผลิตของบริษัททั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีค่า Hemihydrate สูงถึง 78.63% และมีค่า Water to Stucco/Gypsum Ratio (WSR/WGR) ที่ค่ากลางของการควบคุม อีกทั้งมีเฟส (Phase) ที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าเป็นการผลิตปูนปลาสเตอร์ที่ได้มาตรฐานสูง

ตารางที่ 4.3 ค่าการวิเคราะห์ปูนปลาสเตอร์เพิ่มเติมของบริษัทผู้ผลิตแผ่นยิปซัมแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้
1	ความชื้น (Moisture)	%	≤ 1.0	0.09
2	น้ำในผลึก (Crystal water)	%	< 6.21	5.60
3	WSR/WGR	--	0.6 – 0.8	0.75
4	Hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$; HH)	%	As much as possible	78.63
5	Soluble Anhydrite (CaSO_4 ; AIII)	%	5.0 – 15.0	12.63
6	Low soluble Anhydride (CaSO_4 ; AIIIs)	%	≤ 2.0	0.97

4.3 ผลวิเคราะห์เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์

เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ผ่านกระบวนการบดละเอียด เมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น และความหนาแน่นของขนาดต่าง ๆ ที่ร่อนแยกออกมา แสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้ของอนุภาคขนาดต่างๆ (mm)			
				< 200	200 – 500	500 – 1,000	1,000 – 5,000
1	ความชื้นอิสระ (Free moisture)	%	None	0.54	0.44	0.40	0.31
2	Specific gravity (S_g)	--	None	1.5	1.5	1.5	1.5

4.4 ผลการวิเคราะห์น้ำประปา

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นน้ำสะอาดที่มีค่าการตรวจสอบผ่านตามเกณฑ์ของการประปาส่วนภูมิภาคที่ประกาศใช้ปี พ.ศ. 2550 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลการทดสอบจากบริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขากรุงเทพมหานคร พบว่าค่าการตรวจสอบน้ำประปามีค่าตามเกณฑ์มาตรฐาน แต่ค่าโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (Total coliform bacteria) มีค่าน้อยกว่า 1.1 MPN/100 mg ซึ่งเกินค่าที่กำหนด (MPN คือ Most Probable Number of coliform organisms) แต่ค่าที่ตรวจพบนี้ไม่มีผลต่อการผลิตแผ่นยิปซัม เพราะไม่ใช่อุตสาหกรรมอาหาร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าน้ำประปา

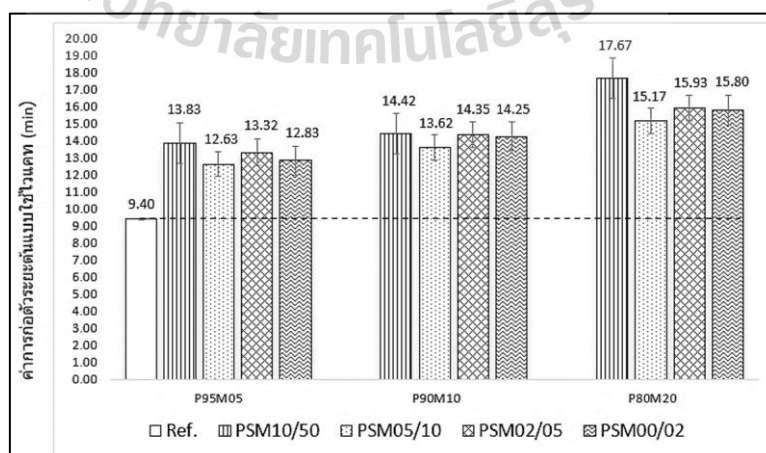
ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้
1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	--	6.5 - 8.5	7.5
2	สี (Color)	Pt-Co	≤ 15	Not detected
3	ความขุ่น (Turbidity)	NTU	≤ 5	0.23
4	ซัลเฟต (Sulphate ; SO ₄ ²⁻)	mg/l	≤ 250	24.99
5	ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	mg/l	≤ 600	142.50
6	ความกระด้าง (Hardness)	mg/l	≤ 300	106.97
7	เหล็ก (Ferrous, Fe)	mg/l	≤ 0.3	Not detected
8	แมงกานีส (Manganese ; Mn)	mg/l	≤ 0.4	Not detected
9	ทองแดง (Copper ; Cu)	mg/l	≤ 2.0	Not detected
10	สังกะสี (Zinc ; Zn)	mg/l	≤ 3.0	0.0043
11	ตะกั่ว (Lead ; Pb)	mg/l	≤ 0.01	Not detected
12	โครเมียม (Chromium ; Cr)	mg/l	≤ 0.05	Not detected
13	แคดเมียม (Cadmium ; Cd)	mg/l	≤ 0.003	Not detected
14	ปรอท (Mercury ; Hg)	mg/l	≤ 0.001	0.0006
15	สารหนู (Arsenic ; As)	mg/l	≤ 0.01	<0.0015
16	คลอไรด์ (Chloride ; Cl)	mg/l	≤ 250	16.48
17	ไนเตรท (Nitrate ; NO ₃)	mg/l	≤ 50	< 0.50
18	ฟลูออไรด์ (Fluoride ; F)	mg/l	≤ 1.0	0.22
19	เซเลเนียม (Selenium ; Se)	mg/l	≤ 0.01	0.0015
20	ไซยาไนด์ (Cyanide ; CN)	mg/l	≤ 0.07	Not detected

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าน้ำประปา (ต่อ)

ลำดับ	สิ่งที่ตรวจสอบ	หน่วย	ค่าควบคุม	ค่าที่ได้
21	แบเรียม (Barium ; Ba)	mg/l	≤ 0.07	0.0479
22	โคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB)	MPN/100 mg	ต้องตรวจไม่พบ	< 1.1
23	ฟีคัล โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (FCB)	MPN/100 mg	ต้องตรวจไม่พบ	Not detected

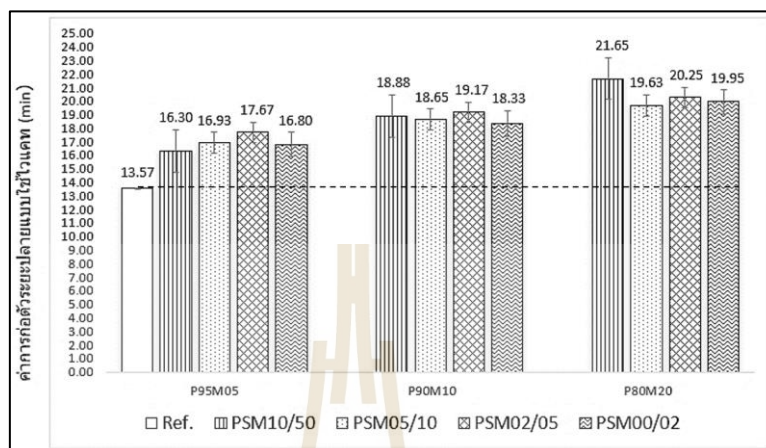
4.5 ผลทดสอบค่าการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ

การก่อดั้วระยะต้นของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบโดยใช้ไวกาต ดังรูปที่ 4.1 โดยแสดงให้เห็นว่าเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เองที่สูงถึงร้อยละ 5.6 (เมทินี มาให้, 2555) ส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำลดลงเสมือนมีการแบ่งน้ำส่วนหนึ่งไปไว้ในอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Yi Ding et al., 2015) เป็นผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า เมื่อปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ เฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์ (2558) ที่พบว่าเมื่อปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.1 การก่อดั้วระยะต้น (Initial setting time) ของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบโดยใช้ไวกาต

ด้วยเหตุผลเดียวกับข้างต้นการก่อตัวระยะปลายดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง



รูปที่ 4.2 การก่อตัวระยะปลาย (Final setting time) ของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบโดยใช้ไวน้ำ

จากผลการทดลองพบว่า การเติมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ทุกขนาด และทุกสัดส่วนการผสมจะทำให้ค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ 1,000-5,000 ไมโครเมตร จะมีผลกระทบกับค่าการก่อตัวมากกว่าสัดส่วนการผสม ในขณะที่สัดส่วนการผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่มากขึ้นก็จะทำให้ค่าการก่อตัวมากขึ้นด้วย เช่น ค่าการก่อตัวระยะต้นที่ขนาดอนุภาคเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เท่ากับที่ 1,000-5,000 ไมโครเมตร แต่สัดส่วนปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 95% ต่อ 5% เปรียบเทียบกับ 80% ต่อ 20% จะพบว่าค่าการก่อตัวระยะต้นเปลี่ยนไป 47.13% และ 87.98% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ตามลำดับ เป็นต้น อีกตัวอย่างหนึ่งคือสัดส่วนเดียวกันแต่เปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ เช่น สัดส่วนปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 90% ต่อ 10% แต่ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 500-1,000 ไมโครเมตร เปรียบเทียบกับขนาด ≤ 200 ไมโครเมตร พบว่า ค่าการก่อตัวระยะต้นเปลี่ยนไป 44.89% และ 51.60% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ตามลำดับ เป็นต้น

อนึ่งการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายที่เปลี่ยนไปแสดงให้เห็นว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีคุณสมบัติเป็น “สารหน่วง (Retarder)” ในปฏิกิริยารีไฮเดรชัน (Rehydration reaction) ของกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม ซึ่งเป็นสารหน่วงในลักษณะอนุภาคที่ไปรบกวนปฏิกิริยารีไฮเดรชันให้ช้าลง ด้วยขัดขวางอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยารีไฮเดรชันของแคลเซียม

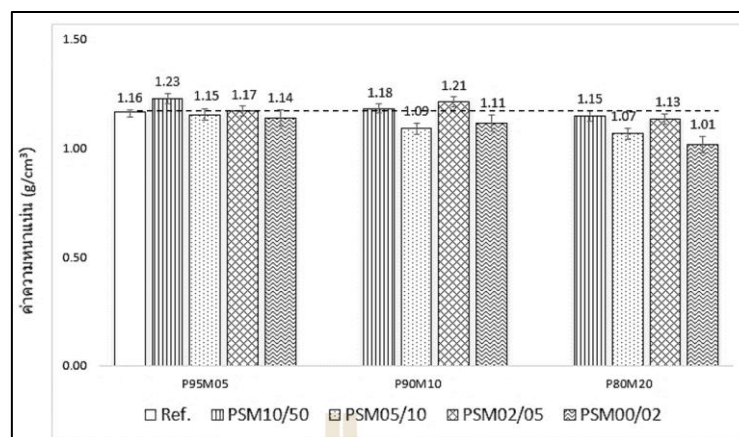
ซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) แอนไฮไดรต์ชนิดละลายน้ำได้ (CaSO_4 ; AIII) และแอนไฮไดรต์ชนิดละลายน้ำได้น้อย (CaSO_4 ; AII) เพื่อที่จะกลายเป็นยิปซัม หรือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ด้วยขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าผลึกของยิปซัมจึงบดบังการเข้าทำปฏิกิริยาของน้ำกับเฟสต่าง ๆ ของระบบยิปซัมดังกล่าวข้างต้น รวมไปถึงตัวเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เองที่มีค่าการดูดน้ำประมาณ 5.6% ทำให้ดูดน้ำเข้าหาตัวเองด้วยเช่นกัน เป็นการลดปริมาณน้ำในระบบและลดอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนั่นเอง ทั้งนี้ข้อดีของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ดีกว่าสารหน่วงชนิดอื่น ๆ ที่ส่วนมากเป็นสารเคมี ก็คืออนุภาคที่มีความแข็งสามารถทำความสะอาดถังผสม (Mixer) และลดอัตราการก่อตัวของเศษยิปซัมแข็ง (Slump) ที่เกิดขึ้นในถังผสม และทำให้เกิดความเสียหายต่อหยุดสายการผลิต หากเศษยิปซัมแข็งมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น จนหลุดไปในกระบวนการผลิตและทำให้กระดาษขาด ลักษณะเศษยิปซัมแข็งที่เกิดขึ้นในถังผสมแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ถังผสม (Mixer) ของกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม

4.6 ผลทดสอบความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ

ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างลดลง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมด้วยขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เล็กลงในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ลงในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัม จะสามารถช่วยลดน้ำหนักของแผ่นยิปซัมได้ก็ต่อเมื่อเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ให้เป็นผงละเอียดมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.4 ค่าความหนาแน่น (Density) ของวัสดุเชิงประกอบ

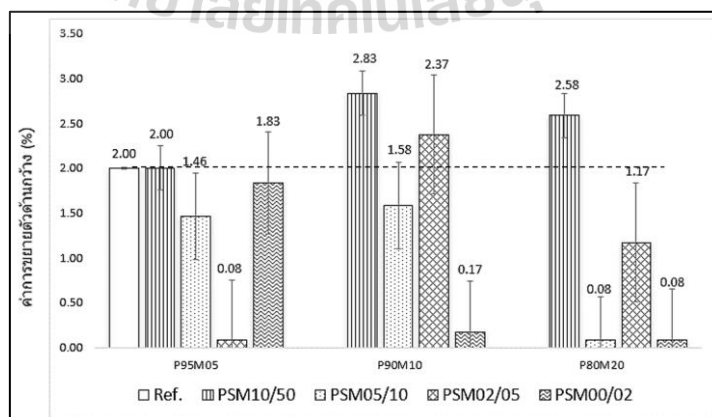
การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนพลาสติก ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างลดลง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมด้วยขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เล็กลงในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ลงในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมจะสามารถช่วยลดน้ำหนักของแผ่นยิปซัมได้ ก็ต่อเมื่อบดเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ให้เป็นผงละเอียดมากยิ่งขึ้น แม้จากผลการทดลองจะมีการแกว่งตัวของข้อมูลอยู่บ้าง แต่โดยรวมแล้วความหนาแน่นเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) เช่น ที่สัดส่วนปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 95% ต่อ 5% ที่ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 1,000-5,000 ไมโครเมตร จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 6.03% ขนาด 500-1,000 ไมโครเมตร ความหนาแน่นลดลง 0.86% ขนาด 200-500 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 0.86% และขนาด ≤ 200 ไมโครเมตร ความหนาแน่นลดลง 1.72 % เป็นต้น ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นที่ลดลงมากที่สุด คือ 12.93 % เป็นของสัดส่วนปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 80% ต่อ 20% ที่ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ ≤ 200 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นการสนับสนุนข้อสรุปข้างต้น ที่ได้สรุปไปว่าสัดส่วนที่มากขึ้น และขนาดที่เล็กของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์จะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง เนื่องจากความหนาแน่นรวม (Bulk density) ที่เปลี่ยนไปของ MFW ด้วย สอดคล้องกับงานของ Ana Jiménez Rivero et. al. (2014) มณเชียร โอทองคำ และคณะ (2009) A.A. Khalil et. al. (2014) และ S. Gutiérrez-González et. al. (2012)

วัสดุเชิงประกอบที่มีความหนาแน่นลดลงนี้เป็นประโยชน์ต่อการผลิตแผ่นยิปซัม เนื่องจากในปัจจุบันมีการแข่งขันกันผลิตแผ่นยิปซัมน้ำหนักเบา ปกติในตลาดแผ่นยิปซัมในประเทศไทย (พ.ศ. 2563) จะผลิตแผ่นยิปซัมชนิดมาตรฐานขนาด $9.0 \times 1200 \times 2400$ mm ให้มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 5.6-6.3 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ปัจจุบันมีผู้ผลิตบางรายพัฒนาเทคโนโลยีใช้สารก่อโฟม

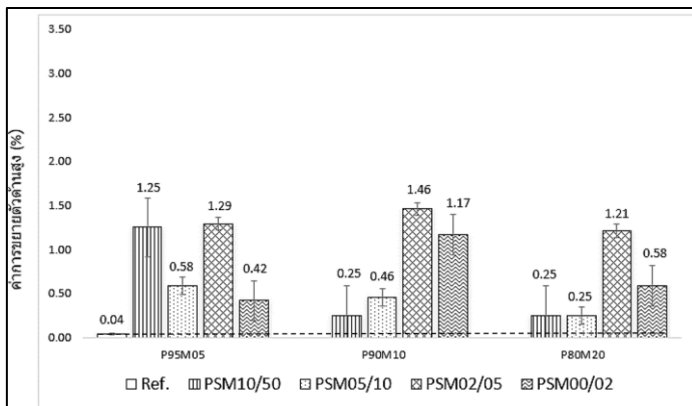
ชนิดเสถียร (Stable foam) และไม่เสถียร (Unstable foam) เพื่อให้ได้ฟองอากาศแทรกในแกนแผ่นยิปซัม และสามารถลดน้ำหนักแผ่นยิปซัมลงได้เป็น 5.0-5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร การที่เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีคุณสมบัติเป็นสารหน่วง และยังลดน้ำหนักแผ่นยิปซัมได้ จึงมีความน่าสนใจที่จะใช้เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มาผสมกับปูนปลาสเตอร์ เพื่อทำให้เกิดวัสดุเชิงประกอบชนิดใหม่

4.7 ผลทดสอบการขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ

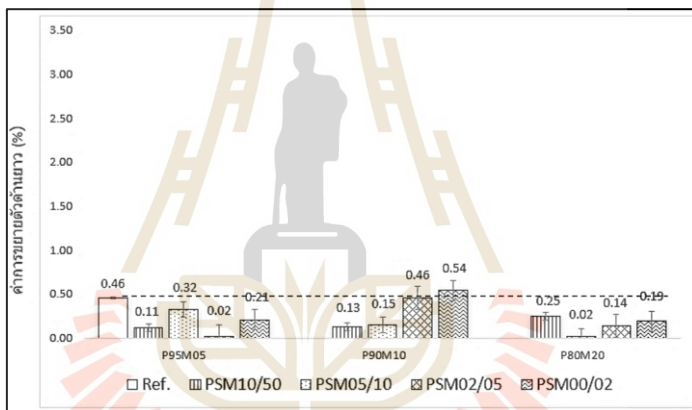
หลังการหล่อปริซึมขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร (กว้าง \times สูง \times ยาว) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างขยายตัว และหดตัวในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันเมื่อเทียบกับชิ้นงานเปรียบเทียบ (Ref.) ซึ่งจากรูปที่ 4.5-4.7 จะแสดงว่าวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) โดยเฉพาะในทิศทางด้านกว้างและด้านสูง แต่ก็มีการแกว่งตัวในทิศทางด้านสูงมากกว่าด้านกว้าง จากช่วงของกราฟ Error bar ที่กว้าง มีทั้งหดตัว และขยายตัวปะปนกันไป แต่ในขณะที่การขยายตัวด้านยาวจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) จากลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สรุปได้ว่าเป็นลักษณะที่เกิดจากช่วงเตรียมชิ้นงาน ที่แบบหล่อจะเปิดหน้าด้านสูงไว้ 1 ด้าน ในขณะที่อีก 5 ด้านจะอยู่ในแบบ ดังรูปที่ 4.8 การรอเวลาในการก่อตัวระยะปลายระหว่างหล่อชิ้นงาน ทำให้เกิดการขยายตัวด้านสูงได้ อนึ่งการกระทำนี้ให้ส่วนผสมเต็มแบบหล่อชิ้นงานเป็นการทำให้ปริมาณเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในทิศทางด้านสูงเรียงตัวเปลี่ยนไป และการก่อตัวของผลึกของยิปซัมเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนหรือเอ็กโซเทอร์มิกส์ (Exothermic reaction) ซึ่งการแผ่อกของความร้อนมาที่ผิวหน้าของแบบหล่อจะทำให้ผลึกมีลักษณะในการยึดขยายขึ้นในแนวตั้งมากกว่าในทิศทางด้านยาว



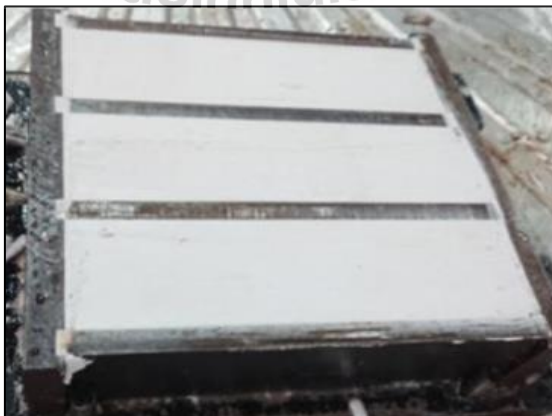
รูปที่ 4.5 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านกว้างของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.6 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านสูงของวัสดุเชิงประกอบ



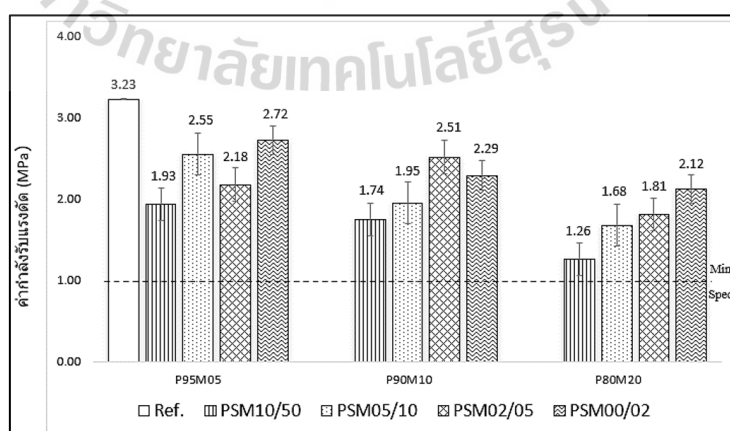
รูปที่ 4.7 ค่าการขยายตัว (Expansion) ในทิศทางด้านยาวของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.8 แบบหล่อตัวอย่างที่เปิดผิวหน้าด้านสูงไว้ 1 ด้าน

4.8 ผลทดสอบค่าการต้านแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบ

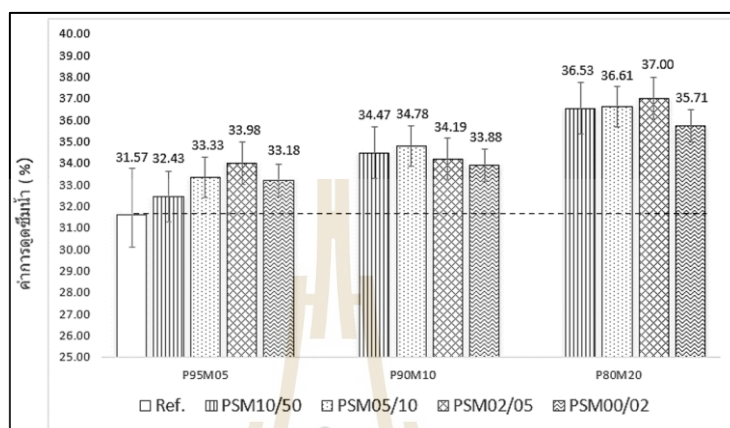
ค่าการต้านแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับการรับแรงดัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) โดยสัดส่วนเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่นที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยความร้อนได้อีก ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างปูนปลาสเตอร์และบริเวณผิวของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้กำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ลดลง เมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์อ้างอิง ทั้งนี้ขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ก็ยังมีผลต่อกำลังการรับแรงดัดเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีขนาดใหญ่ขึ้น สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เล็กกว่าจะมีผิวสัมผัสที่มากกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างส่วนเมตริกซ์ที่เป็นปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดเล็กนั้นยึดเกาะกันได้ดีกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Chaitongrat และคณะ (เฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์, 2559) แต่ถึงกระนั้นค่าผลการทดลองก็ได้ค่าการต้านแรงดัดมากกว่า 1 MPa ทุกส่วนผสม และขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ ซึ่งผ่านตามาตรฐานของ UNE-EN 13279 ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานของ Ana Jiménez Rivero et. al. (2014) มณเชียร โอทองคำ และคณะ (2009) A.A. Khalil et. al. (2014) และ S. Gutiérrez-González et. al. (2012) ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.9 ค่าการต้านแรงดัด (Flexural strength) ของวัสดุเชิงประกอบ

4.9 ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษเมลามีน



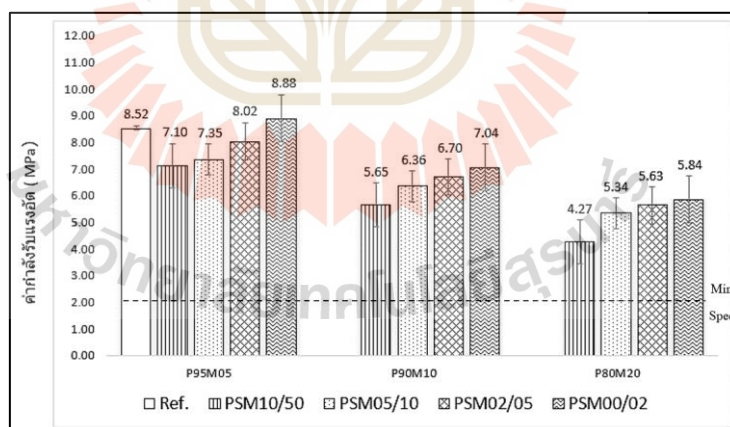
รูปที่ 4.10 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของวัสดุเชิงประกอบ

พอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ กับปูนพลาสติกอร์ จะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอร์อ้างอิง (Ref.) เนื่องจากเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์เป็นวัสดุชอบน้ำที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 5.6 (เมทินี มาให้, 2555) จากเหตุผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมของเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย และยังพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของทุกชิ้นงานทดสอบมีค่าการกระจายตัวของข้อมูล (Error value bar) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอร์ผสมเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์อย่างมีนัยสำคัญ

ค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยสุดเพิ่มขึ้น 2.72% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ที่สัดส่วนปูนพลาสติกอร์กับเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่ 95% ต่อ 5% และขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่ 1,000-5,000 ไมโครเมตร และค่าการดูดซึมน้ำที่มากที่สุด คือ 17.20 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ที่สัดส่วนปูนพลาสติกอร์กับเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่ 80% ต่อ 20% และขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนพอร์มาลดีไฮด์ที่ 200-500 ไมโครเมตร

4.10 ผลทดสอบค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับการรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) ทั้งนี้เหตุผลประกอบเป็นแบบเดียวกันกับข้อ 4.8 เรื่องค่าการต้านแรงดัด (Flexural strength) ของวัสดุเชิงประกอบ โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) สัดส่วนเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง แต่ถึงกระนั้นค่าผลการทดลองก็ได้ค่าการต้านแรงอัดมากกว่า 2 MPa ทุกส่วนผสมและขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งผ่านตามมาตรฐานของ UNE-EN 13279 โดยค่าที่น้อยที่สุดคือ 4.27 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ที่สัดส่วนปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 80% ต่อ 20% และขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 1,000-5,000 ไมโครเมตร และค่าที่มากที่สุดคือ 8.88 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) ที่สัดส่วนปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 95 % ต่อ 5 % และขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ ≤ 200 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Ana Jiménez Rivero et. al. (2014) มณเธิร์ โอทองคำ และคณะ (2009) A.A. Khalil et. al. (2014) และ S. Gutiérrez-González et. al. (2012) ด้วยเช่นกัน

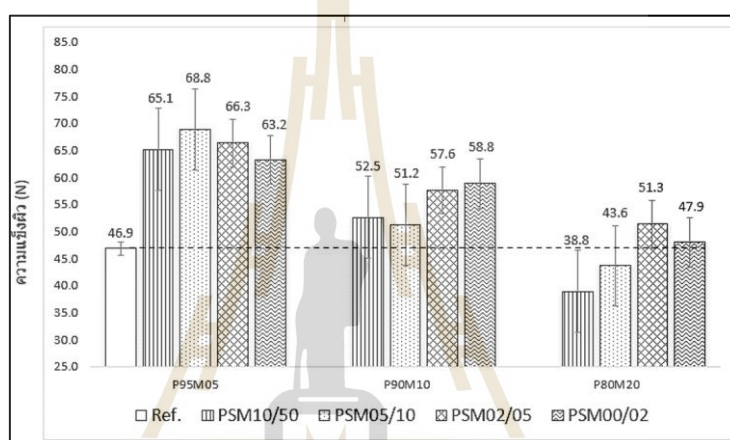


รูปที่ 4.11 ค่าการต้านแรงอัด (Compressive strength) ของวัสดุเชิงประกอบ

4.11 ผลทดสอบค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.12 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าความแข็งของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) เนื่องจากการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน

ฟอร์มาลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวของอีปซั่ม ส่งผลให้ความแข็งผิวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากสัดส่วนผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มากเกินไปจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาการก่อตัวของอีปซั่ม ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ส่วนหนึ่งนี้อาจมีผลต่อค่าการวัดความแข็งพื้นผิวคือพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นวัสดุรวมซึ่งไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด อ้างอิงจากกราฟ Error bar ของวัสดุเชิงประกอบที่มีช่วงกว้าง และสัดส่วนปูนพลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 80% ต่อ 20%



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งของพื้นผิว (Surface hardness) ของวัสดุเชิงประกอบ

4.12 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจากกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล

เมื่อตัดชิ้นงานภาคภาคตัดขวาง (Cross section) ของตัวอย่าง PSM 05/10 หรือขนาดอนุภาคเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ 500-1,000 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนผสม P90M10 หรือปูนพลาสเตอร์ 90% และเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ 10% แล้วนำไปถ่ายภาพผิวกะเทาะ (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) กำลังขยาย 50X พบว่าเกิดวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ชนิดเสริมแรงด้วยอนุภาค (Reinforced particle) ขึ้น โดยมีวัสดุหลักหรือเมตริกซ์ (Matrix) เป็นปูนพลาสเตอร์และวัสดุเสริมแรง (Reinforced material) เป็นเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แต่การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์กับปูนพลาสเตอร์ไม่แข็งแรงมากนัก ด้วยเหตุผลที่ค่าการรับแรงดัด (Flexural strength) และค่าการรับแรงอัด (Compressive strength) มีแนวโน้มลดลง ตามที่อธิบายในข้อที่ 4.8 และ 4.10

ตามลำดับ ทั้งนี้การถ่ายภาพผิวกะเทาะด้วยกล้อง OM ยังไม่มีความละเอียดเพียงพอที่จะทำให้เห็นลักษณะของโครงสร้างผลึกของวัสดุเชิงประกอบ จึงต้องถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) อีกครั้ง ตามข้อที่ 4.13

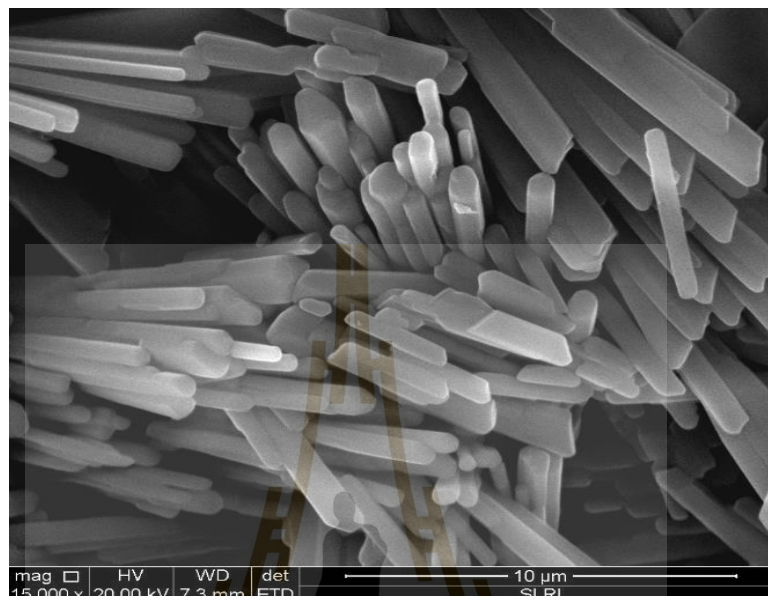


รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายผิวกะเทาะของ PSM 05/10 ที่มีส่วนผสม P90M10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope ; OM) กำลังขยาย 50X

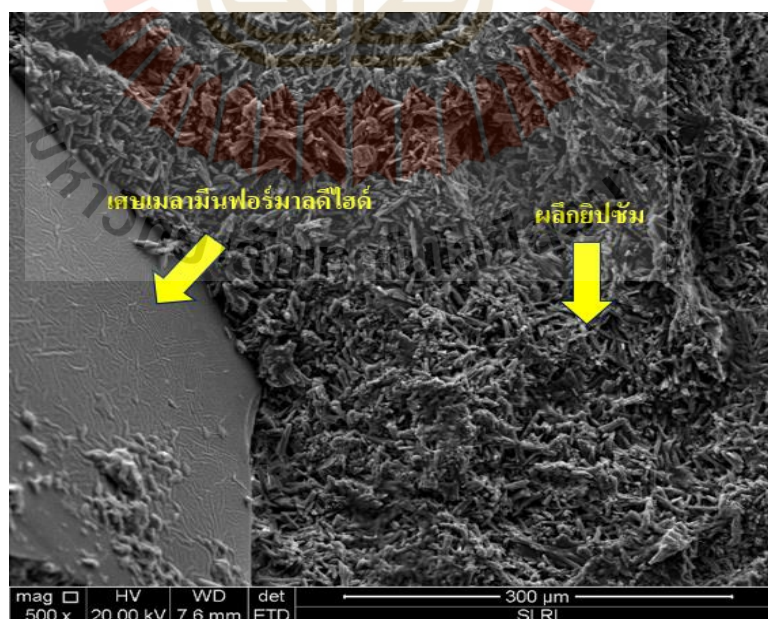
4.13 การวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อตัดชิ้นงานภาคภาคตัดขวาง (Cross section) ของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) มาถ่ายภาพผิวกะเทาะ (Fractured surface) ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าภายหลังจากปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีจากแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) เกิดเป็นผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือที่เรียกว่า ยิปซัม ขยายตัวเป็นรูปเข็ม (Viscart Needle) เรียงไขว้เกาะกัน แสดงดังรูปที่ 4.14 และการแตกตัวของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในเนื้อของยิปซัมที่เกิดการขยายตัวเต็มที่จนเกิดการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นภาพถ่ายผิวกะเทาะ (Fractured surface) ของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ขนาด PSM 10/50 หรือขนาดอนุภาค

เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ 1,000-5,000 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนผสม P90M10 หรือ ปูนพลาสติกอร์ 90% และเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ 10%



รูปที่ 4.14 ภาพขยายปูนพลาสติกอร์หลังก่อตัวเป็นขี้ปซัมด้วย SEM (15,000X)



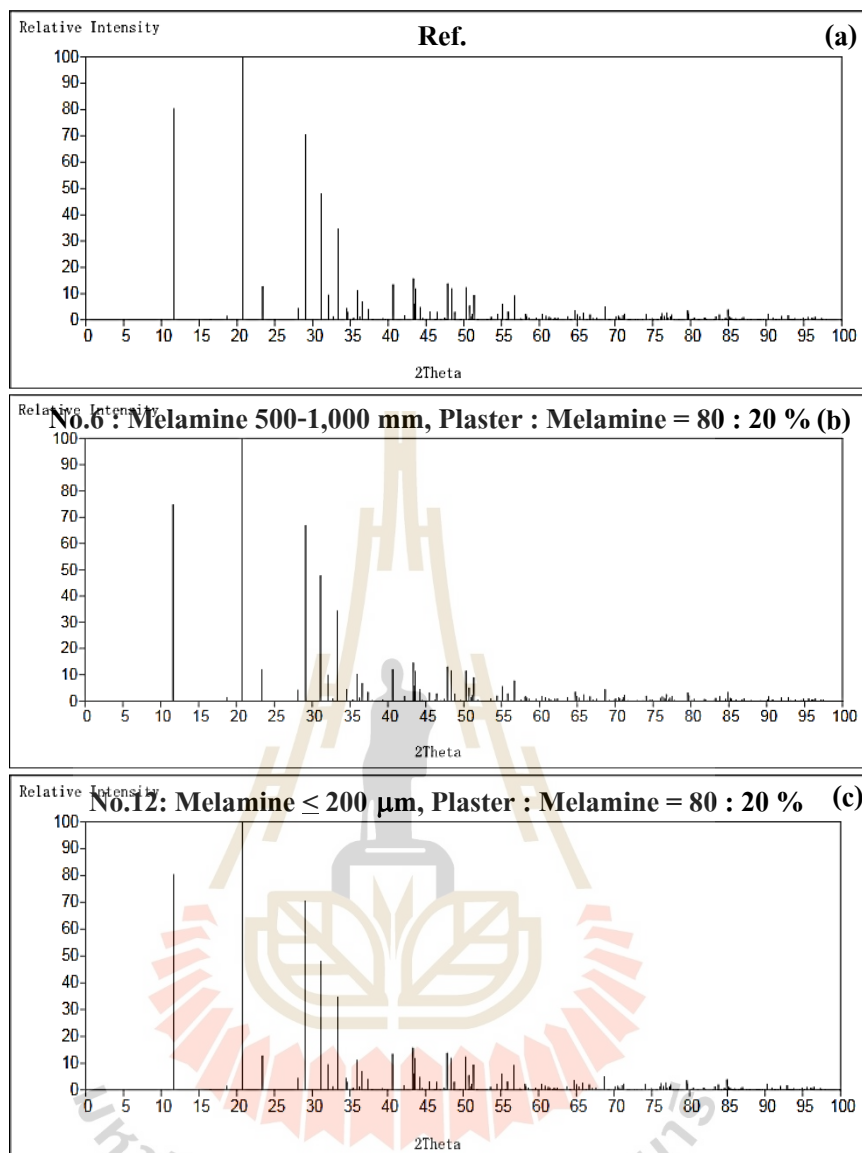
รูปที่ 4.15 ภาพขยายชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ด้วย SEM (500X)

4.14 การตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์หาสารประกอบชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นจากการผสมปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ จากเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction instrument; XRD) มีการเตรียม และเรียงตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจากกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสี (Intensity) กับค่ามุม 2-theta (2θ) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (a)-(c) พบว่า ไม่มีสารองค์ประกอบใหม่ใด ๆ เกิดขึ้นจากการเกิดวัสดุเชิงประกอบระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นการยืนยันที่สมบูรณ์ว่าเป็นการเกิดวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) จริง เพราะวัสดุทั้งสองชนิดไม่ได้เกิดปฏิกิริยาใด ๆ ต่อกัน



รูปที่ 4.16 การเตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่อง XRD

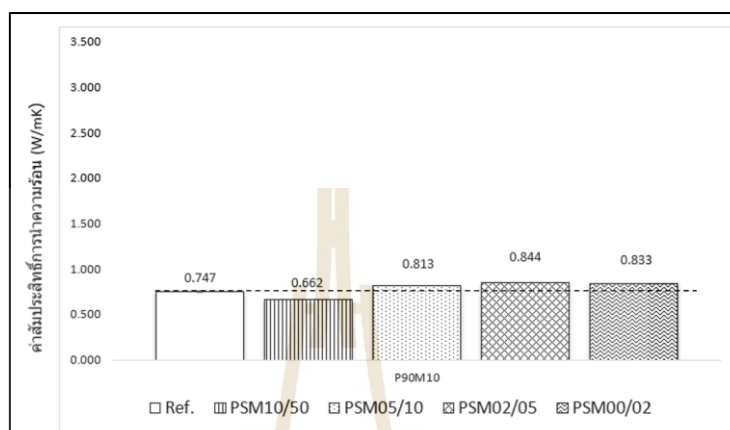


รูปที่ 4.17 (a) กราฟ XRD ของตัวอย่างอ้างอิง (Ref.) (b) กราฟ XRD ของตัวอย่างหมายเลข 6 (c) กราฟ XRD ของตัวอย่างหมายเลข 12

4.15 ผลทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 4.18 โดยแสดงให้เห็นว่าการผสม MFW ที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ กับปูนพลาสติกอร์ จะส่งผลให้แนวโน้มค่าการนำความร้อนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอร์อ้างอิง (Ref.) เนื่องจาก MFW เป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.27-0.42 W/mK (ดังตารางที่ 2.6) ซึ่งน้อยกว่ายิปซัม (Ref.) ที่มีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.74 W/mK การเติม MFW ทำให้ค่าการนำความร้อนโดยเฉลี่ยสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ในกรณีที่เป็นเศษวัสดุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการที่เม็ดอนุภาคของ MFW สามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างโมเลกุลของผลึกยิปซัมที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่ไขว้กันไปมา การนำความร้อนจากของแข็งจึงเกิดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 4.18 ค่าการนำความร้อน (Thermal conduction) ของวัสดุเชิงประกอบที่สัดส่วนการผสมปูนปลาสเตอร์ 90% และ MFW 10%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของแผ่นยิปซัมจากการผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์แทนปูนปลาสเตอร์บางส่วน ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1 ค่าการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.2 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.3 การขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.4 ค่าการต้านแรงคัดและค่าการต้านแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.5 ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.6 ค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.8 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ
- 5.9 ข้อเสนอแนะ

5.1 ค่าการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของวัสดุเชิงประกอบ

เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เองที่สูงถึงร้อยละ 5.6 ส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำลดลง เสมือนมีการแบ่งน้ำส่วนหนึ่งไปไว้ในอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า เมื่อปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน จึงสามารถประยุกต์ใช้เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ไปเป็นสารหน่วงปฏิกิริยารีไซเคิลชันของการผลิตแผ่นยิปซัม ได้ ลดต้นทุนการซื้อสารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารหน่วง

5.2 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ

การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างลดลง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมด้วยขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่เล็กลงในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ลงในกระบวนการผลิต

แผ่นยิปซัมจะสามารถช่วยลดน้ำหนักของแผ่นยิปซัมได้ ข้อดีนี้จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยิปซัม เนื่องจากปัจจุบันมีการแข่งขันการผลิตแผ่นยิปซัมที่มีน้ำหนักเบา

5.3 การขยายตัวของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการขยายตัวและหดตัวพบว่า มีการแกว่งตัวในทิศทางด้านสูงมากกว่าด้านกว้างและด้านยาว แต่ในขณะที่การขยายตัวด้านยาวจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง จากลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สรุปได้ว่าเป็นลักษณะที่เกิดจากช่วงเตรียมชิ้นงานที่ด้านสูงจะเป็นด้านที่เปิด ในขณะที่ด้านยาวและด้านกว้างจะถูกจำกัดการขยายตัวโดยแบบที่ใช้หล่อชิ้นงาน แต่ก็สรุปได้ว่าเมื่อเกิดการก่อตัวระยะปลายแล้วจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการขยายตัวได้

5.4 ค่าการต้านแรงดัดและแรงอัดของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการต้านแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบจะลดลงเมื่อสัดส่วนเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีนที่ผสมจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของยิปซัม โดยไม่มีการเกิดสารประกอบใหม่ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างปูนปลาสเตอร์และบริเวณผิวของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้กำลังรับแรงดัดและแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ลดลงเมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์อ้างอิง ทั้งนี้อาจเกิดจากขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เล็กกว่าจะมีผิวสัมผัสที่มากกว่าเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ขนาดใหญ่ จึงพบว่าการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ขนาดเล็กลงนั้นให้ค่าต้านทานแรงดัดและแรงอัดสูงกว่าการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ขนาดใหญ่ แต่ถึงกระนั้นก็ได้ค่าการต้านแรงดัดมากกว่า 1 MPa และค่าการต้านแรงอัดมากกว่า 2 MPa ทุกส่วนผสม และทุกขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งผ่านตามมาตรฐานของ UNE – EN 13279 แสดงถึงศักยภาพการใช้เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพื่อผลิตแผ่นยิปซัมได้ โดยเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ 10% โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ และขนาดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ 200-500 ไมโครเมตร คือ สัดส่วนการผสมขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ดีที่สุด

5.5 ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

ทุกสัดส่วนและขนาดของการผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์กับปูนปลาสเตอร์จะเห็นว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 5.6 ทำให้สัดส่วนการผสมของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์อย่างมีนัยสำคัญ ค่าการดูดซึมน้ำที่มากที่สุดคือ

17.20 % เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ที่สัดส่วนปูนพลาสติกกับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 80 % ต่อ 20 % และขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ 200-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ

5.6 ค่าความแข็งของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ

การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนพลาสติก ส่งผลให้ค่าความแข็งของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอ้างอิง เนื่องจากการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวของยิปซัมส่งผลให้ความแข็งผิวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากสัดส่วนผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่มากเกินไปจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาการก่อตัวของยิปซัม ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปริมาณเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ส่วนหนึ่งนี้อาจมีผลต่อค่าการวัดความแข็งพื้นผิวคือพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นวัสดุรวมซึ่งไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

5.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบมีการเข้ากันได้ระหว่างเฟสที่เป็นวัสดุหลัก หรือเมตริกซ์ (Matrix) ซึ่งก็คือปูนพลาสติก และวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค (Reinforced particle material) ซึ่งก็คือ เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในภาพรวมคือ อัตราส่วนปูนพลาสติกร้อยละ 90 ต่อเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยเศษเมลามีนที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร สามารถนำมาใช้ได้ และยังคงให้ค่าสมบัติทางกลและกายภาพที่ดี โดยเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์จะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างผลึกของยิปซัม โดยไม่มีการเกิดสารประกอบใหม่ ดังนั้นวัสดุปูนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์จึงเป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม ซึ่งอิทธิพลของขนาดและปริมาณของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ

5.8 ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

ค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบแม้จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ก็มีแนวโน้มเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลจากการที่อนุภาคของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์บางส่วน โดยเฉพาะที่เป็นเศษอนุภาคขนาดเล็กสามารถไปปิดช่องว่างระหว่างผลึกของยิปซัมที่เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วจะทำให้ผลึกเติบโตขึ้นจนเป็นผลึกสมบูรณ์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่ไร้ระเบียบ แต่ก็ไปตามทิศทางตัวกระตุ้น เพราะการขึ้นรูปชิ้นงานมีการกระทุ้งส่วนผสมเพื่อไล่อากาศและทำให้เต็มแบบด้วย

MFW เป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.27-0.42 W/mK ที่มีค่าน้อยกว่ายิปซัมเกือบ 3 เท่า (ค่าการนำความร้อนของยิปซัมธรรมชาติหลังเกิดปฏิกิริยาริไฮเดรชันมีค่าประมาณ 0.74 W/mK) การเติม MFW ทำให้ค่าการนำความร้อนโดยเฉลี่ยสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เป็นเศษวัสดุที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลจากการที่เม็ดอนุภาคของ MFW สามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างโมเลกุลของผลึกยิปซัมที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่ไขว้กันไปมาทำให้การนำความร้อนเกิดได้ดีขึ้น

5.9 ข้อเสนอแนะ

การทดลองในงานวิจัยนี้ยังเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory) ด้วยข้อจำกัดของการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ข้อสรุปจากงานวิจัยจึงใช้เป็นแนวทางในการผลิตแผ่นยิปซัมเท่านั้น เพราะในการผลิตจริงจะใช้วัตถุดิบเติมแต่งอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น แป้งมันสำปะหลังคัดแปร สารช่วยการกระจายตัว สารเร่ง สารเสริมแรง หรือสารก่อโฟม เป็นต้น ซึ่งย่อมทำให้คุณลักษณะและองค์ประกอบภายในแกนยิปซัมเปลี่ยนไป ปัจจัยหลักอื่น ๆ ที่จะทำให้ผลการทดลองเปลี่ยนไป เช่น ชนิดของแร่ยิปซัม และชนิดของเตาเผาแร่ยิปซัม เพราะจะทำให้ได้ปูนพลาสเตอร์ที่มีสมบัติไม่เท่ากัน ทำให้ปฏิกิริยาริไฮเดรชันเป็นไปด้วยอัตราเร็ว หรือรูปแบบที่เปลี่ยนไป ผู้วิจัยจึงขอแนะนำให้ผู้สนใจท่านอื่น ๆ ได้ใช้งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการค้นหา หรือปรับปรุง เพื่อให้เกิดแนวความรู้ใหม่ ๆ เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมยิปซัมได้มากที่สุด

รายการอ้างอิง

- จักรพงษ์ ขวัญแก้ว. (2554). การบริหารการผลิตและการปฏิบัติการที่มีผลต่อประโยชน์ที่ได้รับของ
บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ : กรณีศึกษาบริษัท ไทยแอร์โรว์ จำกัด. สารนิพนธ์ บธ. ม.
(การจัดการ). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หน้า 13-14.
- เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์. (2559). ผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของ
คอนกรีตมวลเบา. วิทยานิพนธ์ วศ.ค. (วิศวกรรมเครื่องกล). นครราชสีมา มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี.
- ปัญญา ธนบุญสมบัติ. (2544). การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
(ไทย-ญี่ปุ่น)
- บรรเทิง จุนใจ. (2556). การศึกษาความเป็นไปได้เพื่อลดปริมาณความต้องการน้ำในอุตสาหกรรม
การผลิตแผ่นยิปซัม : กรณีศึกษา บริษัท คณอพีปซัม (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์
วศ.ม. (การจัดการพลังงาน). นครราชสีมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บุญยมาศ วอชวา. (2559). การแปรรูปเศษเมลามีนเป็นวัตถุดิบรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์
เมลามีน. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม). กรุงเทพมหานคร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. พ.ศ. 2548.
- ปิยนุช ม่วงทอง, ชรินทร์ คงพันธุ์ และบรรกิตต์ เนคมานุรักษ์. (2557). อิทธิพลของวัสดุพอซโซลาน
ประเภทวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์ (Influence of
Pozzolan Materials, Agricultural Waste, on Mechanical Properties of Soil-Cement
Brick). งานวิจัยโดยการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.),
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.
- ปิยะวดี บัวจางล, วัลยุท เพ็ญวิวัฒน์ และวีรญา ธรรมจันทร์. (2557). แผ่นใยไม้อัดยิปซัมจากไม้ยูคา
ลิปตัส ยูโรฟิลลา (Gypsum Fiber Boards from Eucalyptus urophylla). ระบบบริหาร
จัดการงานวิจัยแห่งชาติ (NRMS) สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรุงเทพฯ. 11 หน้า.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานพนนท์. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (Food network solution). **Gelatinization temperature (อุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชัน)**. เมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2563.

เพ็ญพร พุ่มกumar (2544). การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นหินอ่อนแทนที่ปูนยิปซัมปลาสเตอร์บางส่วนในการผลิต แผ่นยิปซัม (The Feasibility Study of Producing Gypsum Plasterboards by Using Marble Powder Instead of Gypsum Jointing Plaster). วิทยานิพนธ์ วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล 131 หน้า.

มยุรี ปาลวงศ์ (2552). **ประโยชน์ของยิปซัม**. สำนักบริหารยุทธศาสตร์ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ พิมพ์ครั้งที่ 1 กระทรวงอุตสาหกรรม ถ.พระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยิปซัม (มอก.188-2547). **ปูนยิปซัมสำหรับการก่อสร้าง (Gypsum Plaster for Building Purpose)**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยิปซัม (มอก. 219-2552). **แผ่นยิปซัม**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ.

เมทินี มาให้ (2555). คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีนที่ส่วนผสมต่างๆ ด้วยการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ร้อนและแม่พิมพ์เย็น. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). นครราชสีมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มณเชียร โอทองคำ, สุจิระ ขจรจิตต์เมตต์ และปิติสานต์ กร้ามาต (2552). การใช้เศษฝุ่นฝ้ายเป็นวัสดุผสมในแผ่นยิปซัม (Dust Cotton Fiber as an Added Material in Gypsum Boards). **Environment and Natural Resources Journal**, Vol.7, No.1, June 2009, 8 หน้า.

ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้ (2555). **ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

สุชน เสถียรยานนท์ (2551). **เมลามีน**. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. ปีที่8(2): 57-64.

สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรมคู่มือ (2555). **3Rs กับการจัดการของเสียภายในโรงงาน**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555.

หฤทกัถ์ กิระดิเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และ อภิรัตน์ เลาห์บุตร. (2553). **ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ (An Overview of Composite Materials)**. วิศวกรรมสาร มก. กรุงเทพฯ ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553 หน้า 18-32.

เอกสารแผ่นพับสำหรับประชาสัมพันธ์สินค้า. นำเสนอแผ่นยิปซัมประเภทต่าง ๆ ของฝ่ายขายในประเทศ บริษัท คอนอฟ ยิปซัม (ประเทศไทย) จำกัด

- A.A. Khalil, A. Tawfik, A.A. Hegazy, M.F. El-Shahat. (2014). Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. **Construction and Building Materials** 68. (2014). 580-586.
- Angel Serna, Mercedes del Río, José Gabriel Palomo and Mariano González. (2012). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. **Construction and Building Materials** 35. (2012). 633-641.
- Ana Jiménez Rivero, Ana de Guzmán Báez and Justo García Navarro. (2014). New composite gypsum plaster - ground waste rubber coming from pipe foam insulation. **Construction and Building Materials** 55. (2014). 146-152.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) C128- 15. **Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.**
- American Society for Testing and Materials (ASTM, Designation: C1396/C1396M-1). **Standard Specification for Gypsum Board.**
- American Society for Testing and Materials (ASTM) C472-99;2009). **Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete.**
- American Society for Testing and Materials (ASTM): E1225-13. **Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique.**
- Basic Training Research & Development Document. Dr. Sebastian FÖrthner. **Gypsum Basic.** Knauf Gypsum. Iphofen, Germany, 2017.
- Basic Training Research & Development Document, Dr. Stephan Dietz. Calcining of gypsum, Influence on the products. Knauf Gypsum, Iphofen, Germany, 2017.
- Charles Blow, Bob Bruce and Gary Murray. (2010). **Water demand reduction of hemihydrate Plasters.** Global Gypsum Magazine. May-June 2010. เล่มที่ 1. ฉบับที่ 1. หน้า 14-23.
- Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. **Off J Eur Union**, 22th November 2008 [L312].
- Dweik, H.S., Ziara, M. M., and Hadidoun, M.S. (2008). Enhancing concrete strength and thermal insulation using thermoset plastic waste. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials.** vol.57 (7): May; pp.635-656.

- Franz Wirsching (1985). Reprint of an article from **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Calcium Sulfate**. 5th Edition, Gebruder Knauf Westdeutsche Gipswerke, Iphfen, Federal Republic of Germany.
- Marcos Lanzón, P.A. García-Ruiz. (2012). Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. **Construction and Building Materials 28. (2012).** 506-511.
- Mridul Garg and Aakanksha Pundir. (2012). Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash-alpha gypsum plaster-Portland cement. **Construction and Building Materials 37. (2012).** 758-765.
- Monower Sadique, Hassan Al-Nageim, William Atherton, Linda Seton and Nicola Dempster. (2013). Mechano-chemical activation of high-Ca fly ash by cement free blending and gypsum aided grinding. **Construction and Building Materials 43. (2013).** 480-489.
- M.S. Morsy, S.H. Alsayed and Y.A. Salloum. (2012). Development of eco-friendly binder using metakaolin-fly ash-lime-anhydrous gypsum. **Construction and Building Materials 35. (2012).** 772-777.
- Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. **Waste Management**. vol.28(9). pp. 1581-1588.
- R.X. Magallanes-Rivera, C.A. Juarez-Alvarado, P. Valdez, J.M. Mendoza-Rangel (2012). Modified gypsum compounds: An ecological-economical choice to improve traditional plasters. **Construction and Building Materials 37. (2012).** 591-596.
- S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón. (2012). Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. **Construction and Building Materials 34. (2012).** 179-185.
- UNE - EN 13279-1: 2009. **Gypsum Binders and Gypsum Plasters-Part 1: Definitions and Requirements**. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid, Spain. 2009.
- UNE - EN 13279-2: 2006. **Gypsum Binders and Gypsum Plasters-Part 2: Test Methods**. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid Spain. 2006.

- Yi Ding, Youchun Fang, Hui Fang Qicai Zhang, fengjun Zhang and Won-Chun Oh. (2015). Study on the Retarding Mechanism and Strength Loss of Gypsum from Hydrolyzed Wheat Protein Retarder. **Journal of the Korean Ceramic Society**, Vol.52, No.1. (2015). 28-32.
- Zhao Feng-qing, Liu Hong-jie, Hao Li-xia, Li Qian. (2012). Water resistant block from desulfurization gypsum. **Construction and Building Materials** 27. (2012). 531-533.





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บรรเทิง จุนใจ, สุกกิจ รูปจันทร์, สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และเฉลิมชัย ไชยธงรัตน์ (2563). อิทธิพลของ
เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยารีดอกซ์ของยิปซัม. วารสารวิชาการ
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2564.





อิทธิพลของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อการหน่วง ปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัม

บรรเทิง จุนใจ¹ สุกกิจ รูปจันทร์² สมศักดิ์ ศิวคำรองพงส์³ และเฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์⁴

บทคัดย่อ

เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลด้วยความร้อน ปัจจุบันขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงมีการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ซึ่งเป็นวิธีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษาวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามความต้องการใช้งาน มีหลากหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือวัสดุสำหรับใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยาการผลิตแผ่นยิปซัม พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์แบบผงที่มีขนาด <200 200-500 500-1,000 และ 1,000-5,000 ไมโครเมตร ที่สัดส่วนผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนักของปูนปลาสเตอร์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนปลาสเตอร์ทั้งที่ผสมและยังไม่ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์คงที่เท่ากับ 0.75 การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นตัวอย่างยิปซัม อีกทั้งยังศึกษาการก่อตัวระยะต้น การก่อตัวระยะปลาย ความหนาแน่น กำลังรับแรงคด กำลังรับแรงอัด ความแข็งผิว การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ที่มีส่วนผสมของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ ผลการศึกษาพบว่า เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัม ส่งผลให้การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติความแข็งผิวของยิปซัมที่ดีขึ้น การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น อีกทั้งความสามารถของกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE - EN 13276-1 : 2009

คำสำคัญ : เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์, การหน่วงปฏิกิริยา, วัสดุผสม, ปฏิกิริยาไฮเดรชัน, ยิปซัม, ปูนปลาสเตอร์

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

⁴ผู้ติดต่อ, อีเมล: somsaksi@sut.ac.th



Influence of Melamine Formaldehyde Waste on Retardation of Gypsum Rehydration Reaction

Bunternng Joonjai¹, Supakit Rooppakhun² Somsak Siwadamrongpong^{1*} Chalermpchai Chaitongrat³

Abstract

Gypsum board production consumes many kinds of raw materials for physical properties adjustment and to meet target specifications. Retarder is one of important additive that retard the gypsum rehydration reaction. This research studies the influence of melamine formaldehyde waste on this reaction, the new composite material properties and the potential of saving waste disposal cost. The melamine formaldehyde waste powder was employed to produce gypsum specimen. The replacements were 5%, 10% and 20% by plaster weight with particle size less than 200, 200 - 500, 500 - 1,000 and 1,000 - 5,000 micrometers and constant water-to-plaster ratio of 0.75. Physical and Mechanical properties of gypsum specimen containing melamine formaldehyde waste powder were investigated in testing of initial setting time, final setting time, density, flexural strength, compressive strength, surface hardness, water absorption and microstructure. The experimental results revealed new composite material that initial setting time, final setting time, surface hardness and water absorption tended to be increased vary by increasing of melamine formaldehyde waste quantity. The melamine formaldehyde created retardation of gypsum rehydration reaction. The new composite had flexural strength and compressive strength complied with the UNE-EN 13276-1: 2009 standard with the potential to save waste disposal cost.

Keywords : Melamine Formaldehyde Waste, Retardation, Composite materials, Rehydration reaction, Gypsum, Plaster

¹School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³School of Mechanical and Automotive Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: somsaksi@sut.ac.th



1. บทนำ

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization reaction) ระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์ นิยมนำมาใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร โดยการให้ความร้อนประมาณ 145-165 องศาเซลเซียสและความดันประมาณ 30-60 เมกะปาสกาล [1] เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่นและกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มักจะเกิดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ของเสียจำนวนมาก ในขณะที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิล (Recycle) ด้วยวิธีการหลอมละลายโดยการให้ความร้อนได้และวิธีการจัดการของเสียที่นิยมใช้วิธีฝังกลบ [2] ต้องมีค่าใช้จ่ายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว อันเนื่องมาจากอัตราการย่อยสลายตัวที่ช้าและการกักขังสิ่งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมมีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ การเผาแร่ยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เพื่อกำจัดน้ำออกจากโมเลกุลยิปซัมหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) และการดูดน้ำกลับเข้าสู่โมเลกุลของยิปซัมเรียกว่าปฏิกิริยารีไฮเดรชัน (Rehydration) ซึ่งปฏิกิริยารีไฮเดรชันนี้เป็นการเปลี่ยนรูปของปูนปลาสเตอร์หรือแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) ในรูปแบบผงปูนปลาสเตอร์ให้เปลี่ยนไปเป็นแผ่นยิปซัม โดยมีการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ หลายชนิด เพื่อให้การผลิตต่อเนื่องและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพหนึ่งในนั้นคือ “สารหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชัน” ซึ่งสารเติมแต่งนี้ จะทำให้คุณสมบัติของ ค่าการคงตัว ค่าการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเปลี่ยนแปลงไป [3]

จากการศึกษาหาวัสดุที่มีศักยภาพเพียงพอต่อการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม พบว่าอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.6 [4] มีศักยภาพเพียงพอในการนำมาผสมกับปูนปลาสเตอร์เพื่อทำให้เกิดวัสดุผสม (Composite material) ชนิดใหม่ โดยมีปูนปลาสเตอร์เป็นส่วนของเมตริกซ์ (Matrix phase) และใช้เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค (Particle-reinforced composite) อีกทั้งเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ยังสามารถลดอัตราเร็วในการดูดน้ำของปูนปลาสเตอร์หรือหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันได้ โดยเป็นตัวขัดขวางการก่อตัวของผลึกยิปซัม ในการทดลองนี้ยังมีการเตรียมชิ้นงานและค่ามาตรฐาน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน UNE - EN 13279 - 2 : 2006 [5]

นักวิจัยหลายท่านได้ทดลองนำเศษวัสดุต่าง ๆ ทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาผสมกับปูนปลาสเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล [6] ซึ่งหากวัสดุดังกล่าวเป็นเศษวัสดุของเสียจากภาคอุตสาหกรรม [7] แล้วจะทำให้เกิดข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์และนิเวศวิทยา ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Ana Jiménez Rivero, Ana de Guzmán Báez และ Justo García Navarro ศึกษาการนำเศษยางฉนวนหุ้มท่อมาบดและผสมลงในปูนปลาสเตอร์สำหรับการผลิตแผ่นยิปซัม โดยหล่อเป็นแท่งตัวอย่างขนาด 40 x 40 x 160 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ ตามมาตรฐาน UNE - EN 13279 - 1 : 2009 [8] และ UNE - EN 13279 - 2 : 2006 จากการศึกษายพบว่าแท่งตัวอย่างมีความเข้ากันได้กับเศษยาง ซึ่งมีความหนาแน่นลดลงได้มากที่สุดถึงร้อยละ 49 โดยกำลังรับ



แรงอัดและกำลังรับแรงดัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ อ้างอิง ปริมาณของเศษยางที่ใช้ผสมมากที่สุดร้อยละ 7.50 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ แต่เมื่อขนาดเม็ดยางหุ้มฉนวนใหญ่มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง โดยขนาดเม็ดยางหุ้มฉนวนที่เหมาะสมคือ 4.6 มิลลิเมตร [2]

2. วิธีการทดลอง

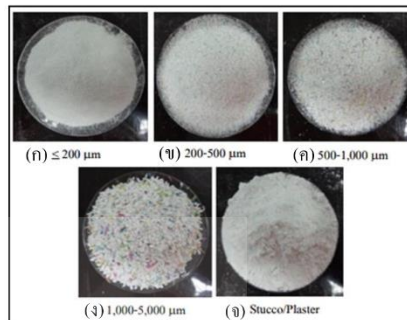
2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนปลาสเตอร์หรือสติกโก้ (Stucco) เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์และน้ำประปา โดยปูนปลาสเตอร์เป็นชนิดอะลาบาสเตอร์ (Alabaster) จากเหมืองแร่สหชาติเศรษฐกิจ อำเภอหนองบัว จังหวัด นครสวรรค์ ที่ผลิตในวันและเวลาเดียวกัน ถูกจัดเก็บไว้ในภาชนะบรรจุที่แห้ง ปิดอย่างมิดชิด ป้องกันไม่ให้ อากาศ และความชื้นเข้าถึงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 (จ)

เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ ผงที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ศรีไทย ซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) โดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อคัด แยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์และคัดขนาดออกเป็น <200 200-500 500-1,000 และ 1,000-5,000 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูป ที่ 1 (ก-ง)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การทดลองผสมปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์มีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้สัญลักษณ์ดังนี้ Ref. คือ ปูนปลาสเตอร์อ้างอิง และ PSM00/02 PSM02/05 PSM05/10 PSM10/50 คือ ปูน ปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาด <200



รูปที่ 1 (ก - ง) เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่ผ่านการร่อน คัดขนาด และ (จ) ปูนปลาสเตอร์หรือสติกโก้ (Stucco)

200-500 500-1,000 และ 1,000-5,000 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งทุกขนาดเศษเมลามีนจะถูกผสมที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ต่อเศษเมลามีนเท่ากับ 95:05 90:10 และ 80:20 ใช้สัญลักษณ์ P95M05 P90M10 และ P80M20 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยคงสัดส่วน น้ำต่อวัสดุผสมทั้งหมด (Water to Composite Material ; W/C) มีค่าเท่ากับ 0.75 พร้อมทั้งทุกผลการทดสอบ ได้จาก ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ 3 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไขการ ทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบคือชิ้นรูปเป็นทรง ปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 40 x 40 x 160 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural strength) และ ขนาด 40 x 40 x 40 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับ แรงอัด (Compressive strength) ดังแสดงในรูปที่ 2 [5]

เนื่องจากการผลิตแผ่นยิปซัมจะใช้แร่ยิปซัม ธรรมชาติ (Natural gypsum) หรือยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic gypsum) ที่มีค่าความบริสุทธิ์ (Purity) มากกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป ดังนั้นสัดส่วนการผสมเศษ



รูปที่ 2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์จะแสดงสัดส่วนการผสมที่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนปลาสเตอร์ ทั้งนี้ได้ออกแบบและทดลองใช้เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5,000 ไมโครเมตรและสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์แล้ว พบว่าการยึดเกาะระหว่างปูนปลาสเตอร์และเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีการแตกหักของชิ้นงานขณะถอดออกจากแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ขั้นตอนการผสมชิ้นตัวอย่างเริ่มจากเทส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในเครื่องผสมมอร์ต้าจนผสมกันเป็นอย่างดี จากนั้นเทน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดจนได้เนื้อตัวอย่างเหลวที่เข้ากันแล้ว เทลงแบบหล่อตัวอย่างตามขนาดที่ใช้ในการทดสอบ และทำการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กกลมเพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างที่เต็มแบบ จากนั้นปล่อยให้ไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้องจนเกิดการก่อตัวระยะปลายสมบูรณ์แล้วจึงแกะออกจากแบบหล่อนั้นวางชิ้นงานไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่หรือเวลา

ประมาณ 24 ชั่วโมง

2.2 การทดสอบชิ้นตัวอย่าง

การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time ; IS) คือระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำ จนกระทั่งยิปซัมเริ่มก่อตัว โดยการก่อตัวระยะต้นสามารถทำให้ทราบถึงระยะเวลาสูงสุดในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดรูปร่าง หรือความหนาตามความต้องการ อีกทั้งยังแสดงถึงพันธะการเชื่อมต่อนៃยิปซัมที่สามารถยึดติดกันได้ โดยการทดสอบสามารถทำได้จากการรับน้ำหนักของเข็มไวเคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ได้ โดยเข็มจมลงในยิปซัมเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C472-99 [9] และ ASTM C1396 [10]

การก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time ; FS) โดยใช้เข็มไวเคต (Vicat) เช่นเดียวกับกับการก่อตัวระยะต้น ซึ่งการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำ จนกระทั่งเข็มไวเคตไม่สามารถเกิดการจมหรือยุบตัวเมื่อทำการปล่อยเข็ม

การทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้ชิ้นตัวอย่างรูปทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่หล่อไว้ ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงดัด แล้วทำการวัดขนาดและน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่องกลดลองกรีดแบบไฮดรอลิก

การทดสอบการดูดซึมน้ำทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 48 ชั่วโมง จากนั้นชั่งหาน้ำหนักเปียก ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกจากเตาอบและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักแห้ง ร้อยละของการดูดซึมน้ำคำนวณจากสมการที่ (1)



ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	ขนาดอนุภาคของ เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (ไมโครเมตร)	สัญลักษณ์	ปูนปลาสเตอร์ หรือสติกโก้ (ร้อยละ)	เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (ร้อยละ)
PSM10/50	1,000 – 5,000	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM05/10	500 – 1,000	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM02/05	200 - 500	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
PSM00/02	< 200	P95M05	95	5
		P90M10	90	10
		P80M20	80	20
Ref.	ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้อ้างอิง		100	0

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(\text{นน.เปียก} - \text{นน.แห้ง})}{\text{นน.แห้ง}} \times 100 \quad (1)$$

การทดสอบความแข็งของพื้นผิว (Surface hardness) โดยใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร กดลงบนผิวของชิ้นตัวอย่างอิมพัชด้วยแรงคงที่เพื่อหาค่าความแข็งของผิว

การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการผสมปูนปลาสเตอร์และเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ ทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) Olympus รุ่น CX23 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM รุ่น QUANTA 450, FEI – EDS (XMax50 SDD, Oxford)

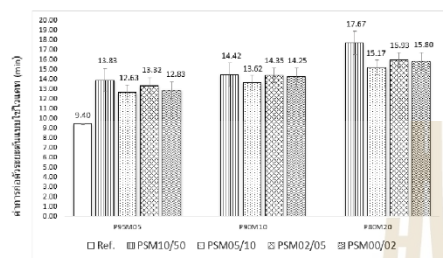
3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 การทดสอบการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย

ผลการทดสอบการก่อตัวระยะต้นของส่วนผสมปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์และน้ำ พบว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ส่งผลให้เวลาการก่อตัวระยะต้นของอิมพัชเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สูงถึงร้อยละ 5.6 [4] ส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำลดลง [3] เป็นผลให้เวลาการก่อตัวระยะต้นของอิมพัชเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ปริมาตรเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้เวลาการก่อตัวระยะต้นเพิ่มมาก

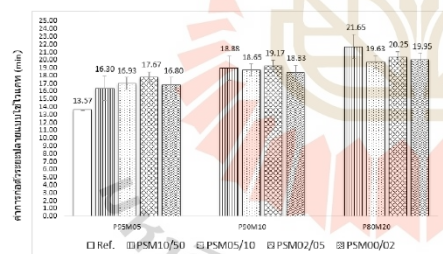


ชั้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การก่อตัวระยะต้นของชั้นตัวอย่าง

เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ยังส่งผลให้เวลาการก่อตัวระยะปลายของอิมพริซึมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำ (Ref.) กล่าวคือเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์จะหน่วงปฏิกิริยารีโอะเรชันในการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4

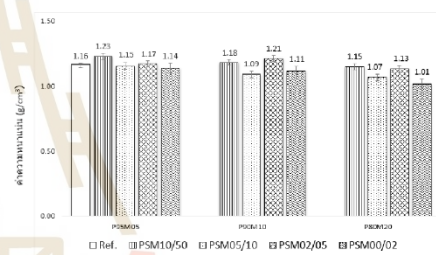


รูปที่ 4 การก่อตัวระยะปลายของชั้นตัวอย่าง

3.2 ความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นชั้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ ที่ผ่านการอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชั้นตัวอย่างลดลงมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมด้วยขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เล็กลง ในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ลงในกระบวนการผลิตแผ่นอิมพริซึมจะสามารถช่วยลดน้ำหนักของแผ่นอิมพริซึมได้ก็ต่อเมื่ออบเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ให้เป็นผลละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีค่าลดลง



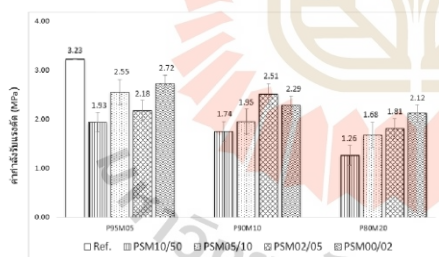
รูปที่ 5 ความหนาแน่นของชั้นตัวอย่าง

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของชั้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) โดยสัดส่วนเศษเมลามีนที่เพิ่มมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น กล่าวคือไม่สามารถปรับเปลี่ยน



โครงสร้างด้วยความร้อนได้อีก ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างปูนปลาสเตอร์และบริเวณผิวของเศษเมลามีนไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ได้ลดลง เมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์อ้างอิง อีกทั้งขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ยังมีผลต่อกำลังการรับแรงคดเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่ากำลังรับแรงคดจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีขนาดใหญ่ขึ้น สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจาก ขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เล็กกว่า จะมีผิวสัมผัสที่มากกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างส่วนเมตริกซ์ที่เป็นปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดเล็กนั้นยึดเกาะกันได้ดีกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Chaitongrat และคณะ [1]



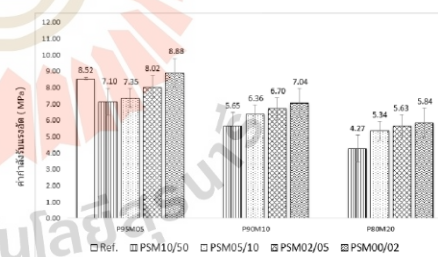
รูปที่ 6 กำลังรับแรงคดของชิ้นตัวอย่าง

จากผลการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่า ค่ากำลังรับแรงคดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ทุกสัดส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

UNE - EN 13279 - 1 : 2009 [8] ที่ต้องมีค่ากำลังรับแรงคดไม่น้อยกว่า 1.00 เมกะปาสกาล

3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) โดยสัดส่วนเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงคดมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งขนาดเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ยังส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งการลดลงของกำลังรับแรงอัดนั้นเกิดจากสาเหตุเดียวกันกับการลดลงของกำลังรับแรงคด กล่าวคือพื้นที่ผิวสัมผัสในการยึดเกาะระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีผลทำให้ความสามารถของกำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง

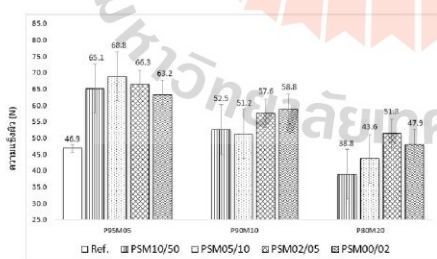
จากผลการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีน



ฟอร์มาลดีไฮด์ทุกสัดส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE - EN 13279 - 1 : 2009 [8] ที่ต้องมีค่าลึกลับรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.00 เมกะปาสกาล

3.5 การทดสอบความแข็งผิว

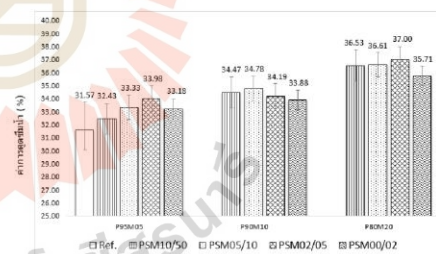
ผลการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า การผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) เนื่องจากการดูดซึมน้ำของเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวของยิปซัม ส่งผลให้ความแข็งผิวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากสัดส่วนผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มากเกินไปจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาการก่อตัวของยิปซัม ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปริมาณเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ส่วนหนึ่งนี้อาจมีผลต่อค่าการวัดความแข็งพื้นผิวคือพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นวัสดุรวมซึ่งไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 8 ความแข็งผิวของชิ้นตัวอย่าง

3.6 การดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า การผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง เนื่องจากเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เป็นวัสดุชอบน้ำที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 5.6 จากเหตุผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมของเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย อีกทั้งยังพบว่า ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำของทุกชิ้นทดสอบมีค่าการกระจายตัวของข้อมูล (Error value bar) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดอนุภาคของเสมวลามีน ไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเสมวลามีนฟอร์มาลดีไฮด์อย่างมีนัยสำคัญ



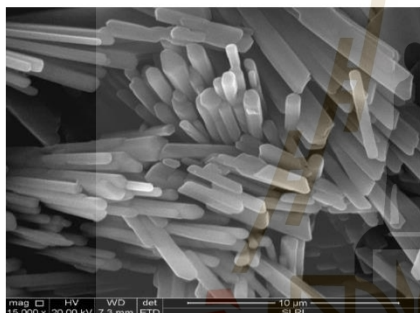
รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่าง

3.7 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายผิวกะเทาะ (Fractured surface) ของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) ด้วยกล้องอิเล็กตรอน



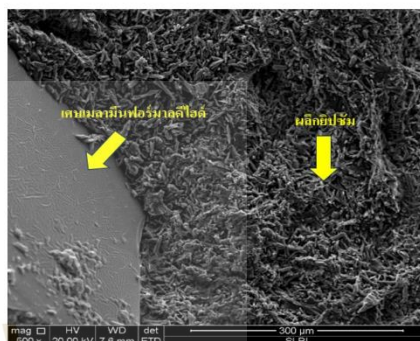
แบบส่องกราด พบว่าภายหลังจากปูนปลาสเตอร์ผสมกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีจากแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) เกิดเป็นผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือที่เรียกว่า ยิปซัม ขยายตัวเป็นรูปเข็ม (Viscart Needle) เรียงไขว้เกาะกัน แสดงดังรูปที่ 10 และการแทรกตัวของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในเนื้อของยิปซัมที่เกิดการขยายตัวเต็มที่จนเกิดการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ภาพขยายปูนปลาสเตอร์ด้วย SEM (15,000X)

ขณะที่ภาพถ่ายผิวกะเทาะ (Fractured surface) ของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาด PSM10/50 ที่สัดส่วนผสม P95M05 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 11 และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องสว่าง (Optical Microscope ; OM) ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์สามารถแทรกตัวในเมตริกซ์ที่เป็นปูนปลาสเตอร์ได้ แต่เนื่องจากผลึกของปูนปลาสเตอร์ที่เป็นรูปเข็ม ทำให้การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์กับปูนปลาสเตอร์ไม่แข็งแรง เป็นผลให้

ค่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 11 ภาพขยายชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ด้วย SEM (500X)



รูปที่ 12 ภาพขยายชิ้นงานภาคตัดขวาง (Cross section) ของตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ PSM05/10 ที่สัดส่วนผสม P90M10 ด้วย Optical Microscope (50X)



4. บทสรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยารีโไฮเดรชันของยิปซัม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ส่งผลให้ปฏิกิริยารีโไฮเดรชันระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำบริเวณผิวเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เกิดการหน่วงขึ้น กล่าวคือการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยารีโไฮเดรชันของยิปซัม

ด้วยเหตุที่เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น กล่าวคือไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยความร้อนได้อีก ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างปูนปลาสเตอร์และบริเวณผิวของเศษเมลามีนไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ลดลง เมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์อ้างอิง

การดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวของยิปซัม ส่งผลให้ความแข็งแรงผิวของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ผลของการศึกษาในครั้งนี้สามารถกล่าวได้ว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยารีโไฮเดรชันของยิปซัม สามารถลดต้นทุนการใช้สารหน่วงและช่วยทำให้เครื่องผสมปูนสะอาดขึ้นจากการขัดเศษปูนแข็งที่เกาะภายในเครื่องได้นอกจากนั้นยัง

การปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงพื้นผิวของยิปซัมที่ตีขึ้นได้วัสดุรวมชนิดใหม่ที่ยังรับแรงกระทำทั้งแรงดัดและแรงอัดได้ตามค่ามาตรฐาน UNE - EN 13279 - 1 : 2009 ที่ใช้อ้างอิง เป็นไปตามแนวทางของอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมที่ต้องการลดต้นทุนการผลิตแต่ยังได้สินค้าที่มีคุณภาพไปแข่งขันด้านราคาได้ ที่สำคัญยังเป็นการนำเศษวัสดุที่รีไซเคิลไม่ได้กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์อีกครั้ง โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในภาพรวมคือ อัตราส่วนปูนปลาสเตอร์ร้อยละ 90 ต่อเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยเศษเมลามีนที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร สามารถนำมาใช้ได้และยังคงให้ค่าคุณสมบัติทางกลและกายภาพที่ดี ทั้งนี้ไม่แนะนำให้ใช้ส่วนผสมของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ และขนาดที่ใหญ่กว่า 1,000 ไมโครเมตร เพราะจะทำให้คุณสมบัติการยึดเกาะของวัสดุรวมต่ำลงเป็นเหตุให้ค่าการรับแรงต่าง ๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ต้องการของแผ่นยิปซัมหายไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chaitongrat, "Influence of Melamine Formaldehyde Waste on Mechanical Properties of Lightweight Concrete", Doctor of Philosophy Thesis, School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand, 2016.
- [2] A. J. Rivero, A. G. Bázquez and J. G. Navarro, "New composite gypsum plaster - ground waste rubber coming from pipe foam insulation", Construction and Building Materials 55, 2014, pp. 146 - 152.
- [3] Y. Ding, Y. Fang, H. Fang, Q. Zhang, F. Zhang and W. C. Oh, "Study on the Retarding Mechanism



and Strength Loss of Gypsum from Hydrolyzed Wheat Protein Retarder”, *Journal of the Korean Ceramic Society* Vol. 52, No. 1, 2015, pp. 28 - 32.

[4] M. Mahai, “Mechanical Properties of Recycled Material from Waste Melamine at Various Compositions formed by Hot Molding and Cold Molding Processes”, Master Thesis, School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology, Thailand, 2012.

[5] UNE - EN 13279 - 2 : 2006, “Gypsum Binders and Gypsum Plasters — Part 2 : Test Methods” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, Spain, 2006.

[6] A.A. Khalila, A. Tawfika, A.A. Hegazy, M.F. El-Shahatb, “Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites”, *Construction and Building Materials* 68, 2014, pp. 580 – 586.

[7] S. Serrano, C. Barreneche, A. Navarro, L. Haurie, A. I. S. Fernandez and L. F. Cabeza, “Study of Fresh and Hardening Process Properties of Gypsum with Three Different PCM Inclusion Methods”, *Materials* 8, 2015, pp. 6589 – 6596.

[8] UNE - EN 13279 - 1 : 2009, “Gypsum Binders and Gypsum Plasters — Part 1: Definitions and Requirements” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, Spain, 2009.

[9] ASTM. Standard methods for physical testing of gypsum, C472-499; 2009.

[10] ASTM. Standard specification for gypsum board, C1396 / C1396M – 17; 2017.

ประวัติผู้เขียน

นายบรรเทง จุนใจ เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่อำเภอคำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นบุตรของนายเส็น จุนใจ และนางลำปาง จุนใจ ซึ่งประกอบอาชีพเกษตรกรทำนา มีพี่น้องทั้งหมด 5 คน (รวมผู้เขียน) ปัจจุบัน (กรกฎาคม พ.ศ. 2563) สมรส และมีบุตรสาว อายุ 5 ขวบ 1 คน ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนคำม่วงจรัสวิทย์ และมีธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนคำม่วง อำเภอคำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ มีธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนถาวรานุกุล อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2543 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการพลังงาน) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557

หลังจบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งวิศวกรฝ่ายผลิตในบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สัญชาติญี่ปุ่นที่เข้ามาตั้งโรงงาน และฐานการผลิตแห่งใหม่ในนิคมอุตสาหกรรมไฮเทค (บ้านห้วย) อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ก่อนจะเปลี่ยนไปทำงานในบริษัทอื่น ๆ ในเขตอุตสาหกรรมโรจนะ อำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และโรงงานผลิตชิ้นส่วน Hard Disk Drive ในอำเภอวังน้อย อำเภอพระนครศรีอยุธยา รวมเวลาทั้งสิ้น 7 ปี ก่อนเปลี่ยนไปปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายผลิต และผู้จัดการฝ่ายผลิตในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังคัดแปรรูปที่จังหวัดกาฬสินธุ์และจังหวัดฉะเชิงเทรา ตามลำดับ จากนั้นในปี พ.ศ. 2555 ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม อำเภอหนองแค จังหวัดสระบุรี และในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2562 ได้ย้ายไปปฏิบัติงานในโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม ในตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพและเทคนิค อำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ จนถึงปัจจุบัน (กรกฎาคม พ.ศ. 2563) ระหว่างปฏิบัติงานมีโอกาสไปศึกษางานดูงานในต่างประเทศ เช่น มาเลเซีย สิงคโปร์ ญี่ปุ่น ไต้หวัน เยอรมัน อังกฤษ และอินโดนีเซีย ตามลำดับ

การเข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2557 ด้วยเล็งเห็นคุณค่าของการศึกษาที่จะสามารถต่อยอดกับอาชีพที่ทำอยู่ในปัจจุบันได้ อีกทั้งเป็นการส่งเสริมให้มีประสบการณ์ในงานวิจัยอย่างจริงจัง และมีผลงานที่เป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศได้ ทั้งนี้นับ

เป็นความสำเร็จของการศึกษาในระบบที่สูงที่สุดในชีวิตของผู้เขียน นำมาซึ่งความภาคภูมิใจและเกียรติภูมิอย่างสูงสุดเช่นกัน

ปัจจุบันผู้เขียนเป็นพนักงานประจำ ที่ปรึกษาโครงการ คอลัมน์นิสต์ ประกอบธุรกิจส่วนตัวขนาดเล็ก และเป็นวิทยากรจิตอาสารับเชิญในสถานบันการศึกษาที่สนใจให้แนะแนวทางการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย รวมไปถึงเตรียมตัวสำหรับเป็นวิทยากรบรรยายเกี่ยวกับการควบคุมการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการจัดการระบบคุณภาพ เป็นต้น

