

อิทธิพลของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันของยิปซัม

บรรเทิง จุนใจ และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุภกิจ รูปจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4422 4286 อีเมล: somsaksi@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.09.003

รับเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขเมื่อ 23 มีนาคม 2563 ตอรับเมื่อ 5 พฤษภาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 9 กันยายน 2563

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลด้วยความร้อน ปัจจุบันขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงมีการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ซึ่งเป็นวิธีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษาวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามความต้องการใช้งาน มีหลากหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือวัสดุสำหรับใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันของยิปซัม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยาการผลิตแผ่นยิปซัม พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์แบบผงที่มีขนาด <math><200, 200-500, 500-1,000</math> และ $1,000-5,000$ ไมโครเมตร ที่สัดส่วนผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของปูนปลาสเตอร์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนปลาสเตอร์ ทั้งที่ผสมและยังไม่ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์คงที่เท่ากับ 0.75 การศึกษาสมบัติต่างๆ ของงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นตัวอย่างยิปซัม อีกทั้งยังศึกษาการก่อตัวระยะต้น การก่อตัวระยะปลาย ความหนาแน่น กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงอัด ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ที่มีส่วนผสมของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ ผลการศึกษาพบว่า เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันของยิปซัม ส่งผลให้การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของยิปซัมที่ดีขึ้น การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งความสามารถของกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE-EN 13276-1: 2009

คำสำคัญ: เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ การหน่วงปฏิกิริยา วัสดุผสม ปฏิกิริยารีไฮเดรชัน ยิปซัม ปูนปลาสเตอร์



Influence of Melamine Formaldehyde Waste on Retardation of Gypsum Rehydration Reaction

Bunterngr Joonjai and Somsak Siwadamrongpong*

Department of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Supakit Rooppakhun

Department of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Chalermchai Chaitongrat

Department of Mechanical and Automotive Engineering Technology, Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus, Rayong, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 4422 4286, E-mail: somsaksi@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.09.003

Received 3 February 2020; Revised 23 March 2020; Accepted 5 May 2020; Published online: 9 September 2020

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Melamine formaldehyde waste is thermosetting plastic waste which cannot be recycled with heat. Its disposal method is landfill which is not environmentally friendly. There are some materials for Gypsum board production including retarders. Retarder is one of the important additives that retards the gypsum rehydration reaction. This research studies the influence of melamine formaldehyde waste on this reaction and how to recycle it. 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 ratio of water to plaster was 0.75. Physical and mechanical properties of gypsum specimen containing melamine formaldehyde waste powder were investigated on initial setting time, final setting time, density, flexural strength, compressive strength, surface hardness, water absorption and microstructure. The experimental results revealed that the initial setting time, final setting time, surface hardness and water absorption of the new composite material increased. Therefore, it created more retardation of gypsum rehydration reaction. The new composite had the 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

Please cite this article as: B. Joonjai, S. Siwadamrongpong, S. Rooppakhun, and C. Chaitongrat, "Influence of melamine formaldehyde waste on retardation of gypsum rehydration reaction," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 61–70, Jan.–Mar. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization Reaction) ระหว่างเมลามีนกับฟอร์มาลดีไฮด์ นิยมนำมาใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร โดยให้ความร้อนประมาณ 145–165 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 30–60 เมกะปาสกาล [1] เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น และกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มักจะเกิดเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ของเสียจำนวนมาก ในขณะที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิล (Recycle) ด้วยวิธีการหลอมละลายโดยการให้ความร้อนได้และวิธีการจัดการของเสียที่นิยมใช้วิธีฝังกลบ [2] ต้องมีค่าใช้จ่ายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว อันเนื่องมาจากอัตราการย่อยสลายตัวที่ช้าและการถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

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 โดยมีการใช้สารเติมแต่งต่างๆ หลายชนิด เพื่อให้การผลิตต่อเนื่องและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ หนึ่งในนั้นคือ “สารหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชัน” ซึ่งสารเติมแต่งนี้ จะทำให้คุณสมบัติของค่าการคงตัว ค่าการก่อตัวระยะต้น และระยะปลายเปลี่ยนแปลงไป [3]

จากการศึกษาหาวัตถุดิบที่มีศักยภาพเพียงพอการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัม พบว่าอนุภาคของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.6 [4] มีศักยภาพเพียงพอในการนำมาผสมกับปูนปลาสเตอร์เพื่อทำให้เกิดวัสดุผสม (Composite Material) ชนิดใหม่ โดยมีปูนปลาสเตอร์เป็นส่วนของเมทริกซ์ (Matrix

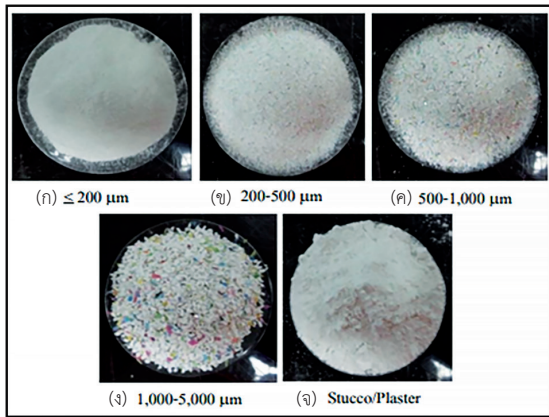
Phase) และใช้เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เป็นวัสดุเสริมแรงแบบอนุภาค (Particle-reinforced Composite) อีกทั้งเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ยังสามารถลดอัตราเร็วในการดูดน้ำของปูนปลาสเตอร์ หรือหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันได้ โดยเป็นตัวขัดขวางการก่อตัวของผลึกยิปซัม ในการทดลองนี้อ้างอิงการเตรียมชิ้นงานและค่ามาตรฐาน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน UNE-EN 13279-2: 2006 [5]

นักวิจัยหลายท่านได้ทดลองนำเศษวัสดุต่างๆ ทั้งจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาผสมกับปูนปลาสเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล [6] ซึ่งหากวัสดุดังกล่าวเป็นเศษวัสดุของเสียจากภาคอุตสาหกรรม [7] แล้วยิ่งจะทำให้เกิดข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์และนิเวศวิทยา ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Rivero และคณะ [2] ศึกษาการนำเศษยางฉนวนหุ้มท่อมาบดและผสมลงในปูนปลาสเตอร์สำหรับการผลิตแผ่นยิปซัม โดยหล่อเป็นแท่งตัวอย่างขนาด $40 \times 40 \times 160$ มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพตามมาตรฐาน UNE-EN 13279-1: 2009 [8] และ UNE-EN 13279-2: 2006 จากการศึกษาพบว่า แท่งตัวอย่างมีความเข้ากันได้กับเศษยาง ซึ่งมีความหนาแน่นลดลงได้มากที่สุดถึงร้อยละ 49 โดยกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ปริมาณของเศษยางที่ใช้ผสมมากที่สุดร้อยละ 7.50 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ แต่เมื่อขนาดเม็ดยางหุ้มฉนวนใหญ่มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง โดยขนาดเม็ดยางหุ้มฉนวนที่เหมาะสมคือ 4.6 มิลลิเมตร [2]

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนปลาสเตอร์หรือสตัคโก้ (Stucco) เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ และน้ำประปา โดยปูนปลาสเตอร์เป็นชนิดอะลาบาสเตอร์ (Alabaster) จากเหมืองแร่สหชาติเศรษฐกิจ อำเภอนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ ที่ผลิตในวันและเวลาเดียวกัน ถูกจัดเก็บไว้ในภาชนะบรรจุที่แห้ง ปิดอย่างมิดชิด ป้องกันไม่ให้อากาศ และ



รูปที่ 1 (ก)-(ง) เศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผ่านการร่อนคัดขนาด และ (จ) ปูนปลาสเตอร์หรือสตัคโก้ (Stucco)

ความชื้นเข้าถึงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 (จ)

เศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบผงที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ศรีไทย ซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) โดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษผงเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์และคัดขนาด

ออกเป็น <200, 200–500, 500–1,000 และ 1,000–5,000 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก)–(ง)

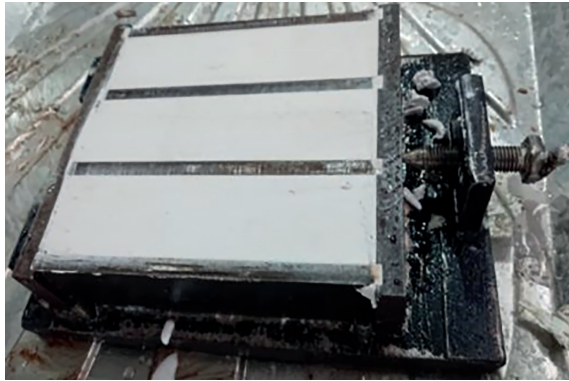
2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การทดลองผสมปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์มีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้สัญลักษณ์ดังนี้ Ref. คือ ปูนปลาสเตอร์อ้างอิง และ PSM00/02, PSM02/05, PSM05/10, PSM10/50 คือ ปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์ขนาด <200, 200–500, 500–1,000 และ 1,000–5,000 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งทุกขนาดเศษเมลามินจะถูกผสมที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ต่อเศษเมลามินเท่ากับ 95 : 05, 90 : 10 และ 80 : 20 ใช้สัญลักษณ์ P95M05, P90M10 และ P80M20 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยคงสัดส่วนน้ำต่อวัสดุผสมทั้งหมด (Water to Composite Material; W/C) มีค่าเท่ากับ 0.75 พร้อมทั้งทุกผลการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ 3 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

ขึ้นตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบคือขึ้นรูปเป็นทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 40 × 40 × 160 มิลลิเมตร สำหรับ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	ขนาดอนุภาคของเศษเมลามินฟอร์มาลดีไฮด์ (ไมโครเมตร)	สัญลักษณ์	ปูนปลาสเตอร์ หรือสตัคโก้ (ร้อยละ)	เมลามินฟอร์มาลดีไฮด์ (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 2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) และขนาด 40×40×40 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ดังแสดงในรูปที่ 2 [5]

เนื่องจากการผลิตแผ่นยิปซัมจะใช้แร่ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum) หรือยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum) ที่มีค่าความบริสุทธิ์ (Purity) มากกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป ดังนั้นสัดส่วนการผสมเศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์จะแสดงสัดส่วนการผสมที่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนปลาสเตอร์ ทั้งนี้ ได้ออกแบบและทดลองใช้เศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5,000 ไมโครเมตร และสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์แล้วพบว่า การยึดเกาะระหว่างปูนปลาสเตอร์และเศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์ไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังมีการแตกหักของชิ้นงานขณะถอดออกจากแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ขั้นตอนการผสมขึ้นตัวอย่างเริ่มจากเทส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์ตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในเครื่องผสมมอร์ต้าจนผสมกันเป็นอย่างดี จากนั้นเทน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดจนได้เนื้อตัวอย่างเหลวที่เข้ากันแล้วเทลงแบบหล่อตัวอย่างตามขนาดที่ใช้ในการทดสอบและทำการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กกลมเพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างที่เต็มแบบ จากนั้นปล่อยให้แห้งในสภาวะอุณหภูมิห้องจนเกิดการก่อตัวระยะปลายสมบูรณ์แล้วจึงแกะออกจากแบบหล่อ จากนั้นวางชิ้นงานไว้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่หรือ

เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง

2.3 การทดสอบขึ้นตัวอย่าง

การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time; IS) คือระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำ จนกระทั่งยิปซัมเริ่มก่อตัว โดยการก่อตัวระยะต้นสามารถทำให้ทราบถึงระยะเวลามากสุดในการขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาด รูปร่าง หรือความหนาตามความต้องการ อีกทั้งยังแสดงถึงพันธะการเชื่อมต่อของเนื้อยิปซัมที่สามารถยึดติดกันได้ โดยการทดสอบสามารถทำได้จากการรับน้ำหนักของเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ได้โดยเข็มจมลงในยิปซัมเป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C472-99 [9] และ ASTM C1396 [10]

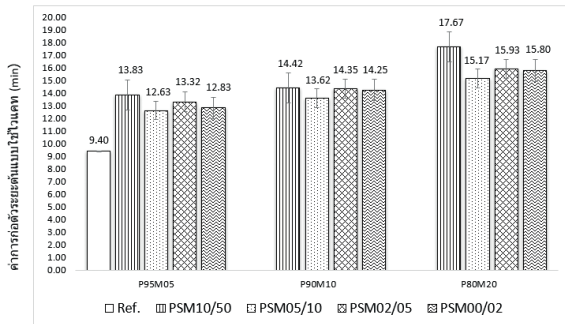
การก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time; FS) โดยใช้เข็มไวแคต (Vicat) เช่นเดียวกันกับการก่อตัวระยะต้น ซึ่งการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาจากเริ่มผสมของส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์ เศษเมลาไมนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำ จนกระทั่งเข็มไวแคตไม่สามารถเกิดการจมหรือยุบตัวเมื่อทำการปล่อยเข็ม

การทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้ชิ้นตัวอย่างรูปทรงปริซึมสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่หล่อไว้ ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้วทำการวัดขนาดและน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่องกดคอนกรีตแบบไฮดรอลิก

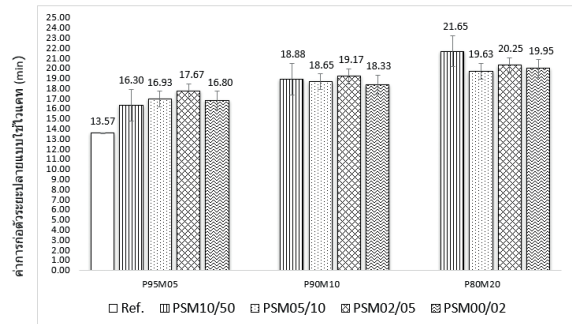
การทดสอบการดูดซึมน้ำทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 48 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักเปียก ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกจากเตาอบและปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักแห้ง ร้อยละของการดูดซึมน้ำคำนวณจากสมการที่ (1)

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

การทดสอบความแข็งของพื้นผิว (Surface Hardness) โดยใช้หัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 การก่อดั้วระยะต้นของชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 4 การก่อดั้วระยะปลายของชิ้นตัวอย่าง

กตลงบนผิวของชิ้นตัวอย่างยิปซัมด้วยแรงคงที่เพื่อหาค่าความแข็งของผิว

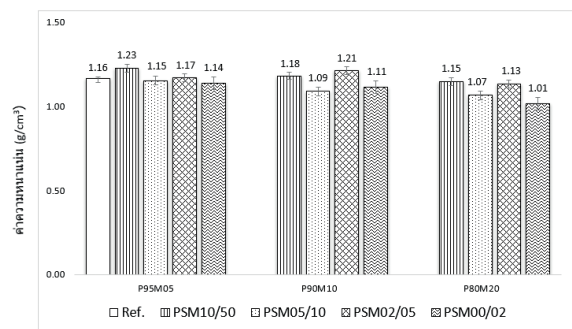
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการผสมปูนปลาสเตอร์และเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope; OM) Olympus รุ่น CX23 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM รุ่น QUANTA 450, FEI – EDS (XMax50 SDD, Oxford)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การทดสอบการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลาย

ผลการทดสอบการก่อดั้วระยะต้นของส่วนผสมปูนปลาสเตอร์ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์และน้ำพบว่า เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงถึงร้อยละ 5.6 [4] ส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำลดลง [3] เป็นผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นของยิปซัมเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะต้นเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3

เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ยังส่งผลให้เวลาการก่อดั้วระยะปลายของยิปซัมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับส่วนผสมระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำ (Ref.) กล่าวคือ เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์จะหน่วงปฏิกิริยารีไฮเดรชันในการแข็งตัวของ

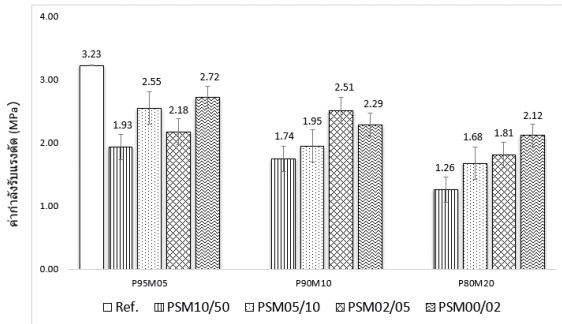


รูปที่ 5 ความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง

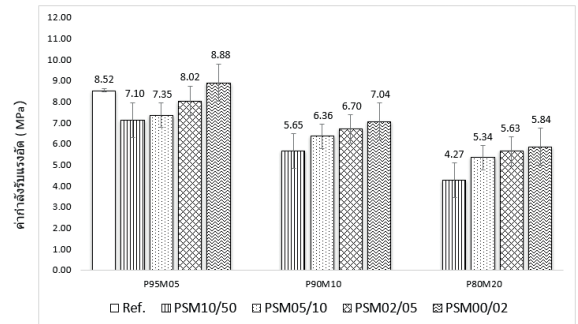
ปูนปลาสเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4

3.2 ความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ ที่ผ่านการอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างลดลงมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมด้วยขนาดของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่เล็กลง ในสัดส่วนที่มากขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ลงในกระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมจะสามารถช่วยลดน้ำหนักของแผ่นยิปซัมได้ก็ต่อเมื่อเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ให้เป็นผงละเอียดมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าลดลง



รูปที่ 6 กำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

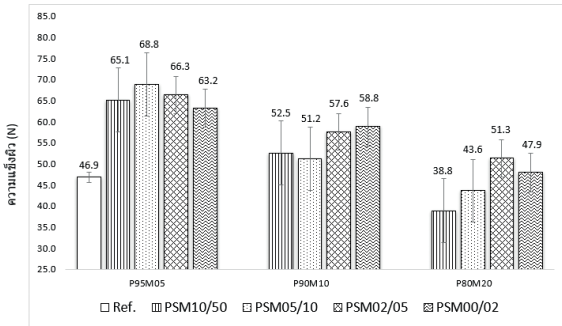
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) โดยสัดส่วนเศษเมลามีนที่เพิ่มมากขึ้นยิ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น กล่าวคือไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยความร้อนได้อีก ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างปูนปลาสเตอร์และบริเวณผิวของเศษเมลามีนไม่เต็มที่เท่าที่ควร จึงทำให้กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ได้ลดลง เมื่อเทียบกับปูนปลาสเตอร์อ้างอิง อีกทั้งขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ยังมีผลต่อกำลังการรับแรงดัดเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่ากำลังรับแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีขนาดใหญ่ขึ้น สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากขนาดของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เล็กกว่าจะมีผิวสัมผัสที่มากกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างส่วนเมทริกซ์ที่เป็นปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดเล็กนั้นยึดเกาะกันได้ดีกว่าเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเฉลิมชัย และคณะ [1]

จากผลการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่า ค่ากำลังรับแรงดัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ทุกสัดส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE-EN 13279-1: 2009 [8] ที่ต้องมีค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่า 1.00 เมกะปาสกาล

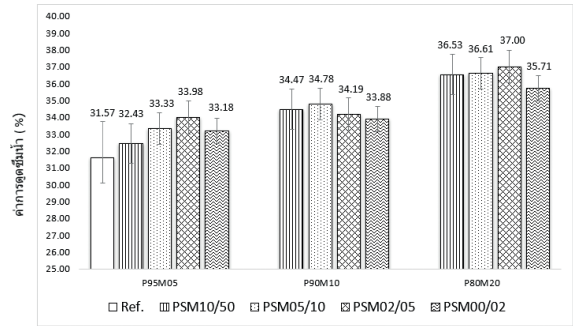
3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในปูนปลาสเตอร์ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์อ้างอิง (Ref.) โดยสัดส่วนเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งขนาดเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ยิ่งส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งการลดลงของกำลังรับแรงอัดนั้นเกิดจากสาเหตุเดียวกันกับการลดลงของกำลังรับแรงดัด กล่าวคือพื้นที่ผิวสัมผัสในการยึดเกาะระหว่างปูนปลาสเตอร์กับเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์มีผลทำให้ความสามารถของกำลังรับแรงอัดลดลง

จากผลการทดสอบสามารถกล่าวได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ทุกสัดส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน UNE-EN 13279-1: 2009 [8] ที่ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.00 เมกะปาสกาล



รูปที่ 8 ความแข็งแรงของชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่าง

3.5 การทดสอบความแข็งแรงผิว

ผลการทดสอบความแข็งแรงผิวของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนพลาสติก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอ้างอิง (Ref.) เนื่องจากการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณผิวของยิปซัม ส่งผลให้ความแข็งแรงผิวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากสัดส่วนผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มากเกินไปจะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาการก่อตัวของยิปซัม ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปริมาณเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ส่วนหนึ่งนี้อาจมีผลต่อค่าการวัดความแข็งพื้นผิวคือพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นวัสดุรวมซึ่งไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

3.6 การดูดซึมน้ำ

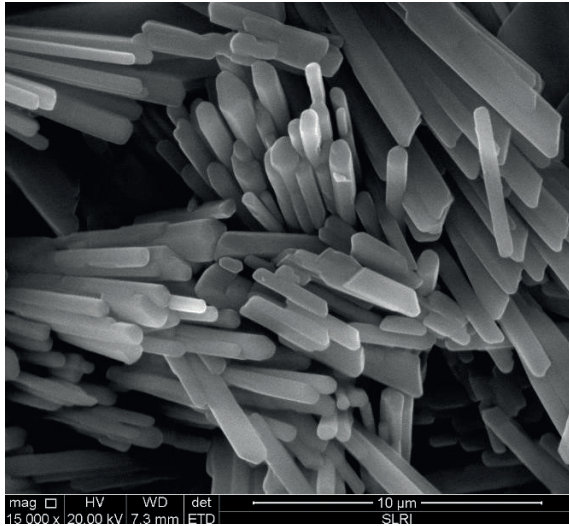
ผลการทดสอบความแข็งแรงผิวของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 9 พบว่า การผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในปูนพลาสติก ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอ้างอิง เนื่องจากเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เป็นวัสดุชอบน้ำที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 5.6 จากเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์

ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย อีกทั้งยังพบว่า ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำของทุกชิ้นทดสอบมีค่าการกระจายตัวของข้อมูล (Error Value Bar) ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดอนุภาคของเศษเมลามีนไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์อย่างมีนัยสำคัญ

3.7 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายผิวกะเทาะ (Fractured Surface) ของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกอ้างอิง (Ref.) ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ภายหลังจากปูนพลาสติกผสมกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีจากแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) เกิดเป็นผลึกของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) หรือที่เรียกว่า ยิปซัมขยายตัวเป็นรูปเข็ม (Viscart Needle) เรียงไขว้เกาะกันแสดงดังรูปที่ 10 และการแทรกตัวของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในเนื้อของยิปซัมที่เกิดการขยายตัวเต็มที่จนเกิดการแข็งตัวของปูนพลาสติก แสดงดังรูปที่ 11

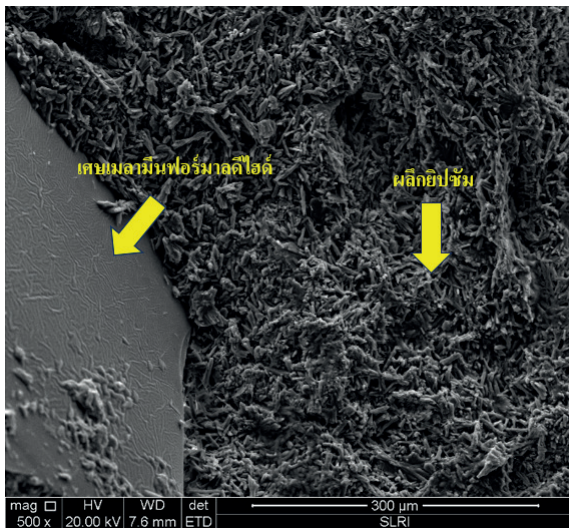
ขณะที่ภาพถ่ายผิวกะเทาะของชิ้นตัวอย่างปูนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ขนาด PSM10/50 ที่สัดส่วนผสม P95M05 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 11 และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องสว่าง (Optical Microscope; OM) ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า เศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์สามารถแทรกตัวในเมทริกซ์



รูปที่ 10 ภาพขยายป้อนพลาสติกด้วย SEM (15,000X)



รูปที่ 12 ภาพขยายชิ้นงานภาคตัดขวาง (Cross Section) ของตัวอย่างป้อนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ PSM05/10 ที่ใส่ส่วนผสม P90M10 ด้วย Optical Microscope (50X)



รูปที่ 11 ภาพขยายชิ้นตัวอย่างป้อนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ด้วย SEM (500X)

ที่เป็นป้อนพลาสติกได้ แต่เนื่องจากผลึกของป้อนพลาสติกที่เป็นรูปเข็ม ทำให้การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์กับป้อนพลาสติกไม่แข็งแรง เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของอีป็อกซี สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างป้อนพลาสติกกับน้ำบริเวณผิวเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เกิดการหน่วงขึ้น กล่าวคือการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของอีป็อกซี

ด้วยเหตุที่เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น กล่าวคือไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างด้วยความร้อนได้อีก ส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างป้อนพลาสติกและบริเวณผิวของเศษเมลามีนไม่เท่าที่ควร ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างป้อนพลาสติกผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ลดลง เมื่อเทียบกับป้อนพลาสติกอ้างอิง

การดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์สามารถช่วยลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างบริเวณ

ผิวของยิปซัม ส่งผลให้ความแข็งแรงผิวของขึ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้การดูดซึมน้ำของขึ้นตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ผลของการศึกษาในครั้งนี้สามารถกล่าวได้ว่า เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มีความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัม สามารถลดต้นทุนการใช้สารหน่วงและช่วยทำให้เครื่องผสมปูนสะอาดขึ้นจากการขัดเศษปูนแข็งที่เกาะภายในเครื่องได้ นอกจากนี้ยังการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงพื้นผิวของยิปซัมที่ดีขึ้น ได้วัสดุรวมชนิดใหม่ที่ยังรับแรงกระทำทั้งแรงดัดและแรงอัดได้ตามค่ามาตรฐาน UNE-EN 13279-1: 2009 ที่ใช้อ้างอิง เป็นไปตามแนวทางของอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นยิปซัมที่ต้องการลดต้นทุนการผลิตแต่ยังคงได้สินค้าที่มีคุณภาพไปแข่งขันด้านราคาได้ ที่สำคัญยังเป็นการนำเศษวัสดุที่รีไซเคิลไม่ได้กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์อีกครั้ง โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในภาพรวมคือ อัตราส่วนปูนปลาสเตอร์ร้อยละ 90 ต่อเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยเศษเมลามีนที่มีขนาดเล็กกว่า 1,000 ไมโครเมตร สามารถนำมาใช้ได้และยังคงให้ค่าคุณสมบัติทางกลและกายภาพที่ดี ทั้งนี้ ไม่แนะนำให้ใช้ส่วนผสมของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนปลาสเตอร์ และขนาดที่ใหญ่กว่า 1,000 เมตร เพราะจะทำให้คุณสมบัติการยึดเกาะของวัสดุรวมต่ำลงเป็นเหตุให้ค่าการรับแรงต่างๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ต้องการของแผ่นยิปซัมหายไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chaitongrat, "Influence of melamine formaldehyde waste on mechanical properties of lightweight concrete," Ph.D dissertation, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand, 2016 (in Thai).
- [2] A. J. Rivero, A. G. Báez, and J. G. Navarro, "New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation," *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 146–152, 2014.
- [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, pp. 28–32, 2015.
- [4] M. Mahai, "Mechanical properties of recycled material from waste melamine at various compositions formed by hot molding and cold molding processes," M.S. thesis, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand, 2012 (in Thai).
- [5] *Gypsum binders and gypsum plasters — Part 2 : Test methods*, UNE-EN 13279-2, 2006.
- [6] A. A. Khalila, A. Tawfika, A. A. Hegazy, and M. F. El-Shahatb, "Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 580–586, 2014.
- [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*, vol. 8, no. 10, pp. 6589–6596, 2015.
- [8] *Gypsum binders and gypsum plasters — Part 1: Definitions and requirements*, UNE-EN 13279-1, 2009.
- [9] *Standard methods for physical testing of gypsum*, ASTM. C472-499, 2009.
- [10] *Standard specification for gypsum board*, ASTM. C1396 / C1396M-17, 2017.