

Effect of recycled gypsum board as partial fine aggregate replacement on compressive strength and water absorption of mortar

ผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ชนพล ญาณวีรศักดิ์¹ กิตติศักดิ์ เทศชา² ทรงพล เหลืองบริบูรณ์³ สโรชา ชัดเจน⁴ อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒ⁵*

¹ อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

² นิสิตปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

³ นิสิตปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

⁴ นิสิตปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

⁵ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

ARTICLE INFO:

Received May 22, 2020

Received Revised Form:

June 9, 2020

Accepted: June 18, 2020

ABSTRACT:

This paper presents the effects of partial fine aggregate replacement by recycled gypsum board on density, compressive strength, and water absorption of mortar with cement paste and fine aggregate to mortar volumetric ratio of 0.5 and water to cement ratio of 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 and 0.60 by weight. The results showed that density of mortar reduced with the increase of recycled gypsum board due to its light weight. Mortar with W/C of 0.60 possessed the highest density according to sufficient water to obtain perfect compaction which was conformed to water absorption results that these mortars possessed the lowest water absorption, comparing to others. The lowest water absorption was in the range of 2.3-6.7%. Compressive strength of mortar reduced approximately 30-50% by replacing recycled gypsum board ratio of 0.2 by mortar volume. Failure type of mortar with the replacement of recycled gypsum board ratio of 0.2 or higher was ductile material with large deformation at failure point. The suitable mortar mixtures for building bricks type A with respect to TIS standard 77-2545 shall be consisted of recycled gypsum board replacement ratio of 0.1 by mortar volume with W/C of 0.45 or 0.60, so the compressive strengths were 24.6 MPa and 25.5 MPa with water absorption of 14.1% and 3.2%, respectively.

KEYWORDS: recycled gypsum board, mortar, compressive strength, density, water absorption

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่ต่อความหนาแน่น, กำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์เพสต์และมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์โดยปริมาตรร้อยละ 50 ร่วมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 และ 0.60 โดยน้ำหนัก แทนที่มวลรวมละเอียดบาง

*Corresponding Author,
Email address:
anuwat@eng.src.ku.ac.th

ส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่อัตราส่วนเท่ากับ 0.0, 0.10, 0.20 และ 0.30 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณแทนที่เศษแผ่นยิปซัมส่งผลให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมมีน้ำหนักเบา พบว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 60 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณน้ำเพียงพอให้มอร์ตาร์เข้าแบบได้อย่างสมบูรณ์ สอดคล้องกับผลทดสอบการดูดซึมน้ำซึ่งมอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าส่วนผสมอื่นโดยมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 2.3-6.7 กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมเนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมขัดขวางความต่อเนื่องของซีเมนต์เพสต์ กำลังอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30-50 เมื่อแทนที่อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัม 0.2 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่แทนที่อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไปมีลักษณะเป็นวัสดุเหนียวที่เกิดการเสียรูปมากเมื่อวิบัติ ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่เหมาะสมสำหรับอิฐก่อสร้างสามัญชั้นคุณภาพ ก ตาม มอก.77-2545 ต้องมีการแทนที่อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัม 0.1 ร่วมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 45 และ 60 โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 24.6 เมกะพาสคัล และ 25.5 เมกะพาสคัล และการดูดซึมน้ำร้อยละ 14.1 และ 3.2 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่, มอร์ตาร์, กำลังอัด, ความหนาแน่น, การดูดซึมน้ำ

1. บทนำ

ปัจจุบันมีโครงการการก่อสร้างเกิดขึ้นมากมายตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ ทำให้มีปริมาณการใช้วัสดุต่างๆ ในการก่อสร้างทั้งในส่วนของการก่อสร้างและงานสถาปัตยกรรมเพิ่มขึ้นมาก ในอีกมุมมองหนึ่งอาคารที่มีอายุการใช้งานมากหรือมีสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานเนื่องจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างมีให้พบอยู่บ่อยๆ อาคารเหล่านี้มักได้รับการปรับปรุงหรือรื้อถอนเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของเจ้าของอาคาร ทั้งการก่อสร้างใหม่และการรื้อถอนหรือปรับปรุงอาคารมักก่อให้เกิดขยะจากการก่อสร้างโดยเฉพาะเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นวัสดุเก่าหรือใหม่ซึ่งบางส่วนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ ย่อยสลายช้าและมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง เศษวัสดุจากการก่อสร้างมีหลายประเภทเช่น แผ่นยิปซัม เหล็ก เศษไม้ อิฐ คอนกรีตที่เกิดจากการทุบทำลายหรือเหลือจากการก่อสร้าง เศษแผ่นยิปซัมที่เหลือจากอุตสาหกรรมก่อสร้างมีทั้งแบบที่เป็นเศษถูกตัดทิ้งเนื่องจากแผ่นยิปซัมถูกผลิตโดยมีขนาดตามมาตรฐาน มอก.219-2552 [1] ซึ่งในการใช้งานจริงต้องมีการตัดชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดที่ต้องใช้งานตามหน้างานจริงทำให้เกิดเศษแผ่นยิปซัมบอร์ดย่อยที่ไม่สามารถใช้งานได้ แบบที่สองคือเศษแผ่นยิปซัมขยะจากรื้อถอนหรือปรับปรุงอาคาร โดยเศษยิปซัมเหล่านี้มีปริมาณมากถึง 20 ตันต่อปีต่อบริษัท การกำจัดเศษยิปซัมบอร์ดย่อยวิธีหลักๆ อยู่สองวิธีด้วยกันคือการฝังกลบและการนำมา

เข้าสู่กระบวนการหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการฝังกลบต้องใช้พื้นที่มากและขยะอาจจะได้รับการปนเปื้อน รวมถึงแผ่นยิปซัมอาจจะทำปฏิกิริยากับขยะอินทรีย์และเมื่อสัมผัสกับความชื้นที่ภาวะออกซิเจนต่ำจะเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้เกิดการระคายเคืองดวงตาและระบบทางเดินหายใจ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อชีวิตผู้คนโดยรอบพื้นที่ที่ฝังกลบอย่างมาก และอีกวิธีหนึ่งคือการกำจัดแผ่นยิปซัมโดยการนำไปหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียสเพื่อให้ยิปซัมแปลงสภาพกลายเป็นสถานะหลอมเหลวและเข้าสู่กระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมอีกครั้งซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการสูงมาก ในปัจจุบันโรงงานผลิตแผ่นยิปซัมสามารถลดต้นทุนในการนำแผ่นยิปซัมกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการบดเศษแผ่นยิปซัมเพื่อแยกส่วนที่เป็นผงยิปซัมกับกระดาดออกจากกัน และนำผงยิปซัมไปหลอมขึ้นรูปเป็นแผ่นยิปซัมอีกครั้ง ทำให้ส่วนที่ไม่ได้นำกลับไปใช้ใหม่นั้นมีส่วนผสมที่เป็นกระดาดอยู่ประมาณร้อยละ 90 และผงยิปซัมประมาณร้อยละ 10 ซึ่งเศษแผ่นยิปซัมที่ผ่านการบดนี้ต้องเข้าสู่กระบวนการกำจัดทิ้งต่อไป

จากปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นผู้วิจัยได้ตระหนักถึงปัญหาการเกิดมลภาวะต่างๆ จากกระบวนการกำจัดขยะจากเศษแผ่นยิปซัม จึงได้ศึกษาการนำเศษแผ่นยิปซัมที่ผ่านการบดเบื้องต้นจากโรงงานนำกลับมาใช้ใหม่เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยใช้แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ศึกษา กำลังอัด และการดูดซึมน้ำเพื่อ

พิจารณาความเป็นไปได้ในการนำส่วนผสมไปผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างหรือใช้ในงานสถาปัตยกรรม ซึ่งสามารถลดปริมาณขยะจากเศษแผ่นยิปซัมได้และยังทำให้เกิดการใช้งานขยะจากแผ่นยิปซัมมากขึ้นสามารถช่วยลดปัญหาต่างๆทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำยิปซัมสังเคราะห์หลายรูปแบบมาผสมกับมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.9 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 14.55 เมกะพาสคัล เมื่อใช้ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดกลืนน้ำร้อยละ 9.6 มีความหนาแน่น 1,983 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [2] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้อัตราส่วนยิปซัมต่อปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันต่อความชื้นเหลวและระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ [3] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมลงในคอนกรีตส่งผลให้ความชื้นเหลวลดลงเนื่องจากยิปซัมมีสมบัติการดูดน้ำสูงและมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น มีการศึกษาผลกระทบของยิปซัมสังเคราะห์ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ที่จะนำไปใช้สำหรับอิฐประดับ [4, 5] ตามมาตรฐาน มอก. 168-2546 [6] พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซัมสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 1:2:4 ร่วมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.50 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 6.48 เมกะพาสคัล และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับ 10.31 เปอร์เซ็นต์ โดยการบ่ม 5 ชั่วโมง ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐประดับ มอก. 168-2546 [6] จากนั้นผสมมอร์ตาร์ด้วยอัตราส่วนผสมดังกล่าวมาผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกปูถนนขนาด 190 x 90 x 65 มม. พบว่าคอนกรีตบล็อกปูถนนผสมยิปซัมสังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 5.39 เมกะพาสคัล ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดจากการบ่ม 5 ชั่วโมง เท่ากับ 14.62 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อิฐประดับ มอก. 168-2546 ชั้นคุณภาพ ก.

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่สภาวะแข็งตัวโดยการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens) [7] และการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทดสอบด้วยมอร์ตาร์อายุ 28 วัน ขนาด 5x5x5 ซม. วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรม

คอนกรีตและอุตสาหกรรมก่อสร้างทั่วไป โดยเศษแผ่นยิปซัมได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน)

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เศษแผ่นยิปซัมได้รับมาจากโรงงานผลิตแผ่นยิปซัมที่ผ่านการบดโดยมีสัดส่วนกระดาษต่อผงยิปซัมโดยประมาณเท่ากับ 9:1 เศษแผ่นยิปซัมที่ได้รับจะนำไปใช้โดยไม่มีการคัดแยกหรือคัดขนาดเนื่องจากผู้วิจัยตั้งใจจะประยุกต์ใช้เศษวัสดุนี้ตามสมบัติและลักษณะที่ได้จากโรงงาน โดยเศษกระดาษที่ได้มาจากเศษแผ่นยิปซัมมีขนาด 5-15 มม. ลักษณะของเศษแผ่นยิปซัมแสดงดังรูปที่ 1 วัสดุอื่นที่นำมาผสมรวมกันได้แก่ น้ำ, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ที่สามารถหาได้ทั่วไปในประเทศไทย สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะเศษแผ่นยิปซัมที่ได้จากโรงงาน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของทรายและเศษพลาสติกใช้ในการทดสอบ

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555
น้ำ	น้ำประปาทั่วไป
เศษแผ่นยิปซัม	กระดาษขนาด 5-15 มม. ความถ่วงจำเพาะ 1.02
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.62, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4

2.2 ส่วนผสมมอร์ตาร์

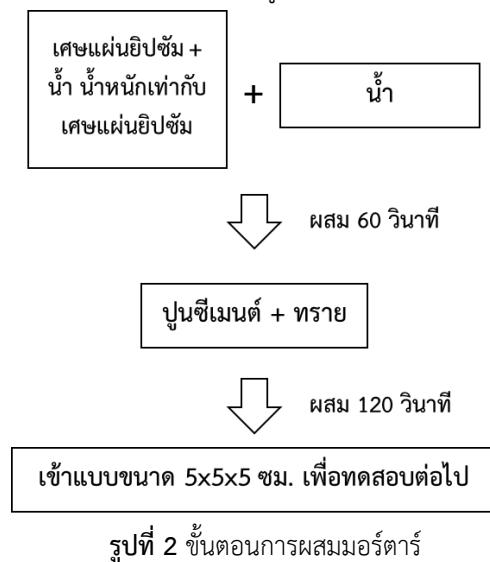
ส่วนผสมมอร์ตาร์มีทั้งหมด 20 ส่วนผสม โดยมีอัตราส่วนที่คงที่คืออัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m) และอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์เท่ากับ 0.50 เท่ากัน โดยปริมาตร ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 0.35, 0.40,

0.45, 0.50, 0.55 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ปริมาณแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัมนั้นใช้อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์ (g/m) ทั้งหมด 4 ค่าคือ 0, 0.10, 0.20 และ 0.30 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ เพื่อศึกษาปริมาณสูงสุดที่เป็นไปได้ในการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัม

2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์เริ่มจากเตรียมเศษแผ่นยิปซัมด้วยการเติมน้ำปริมาณน้ำหนักเท่ากับเศษแผ่นยิปซัมที่ใช้เพื่อลดการดูดซึมน้ำจากส่วนผสม จากนั้นผสมเศษแผ่นยิปซัมที่เตรียมไว้แล้วและน้ำในเครื่องผสมขนาด 2 ลิตร ผสมเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นเติมปูนซีเมนต์และทรายลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 120 วินาที สุดท้ายเทส่วนผสมลงแบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม. เพื่อนำไปบ่มสำหรับการทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำต่อไป

ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 2



2.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

การทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทดสอบเมื่อมอร์ตาร์อายุ 28 วันตามมาตรฐาน มอก.243-2520 วิธีชักตัวอย่างและทดสอบอิฐและอิฐกลวง [7] ตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง บันทึกค่าน้ำหนักแห้งของมอร์ตาร์แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สุดท้ายนำตัวอย่างขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าแล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้เสร็จภายใน 3 นาทีบันทึกค่าน้ำหนักเปียกของมอร์ตาร์

2.5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จแล้วตัวอย่างจะถูกถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และนำไปบ่มในน้ำประปาสะอาดเพื่อทดสอบ

กำลังอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตัวอย่างถูกนำขึ้นจากสถานที่บ่มเป็นเวลา 1 ชั่วโมง วัดขนาดและชั่งน้ำหนักจากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens) [8] โดยแต่ละอายุทดสอบใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์จำนวน 3 ตัวอย่าง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดสอบที่ได้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยในหัวข้อที่ 2 สามารถอภิปรายผลการทดสอบค่าความหนาแน่น, กำลังอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมได้ดังนี้

3.1 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ทดสอบด้วยมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างโดยเป็นชุดตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน ผลการทดสอบของทุกชุดตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3 เห็นได้ชัดว่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมในทุกส่วนผสมที่มี W/C ต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อส่วนผสมมีค่า W/C มากขึ้นเนื่องจากปริมาณช่องว่างที่เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มปริมาณน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชุดตัวอย่างที่แทนที่เศษแผ่นยิปซัมเท่ากับ 0.1 พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอาจมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างที่มีความคลาดเคลื่อน แต่ค่าความหนาแน่นดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยความหนาแน่นเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมเท่ากัน (เฉลี่ยจากส่วนผสมที่มีค่า W/C 0.40-0.60) มีค่าเท่ากับ 2060.5, 1862.7, 1574.4 และ 1355.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัมเท่ากับ 0.0, 0.1, 0.2 และ 0.3 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชุดตัวอย่างที่มีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.1-0.3 โดยปริมาตรมอร์ตาร์พบว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.6 มีค่าสูงกว่าส่วนผสมที่มีค่า W/C 0.40-0.55 เนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมเป็นเศษกระดาซึ่งต้องการปริมาณน้ำมากในการเข้าแบบ ค่า W/C 0.6 เป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้มอร์ตาร์เข้าแบบได้ดี ส่วนผสมอื่นที่มีค่า W/C 0.40-0.55 อาจมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอในการชดเชยต่อเศษแผ่นยิปซัม

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัย (กก./ลบ.ม.) และค่าการไหลแผ่

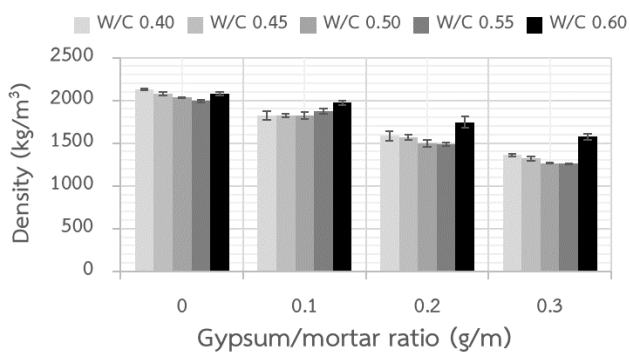
W/C (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก)	p/m (อัตราส่วนโดยปริมาตร)	s/m (อัตราส่วนโดยปริมาตร)	g/m (อัตราส่วนโดยปริมาตร)
0.40	0.50	0.50	0.0
		0.40	0.10
		0.30	0.20
		0.20	0.30
0.45		0.50	0.0
		0.40	0.10
		0.30	0.20
		0.20	0.30
0.50		0.50	0.0
		0.40	0.10
		0.30	0.20
		0.20	0.30
0.55		0.50	0.0
		0.40	0.10
		0.30	0.20
		0.20	0.30
0.60		0.50	0.0
		0.40	0.10
		0.30	0.20
		0.20	0.30

*W/C คืออัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

*p/m คืออัตราส่วนซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์โดยปริมาตร

*s/m คืออัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์โดยปริมาตร

*g/m คืออัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์โดยปริมาตร



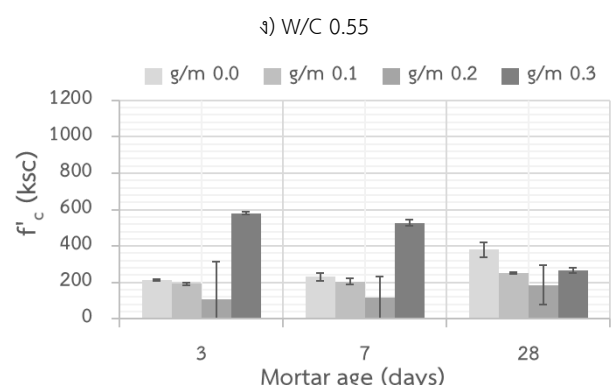
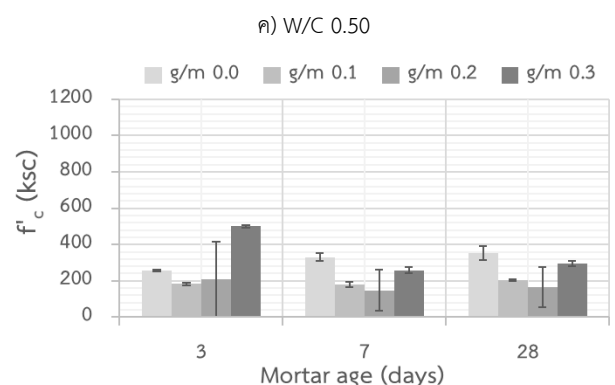
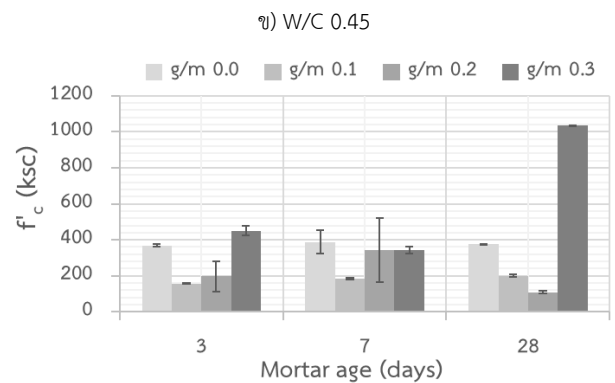
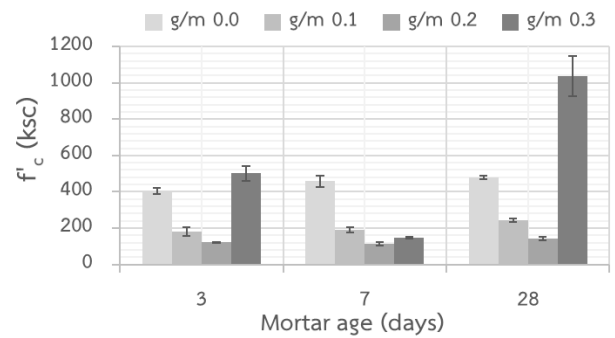
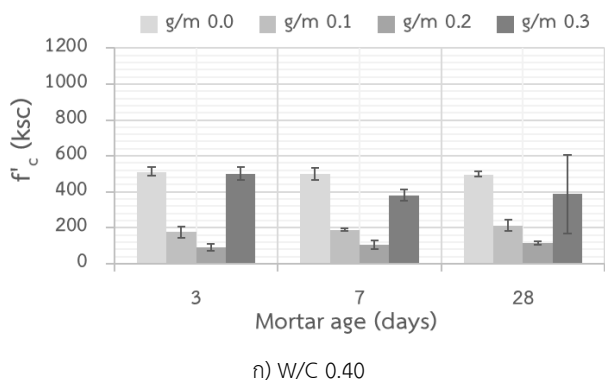
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม

3.2 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทดสอบที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน โดยรูปที่ 4 ก), ข), ค), ง) และ จ) แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ หากพิจารณาในภาพรวมแล้วพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เศษยิปซัมจาก 0.0 ไปถึง 0.20 โดยปริมาตรมอร์ตาร์เนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมมีลักษณะเป็นกระด้างจึงทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยการนำผงยิปซัมและเศษแผ่นยิปซัมมา

เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์ในปี 2019 [10] นอกจากนี้กระดาษยังกระจายทั่วส่วนผสมทำให้มอร์ตาร์มีความไม่ต่อเนื่อง กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมากร้อยละ 50-60 จากประมาณ 400 ksc ถึง 200 ksc สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C 0.40-0.50 ขณะที่กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 20-40 จากประมาณ 300 ksc ถึง 200 ksc สำหรับมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C 0.55-0.60 ค่ากำลังอัดของทุกตัวอย่างมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 3

นอกจากนี้พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเศษแผ่นยิปซัมและผสมเศษแผ่นยิปซัม 0.1 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุมอร์ตาร์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.2-0.3 มีแนวโน้มไม่แน่นอนโดยกำลังอัดมีค่าลดลงตามอายุมอร์ตาร์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีค่า W/C 0.40 และ 0.60 ดังพบได้ในรูปที่ 4 ก) และ ง) สามารถสันนิษฐานได้ว่าส่วนผสมดังกล่าวมีกำลังอัดขึ้นอยู่กับเศษแผ่นยิปซัมเป็นหลัก อายุของซีเมนต์เพสต์จึงไม่ส่งผลมากต่อกำลังรับแรงอัดมากนัก อีกประการหนึ่งคือการบ่มด้วยน้ำทำให้ผิวรอบนอกหรือภายในมอร์ตาร์บางส่วนดูดซับน้ำไว้เนื่องจากเศษแผ่นยิปซามีลักษณะเป็นกระดาษทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดลดลงตามระยะเวลาการแช่น้ำมากขึ้น อีกแนวโน้มหนึ่งที่พบคือกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มจาก 3 วัน เป็น 7 วัน จากนั้นมีค่าเพิ่มเมื่อมีอายุ 28 วัน เมื่อมอร์ตาร์มีค่า W/C 0.45 และ 0.50 ดังที่พบได้ในรูปที่ 4 ข) และ ค) สามารถสันนิษฐานได้ว่าอัตราส่วนผสมดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมเศษแผ่นยิปซัมซึ่งตามที่ได้อภิปรายข้างต้นแล้วว่าแม้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดสูงแต่ก็เกิดการเสียรูปมากด้วยเช่นกัน ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมจากพฤติกรรมการวิบัติร่วมด้วย



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณ W/C แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.3 มีค่ากำลังอัดค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่แทนที่เศษ

แผ่นยิปซัม 0.1-0.2 ในบางชุดตัวอย่างพบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเศษแผ่นยิปซัม 0.3 มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเศษแผ่นยิปซัมเช่นชุดตัวอย่างที่มีค่า W/C 0.45-0.60 โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C 0.45-0.55 อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดประมาณ 1000 ksc ซึ่งมีค่าสูงมากและจากการสังเกตการทดสอบและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างพบว่าการวิบัติแตกต่างจากส่วนผสมอื่น โดยตัวอย่างที่มีการแทนที่เศษยิปซัมปริมาณโดยอัตราส่วน 0.3 มอร์ตาร์เกิดการเสียรูปมากแต่ยังสามารถรับแรงได้อยู่โดยเครื่องทดสอบดำเนินการได้ปกติ สามารถกล่าวได้ว่าลักษณะการวิบัติของมอร์ตาร์เปลี่ยนไปเมื่อมีปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมในปริมาณมากทำให้มอร์ตาร์มีความเปราะลดลงดังรูปที่ 5 ง) สำหรับกรณีที่มีมอร์ตาร์ไม่มีการแทนที่ด้วยเศษแผ่นยิปซัมหรือมีการแทนที่ 0.1-0.2 (รูปที่ 5 ก), ข), ค)) มอร์ตาร์ยังมีความเปราะจึงวิบัติเมื่อตัวอย่างเกิดการเสียรูปไม่มากเมื่อวิบัติ ลักษณะการวิบัติของมอร์ตาร์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5 ดังนั้นการนำส่วนผสมที่มีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมในปริมาณมากไปประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างอาจไม่เหมาะสมกับโครงสร้างที่ยอมให้เกิดการเสียรูปได้น้อยหรือไม่ยอมให้เกิดการเสียรูปเช่น นำไปผลิตเป็นอิฐปูพื้นถนน เป็นต้น แต่อาจเหมาะสมกับวัสดุตกแต่งเชิงสถาปัตยกรรมที่มีความสวยงามในปัจจุบัน



ก) g/m 0.0



ข) g/m 0.1



ค) g/m 0.2



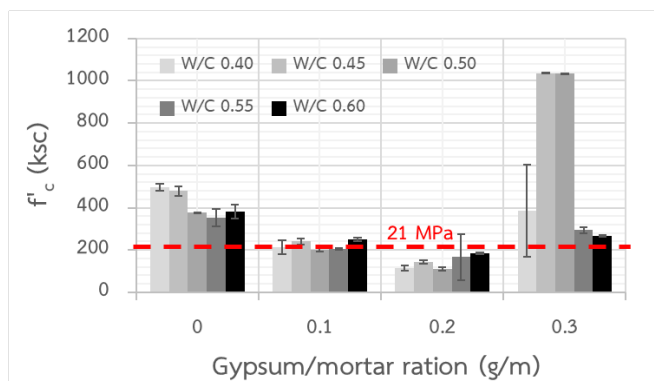
ง) g/m 0.3

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณ W/C ต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของมอร์ตาร์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 6 หากพิจารณาอายุของมอร์ตาร์ 28 วัน สำหรับการใช้งานร่วมกับค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐก่อสร้างสามัญชั้นคุณภาพ ก ตามมาตรฐาน มอก.77-2545 [9] ดังตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์มีกำลังอัดมากกว่า 21 เมกะพาสคัล โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 24-100 เมกะพาสคัล สำหรับทุกค่า W/C เมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.3 โดยปริมาตรมอร์ตาร์อย่างไรก็ดีพบว่า การแทนที่ปริมาณดังกล่าวทำให้ตัวอย่างเกิดการเสียรูปมาก ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อผนังหรืออิฐ สำหรับปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.2 ไม่มีส่วนผสมใดผ่านชั้นคุณภาพ ก โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 12-16 เมกะพาสคัล แต่พบว่ามอร์ตาร์มีกำลังอัดใกล้เคียงกับอิฐชั้นคุณภาพ ก เมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.1 โดยปริมาตรมอร์ตาร์โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 20-26 เมกะพาสคัล โดยมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดมากกว่า 21 เมกะพาสคัล ต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.45 และ 0.60 ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดเท่ากับ 24.6 เมกะพาสคัล และ 25.5 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับอิฐก่อผนังตามมาตรฐาน มอก.77-2545 [9] ทั้งนี้ทั้งนั้นจำเป็นต้องพิจารณาอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุร่วมด้วยซึ่งอภิปรายในหัวข้อ 3.3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

W/C (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก)	s/m (อัตราส่วนโดยปริมาตร)	g/m (อัตราส่วนโดยปริมาตร)	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
			3 วัน	7 วัน	28 วัน
0.40	0.50	0.0	508.3	500.0	496.6
	0.40	0.10	175.0	188.3	212.6
	0.30	0.20	91.6	105.0	115.0
	0.20	0.30	501.6	381.6	386.6
0.45	0.50	0.0	405.0	458.3	480.0
	0.40	0.10	181.6	188.3	241.6
	0.30	0.20	121.3	113.3	143.3
	0.20	0.30	501.6	146.6	1036.6
0.50	0.50	0.0	368.6	388.3	376.6
	0.40	0.10	157.6	185.6	200.0
	0.30	0.20	196.6	341.6	109.3
	0.20	0.30	450.0	343.3	1033.3
0.55	0.50	0.0	256.6	330.0	353.3
	0.40	0.10	183.3	179.6	204.3
	0.30	0.20	206.6	148.3	166.0
	0.20	0.30	500.0	258.3	295.0
0.60	0.50	0.0	212.0	231.0	380.0
	0.40	0.10	191.6	205.6	250.6
	0.30	0.20	107.3	117.3	186.0
	0.20	0.30	579.6	526.3	265.6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณ W/C แตกต่างกัน

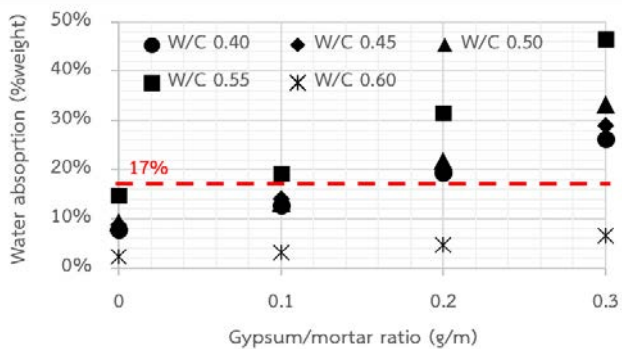
ตารางที่ 4 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัดต่ำสุด (เมกะพาสคัล)	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	21.0	17.0
ข	17.0	15.0
ค	10.0	9.0

3.3 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ต่อปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม

การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ทุกตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 7 สามารถพบได้ชัดเจนว่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มีค่ามากขึ้นตามปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมที่มากขึ้นเนื่องจากเศษแผ่น

ยิปซัมเป็นกระดาชจึงดูดซึมน้ำได้ดีระหว่างการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นอีกประการหนึ่งเนื่องจากปริมาณน้ำมากทำให้เกิดโพรงในมอร์ตาร์มากไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด ซึ่งจากสมมติฐานควรจะมีค่ามากที่สุดโดยมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 2.3, 3.2, 4.7 และ 6.7 เมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ตามลำดับ อาจสามารถอธิบายได้ว่ามอร์ตาร์มีปริมาณน้ำสูงเพียงพอให้สามารถเข้าแบบได้แน่นเป็นอย่างดีทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในมอร์ตาร์ระหว่างบ่มได้น้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดตัวอย่างนี้มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด มีความทึบสูงน้ำจึงซึมผ่านเข้าไปได้น้อยเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม (g/m) แตกต่างกัน

หากพิจารณาส่วนผสมทั้งหมดเพื่อนำไปใช้เป็นอิฐก่อสร้างสามัญตามมาตรฐาน มอก.77-2545 [9] ต้องพิจารณาการดูดซึมน้ำร่วมกับความต้านทานแรงอัดตามตารางที่ 4 โดยการดูดซึมน้ำที่ยอมให้แสดงดังตารางที่ 5 โดยจากผลทดสอบกำลังอัดพบว่าสามารถแทนที่เศษแผ่นยิปซัมได้มากที่สุดเท่ากับ 0.1 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ และต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 และ 0.60 ซึ่งทั้งสองส่วนผสมมีอัตราส่วนการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 17 โดยมีค่าร้อยละ 14.1 และ 3.2 ตามลำดับ ผ่านมาตรฐานอิฐก่อสร้างสามัญชั้นคุณภาพ ก

ตารางที่ 5 การดูดกลืนน้ำสูงสุดของอิฐตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 [9]

ชั้นคุณภาพ	การดูดกลืนน้ำสูงสุด (%)	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	17.0	20.0
ข	22.0	25.0
ค	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ได้จากการทดสอบความหนาแน่น, กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้;

1. ความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมที่มากขึ้นเนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมเป็นกระดาชมีน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.60 มีความหนาแน่นมากที่สุดเนื่องจากปริมาณน้ำมากทำมอร์ตาร์เข้าแบบได้อย่างสมบูรณ์เกิดรูพรุนเนื่องจากการเข้าแบบน้อย

2. กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมมากขึ้นเนื่องจากกระดาชขัดขวางความต่อเนื่องของซีเมนต์เพสต์ภายในมอร์ตาร์ โดยเมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.2 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 50 และ 30 สำหรับส่วนผสมที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.40-0.50 และ 0.55-0.60 ตามลำดับ

3. ลักษณะการวิบัติของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่เศษแผ่นยิปซัมตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไปโดยปริมาตรมอร์ตาร์มีลักษณะของวัสดุเหนียวที่เกิดการเสียรูปหรือการยุบตัวมากเนื่องจากเศษแผ่นยิปซัมด้านในจึงไม่เหมาะสมหากนำส่วนผสมนี้ไปผลิตเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ยอมให้เกิดการเสียรูปได้น้อยหรือไม่ยอมให้เกิดการเสียรูป

4. การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เศษแผ่นยิปซัมที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากกระดาชดูดซึมน้ำได้ดีระหว่างบ่มตัวอย่าง อย่างไรก็ตามพบว่า การดูดซึมน้ำมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0.60 เนื่องจากมีปริมาณน้ำเพียงพอให้มอร์ตาร์สามารถเข้าแบบได้อย่างสมบูรณ์ เกิดช่องว่างเนื่องจากการเข้าแบบน้อยมาก สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นที่ชุดตัวอย่างนี้มีค่ามากที่สุด

5. หากพิจารณานำมอร์ตาร์จากงานวิจัยนี้ไปผลิตเป็นอิฐก่อสร้างสามัญชั้นคุณภาพ ก ตามมาตรฐาน มอก.77-2545 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เศษแผ่นยิปซัม 0.1 โดยปริมาตรมอร์ตาร์เนื่องจากยังมีลักษณะเป็นวัสดุเปราะเหมือนอิฐ ประกอบกับอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.45 และ 0.60 เนื่องจากมีกำลังอัดเท่ากับ 24.6 เมกะพาสคัล และ 25.5 เมกะพาสคัล ตามลำดับ มากกว่า 21 เมกะพาสคัล อีกทั้งยังมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 14.1 และ 3.2 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่าที่ยอมให้คือร้อยละ 17

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนเศษแผ่นยิปซัมที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบบูรณาการประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] TIS 219-2552, TIS Standard for Gypsum Plasterboard, TIS Standard, 2009.
- [2] A. Kongsitthanakorn, P. Sangkakrit and W. Damparnat, "A Study on Possibility of Using Synthesis Gypsum for Paving Blocks," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology., KMUTNB, 2003. (in Thai)
- [3] J. Sriwichai, S. Chareonsukkho, A. Chaayasith, S. Kongsomsaksiri, and N. Yamoth, "Effects of Synthesis Gypsum in Concrete," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology., KMUTNB, 2005. (in Thai)
- [4] T. Cholatarn, T. Klubprasith, W. Permrith, S. Kongsomsaksiri, and N. Yamoth, "Effects of Water Content on Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology., KMUTNB, 2004. (in Thai)
- [5] N. Noochaya, W. Wisutchanon, S. Piyo, S. Kongsomsaksiri, and N. Yamoth, "A Development of Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum,"

Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology., KMUTNB, 2004. (in Thai)

- [6] TIS 168-2545, TIS Standard for Facing Bricks, TIS Standard, 2003.
- [7] TIS 243-2520, TIS Standard for Standard Method of Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, TIS Standard, 1977.
- [8] ASTM C109/109M-20b, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement, ASTM Standard, 2020.
- [9] TIS 77-2545, TIS Standard for Building Bricks, TIS Standard, 2002.
- [10] A. Attachaiyawuth, C. Ngamthanachot, and C. Vivatvanavong "Effects of Compressive Strength of Mortar using Recycled Gypsum as Partial Replacement Material," KMUTT Research and Development., vol. 3, pp. 247-262, Jul. 2019. (in Thai)