ผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของยิปซัมเหลือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดบางส่วน

อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ[1*] ชาญณรงค์ งามธนโชติ[2] และ ชยานันต์ วิวัฒน์วนาวงศ์[2]
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

** Corresponding Author: anuwat@eng.src.ku.ac.th*
[1] อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา และ กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง
[2] นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 4 มีนาคม 2562
แก้ไข : 25 มิถุนายน 2562
ตอบรับ : 9 กันยายน 2562

คำสำคัญ :
กำลังอัด / ผงยิปซัม / อิฐก่อผนัง / มอร์ตาร์ / ซีเมนต์เพสต์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่ในลักษณะของผงยิปซัมที่ผ่านการร่อนแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและเศษแผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อใช้เป็นอิฐก่อผนัง โดยวัสดุยิปซัมเหลือใช้นี้ได้มาจากแผ่นยิปซัมจากอุตสาหกรรมก่อสร้างเพื่อเป็นการลดปริมาณการฝังกลบที่จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น จากผลการวิจัยพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงประมาณ 50% และ 70% เมื่อมอร์ตาร์มีส่วนผสมของผงยิปซัม 15% และ 30% โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงและผงยิปซัมขัดขวางการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ อย่างไรก็ตาม กำลังอัดสูงสุดเมื่อใส่ผงยิปซัมปริมาณ 30% มีค่า 382.9 กก./ซม^2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 35% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ผลการทดสอบกำลังอัด เมื่อนำแผ่นยิปซัมบดใส่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณยิปซัมมากขึ้น โดยสามารถแทนที่ยิปซัมบดมากที่สุดได้ 20% โดยปริมาตร ส่งผลให้มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 311.7 กก./ซม^2 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 50% อย่างไรก็ตาม การแทนที่แผ่นยิปซัมบดส่งผลให้มอร์ตาร์ต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นเพื่อให้มีความสามารถทำงานได้เพียงพอ โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมที่มียิปซัมบด 50% คือ 50%, 55% และ 60% ตามลำดับ มอร์ตาร์ดังกล่าวมีกำลังอัดเพียงพอสำหรับใช้เป็นผนังอาคารทั้งภายในและภายนอกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

Effect on Compressive Strength of Mortar when Using Recycled Gypsum as Partial Replacement Material

Anuwat Attachaiyawuth[1*], Channarong Ngamthanachot[2] and Chayanan Vivatvanavong[2]

Kasetsart University Sriracha Campus, Thungsukla, Sriracha, Chonburi 20230

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

[1] Lecturer, Faculty of Engineering at Sriracha and The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group

[2] Student, Faculty of Engineering at Sriracha.

Article Info

Article History:
Received: March 4, 2019
Revised: June 25, 2019
Accepted: September 9, 2019

Keywords:
Compressive Strength / Recycled Gypsum Board / Mortar Block / Mortar / Cement Paste

Abstract

This paper presents the study on the effect of using recycled gypsum powder and pulverized gypsum board on compressive strength of mortar. Gypsum powder was used as a cement replacement material while pulverized gypsum board was used as a fine aggregate replacement material.These two materials are wastes from the construction industry, which affect directly the atmosphere and environmental condition around the disposal area.The results showed that the compressive strength of mortar reduced by approximately 50-70% due to the use of the recycled powder of 15-30%. The present of gypsum powder produced cement hydration blockage, which resulted in the reduction in the compressive strength of mortar. The highest compressive strength was noted to be 382.9 ksc; the value was obtained when using 30% gypsum and the water to cement ratio and cement paste volume of 35%and 50%, respectively. This value was sufficient for general structural concrete members. In the case of mortar mixed with pulverized gypsum board, compressive strength reduced with an increase in the amount of pulverized gypsum board, which could be used up to the maximum of 20% by volume. The suitable mortar mix proportion possessed maximum compressive strength of 311.7 ksc was achieved by using the water to cement ratio of 50%. Mortar mixes required more water to maintain sufficient workability. The suitable water to cement ratio for mortar with 20% pulverized gypsum board was 50%, 55% and 60%. Such a mortar possessed sufficient compressive strength for both internal wall and external wall for building according to the Thailand Industrial Standard (TIS).

1. บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์แผ่นยิปซัมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในส่วนของงานตกแต่ง เช่น งานผนังกั้นห้องหรือฝ้าเพดานเนื่องจากแผ่นยิปซัมมีสมบัติทนความร้อนได้ดี ป้องกันเสียงได้ดีและมีน้ำหนักเบา ทำให้สามารถติดตั้งได้ง่ายสะดวกรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม แผ่นยิปซัมถูกผลิตออกมาตามขนาดมาตรฐานซึ่งในการใช้งานจริงจำเป็นจะต้องตัดเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ดังนั้นจึงมีเศษแผ่นยิปซัมเหลือใช้เป็นจำนวนมาก โดยเศษยิปซัมเหล่านี้มีปริมาณ 120 ตันต่อปีต่อบริษัทโดยประมาณ ลักษณะของแผ่นยิปซัมที่เหลือจากการใช้งานแสดงดังรูปที่ 1 วิธีการในการจัดการของเสียเหล่านี้คือการฝังกลบหรือหลอมนำกลับมาหล่อเป็นแผ่นใหม่ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การฝังกลบต้องดำเนินการตามประเภทขยะเพื่อควบคุมการปนเปื้อนและรั่วซึมของสารเคมีและต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบมาก ซึ่งถ้ากำจัดไม่ถูกวิธียิปซัมจะทำปฏิกิริยากับขยะอินทรีย์และเมื่อสัมผัสกับความชื้นที่ภาวะออกซิเจนต่ำจะสามารถพัฒนาเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งแก๊สชนิดนี้ส่งผลให้ผู้ที่สัมผัสหรือสูดดมเกิดอาการระคายเคืองดวงตาและระบบเดินหายใจ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้คนโดยรอบบริเวณนั้นๆ นอกจากนี้การนำแผ่นยิปซัมมาหลอมขึ้นรูปใหม่เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการจัดการเศษแผ่นยิปซัม โดยในขั้นตอนการเผาแผ่นยิปซัมต้องให้อุณหภูมิประมาณ 150 องศา เพื่อให้ยิปซัมแปลสภาพทางเคมีเพื่อหลอมขึ้นรูปได้ซึ่งต้องใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายมาก

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำขยะยิปซัมเหลือใช้เหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับวัสดุคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการก่อสร้างต่อไป ซึ่งจำเป็นจะต้องศึกษาสมบัติเบื้องต้นที่จำเป็นคือกำลังอัดโดยพิจารณาส่วนผสมที่มีการปรับให้เหมาะสมกับปริมาณยิปซัมที่ใส่ลงไปในมอร์ตาร์ งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะใช้เศษขยะยิปซัมเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้างประเภทอิฐสำหรับก่อผนังอาคารทั่วไปเนื่องจากยิปซัมมีสมบัติหลายประการเช่น ทนความร้อน, ป้องกันเสียง และมีน้ำหนักเบา ดังนั้นเมื่อนำมาทำเป็นอิฐก่อผนังจะสามารถช่วยให้ผนังก่ออิฐมีสมบัติที่ดีขึ้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) ซึ่งจะมีการเติบโตทั้งในส่วนของอุตสาหกรรมและที่อยู่อาศัย งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ทั้งในมิติของการลดปริมาณขยะและปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

รูปที่ 1 เศษแผ่นยิปซัมที่เหลือจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง

2. มาตรฐานอุตสาหกรรม

เพื่อกำหนดสมบัติด้านกำลังอัดของอิฐที่มีส่วนผสมของเศษยิปซัมให้เป็นไปตามมาตรฐาน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอิฐก่อผนังคือ มอก.77-2545 [1] ซึ่งกำหนดค่ากำลังอัดขั้นต่ำแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความต้านทานแรงอัดของอิฐตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 [1]

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

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาผลกระทบของวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตโครงสร้างหรืออิฐบล็อคสำหรับทำผนังทั้งชนิดทั่วไปและอิฐมวลเบา การนำวัสดุเหลือใช้มาประยุกต์ในอุตสาหกรรมคอนกรีตนอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งด้วยวิธีต่างๆ แล้ว เช่น ฝังกลบ หรือ เผา เป็นต้น ยังช่วยให้ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการลดปริมาณการใช้วัสดุตั้งต้นจากธรรมชาติโดยแทนที่วัสดุเหล่านี้ด้วยวัสดุเหลือทิ้ง งานวิจัยด้านวัสดุคอนกรีตที่ได้มีการวิจัยอย่างแพร่หลายในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์คือ จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตซึ่งคิดค้นโดย Davidovits [2] โดยใช้วัสดุที่มีอลูมินาและซิลิการ่วมกับสารอัลคาไลน์ ซึ่งสามารถหาได้จากเถ้าต่างๆ เช่น เถ้าลอยหรือเถ้าแกลบเป็นต้น ซึ่งสมบัติทางกลของคอนกรีตชนิดนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ระยะการบ่มหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม [3] หรือการใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ต่างกัน [4] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตภายใต้โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการพัฒนากำลังในสภาวะเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นคือโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียม ไฮดรอกไซด์มากขึ้น [5] ปริมาณทรายที่ใช้ส่งผลต่อคอนกรีตชนิดนี้ทั้งในแง่ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด โดยระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้น และการใช้ปริมาณทรายที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้กำลังอัดหรือกำลังดัดสูง [6] Boonserm และคณะ [7] ได้นำดินพิมายที่เป็นดินในพื้นที่ท้องถิ่นมาปรับสภาพโดยการกำจัดคาร์บอเนตและสารอินทรีย์ จากนั้นนำไปแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่แตกต่างกันใน จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต พบว่าการแทนที่ด้วย ดินพิมายปรับสภาพในปริมาณร้อยละ 50 ทำให้มีกำลังอัดใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว มีการนำมวลรวมที่ได้จากจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นมาประยุกต์ใช้ในงานวัสดุการทาง โดยนำมาเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง พบว่าเมื่อใช้มวลรวมรีไซเคิลจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบสูงขึ้นจะทำให้วัสดุมีกำลังอัดมากขึ้น เมื่อเทียบมาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทพบว่าอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบสามารถใช้ได้ร้อยละ 70-90 จะส่งผลให้วัสดุมีกำลังอัดได้มาตรฐานที่อายุ 7 วัน [8]

วัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมอื่นๆถูกนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมคอนกรีตเช่นเดียวกัน เช่นเถ้าปาล์มน้ำมัน กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้ากากตะกอนน้ำตาล หรือเถ้าชานอ้อย เป็นต้น การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันไม่เกินร้อยละ 25 ทำให้คอนกรีตมีกำลังประมาณร้อยละ 80-90 ของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่คอนกรีตจะมีความสามารถต้านทานการขัดสีและต้านทานคลอไรด์ได้มากขึ้นแม้ว่ากำลังอัดจะลดลงก็ตาม [9] และเถ้าปาล์มน้ำมันยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเถ้าดังกล่าวมีความละเอียดสูงขึ้น [10] กากแคลเซียมคาร์ไบด์ถูกนำมาศึกษาเป็นวัสดุประสานร่วมกับเถ้าลอยพบว่ามีค่าการสูญเสียการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเป็นวัสดุประสาน มีการพัฒนากำลังช้ากว่า

ในช่วงต้นแต่มีกำลังอัดมากกว่าที่อายุ 90 วัน และมีความต้านทานคลอไรด์มากกว่า โดยมีการต้านทานต่อการขัดสีใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน [11] เถ้าชานอ้อยส่งผลใกล้เคียงกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์โดยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณมากขึ้น [12] นอกจากนี้ยังมีเถ้ากากตะกอนน้ำตาลที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูลาร์ ซึ่งเถ้าชนิดนี้มีแคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักโดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก กำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากากตะกอนน้ำตาลในส่วนผสม การหดตัวและปริมาณการดูดน้ำมีค่ามากขึ้น ขณะที่การไหลดีขึ้นเมื่อใส่เถ้าชนิดนี้ในปริมาณที่เหมาะสม [13] เถ้าลอยไม่เพียงแต่ถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตเท่านั้น สำหรับงานอิฐบล็อคประสานก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้เช่นเดียวกันโดยการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมของอิฐที่มีส่วนผสมหลักคือดินเหนียวทำให้กำลังอัด, โมดูลัสการแตกร้าวและกำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ทำให้อิฐนั้นมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงซึ่งเป็นข้อดีสำหรับงานอิฐก่อผนัง [14]

ที่ผ่านมาในประเทศไทยได้มีการศึกษาสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของยิปซัมสังเคราะห์ในหลากหลายรูปแบบและสมบัติ จากการศึกษาอัตราส่วนผสมต่างๆ สำหรับมอร์ตาร์พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซัมสังเคราะห์เท่ากับ 1:2:2 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.9 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการดูดกลืนน้ำร้อยละ 9.6 มีค่าความหนาแน่น 1,983 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [15] การศึกษาสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัวและความข้นเหลวขั้นตอนก่อนที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตก็มีความสำคัญเช่นกัน โดยได้มีการศึกษาการใช้อัตราส่วนยิปซัมต่อปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันต่อสมบัติข้างต้น [16] พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยิปซัมลงในคอนกรีตส่งผลให้มีค่าความข้นเหลวลดลงเนื่องจากยิปซัมมีสมบัติดูดน้ำสูงและมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาผลกระทบของยิปซัมสังเคราะห์ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ที่จะนำไปใช้สำหรับอิฐประดับ [17, 18] ตามมาตรฐาน มอก.168-2546 [19] พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซัมสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 1:2:4 โดยจำเป็นจะต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.50 ซึ่ง มอร์ตาร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัย ที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 6.48 เมกะพาสคัล และค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดโดยการบ่ม 5 ชั่วโมง เท่ากับ 10.31 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐประดับ มอก. 168-2546 จึงนำอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังกล่าวมาอัดขึ้นรูปเป็นคอนกรีตบล็อกปูถนนผสมยิปซัมสังเคราะห์ ขนาด 190 x 90 x 65 มม. พบว่าคอนกรีตบล็อกปูถนนผสมยิปซัมสังเคราะห์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ให้ค่า กำลังรับแรงอัดประลัย เท่ากับ 5.39 เมกะพาสคัล ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดโดยการบ่ม 5 ชั่วโมง เท่ากับ 14.62 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อิฐประดับ มอก. 168-2546 ชั้นคุณภาพ ก. [19] การศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตแท่งคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของยิปซัมสังเคราะห์ร่วมกับการใช้สารกักกระจายฟองอากาศก็เป็นที่น่าสนใจ วัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมแท่งคอนกรีตเบาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ยิปซัมสังเคราะห์ที่ได้จากการดักจับก๊าซซัลเฟอร์-ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง และสารกักกระจายฟองอากาศ โดยมีการศึกษาทั้งส่วนผสมที่เติมสารกักกระจายฟองอากาศและแบบไม่เติมสารกักกระจายฟองอากาศใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อยิปซัมสังเคราะห์ที่อัตราส่วนคือ 1:6.75, 1:50, 1:40, 1:3.25, 1:2.75 และ 1:2.50 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 สารกักกระจายฟองอากาศต่อปริมาณน้ำเท่ากับ 0.10 ผลการทดลองพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการผลิตแท่งคอนกรีตเบาคือ 1:2.75 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 สารกักกระจายฟองอากาศต่อปริมาณน้ำ 0.10 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 35.4 กก./ซม2 และมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 15.23 เปอร์เซ็นต์

4. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือการศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อใช้เป็นอิฐก่อผนัง โดยอัตราส่วนผสมที่ศึกษาของมอร์ตาร์ผสมผงยิปซัมและมอร์ตาร์ผสมแผ่นยิปซัมบดแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	ซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m, %)	ปริมาณยิปซัมต่อซีเมนต์ (g/c, %)
35	50	50	0
		35	15
		20	30
40	50	50	0
		35	15
		20	30
40	55	50	0
		35	15
		20	30
40	60	50	0
		35	15
		20	30
45	50	50	0
		35	15
		20	30

* แต่ละส่วนผสมจะถูกเก็บตัวอย่างจำนวน 9 ตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ 3 วัน, 14 วัน และ 28 วัน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	ซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m, %)	ปริมาณยิปซัมต่อซีเมนต์ (g/c, %)
35	55	45	0
		35	10
		25	20
40		45	0
		35	10
		25	20
45		45	0
		35	10
		25	20
35	50	45	0
		35	10
		25	20
40		45	0
		35	10
		25	20
45		50	0
		40	10
		30	20
50		50	0
		40	10
		30	20
55		50	0
		40	10
		30	20
60		50	0
		40	10
		30	20

* แต่ละส่วนผสมจะถูกเก็บตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ 4 วันและ 28 วัน

4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

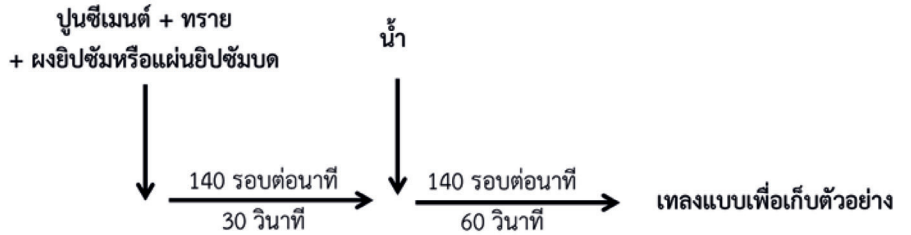
วัสดุยิปซัมที่ใช้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทผู้ผลิตแห่งหนึ่งโดยมีลักษณะเป็นผงรวมอยู่กับกระดาษจากแผ่นผนังยิปซัมที่ได้จากการนำแผ่นยิปซัมเหลือใช้มาบด และผงยิปซัมได้จากการนำเศษแผ่นยิปซัมบดนี้มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้ได้ขนาดเล็กสำหรับผสมมอร์ตาร์ต่อไป สำหรับชุดตัวอย่างที่ใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนนั้นจะใช้วัสดุในลักษณะที่ได้จากบริษัทที่ผ่านการบดแล้วผสมมอร์ตาร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำขยะเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ได้ทันที วัสดุอื่นที่นำมาผสมร่วมได้แก่ น้ำ, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทรายแม่น้ำ ที่สามารถหาได้ทั่วไปในตลาดในประเทศไทย สมบัติของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของวัสดุต่างที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุ	สมบัติ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555
น้ำ	น้ำประปาทั่วไป
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำความถ่วงจำเพาะ 2.6, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4
แผ่นยิปซัมบด	ความถ่วงจำเพาะ 1.08, ขนาดไม่แน่นอนอยู่ระหว่าง 4-8 มม.
ผงยิปซัม	ความถ่วงจำเพาะ 2.31, ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200

4.2 วิธีผสม

อัตราส่วนผสมถูกผสมด้วยวิธีและลำดับขั้นตอนที่เหมือนกันโดยวัสดุแห้ง (ปูนซีเมนต์, ทราย, ผงยิปซัมหรือแผ่นยิปซัมบด) จะถูกใส่ลงในเครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 2 ลิตร และผสมด้วยความเร็ว 140 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงใส่น้ำลงและผสมต่อด้วยความเร็วเท่าเดิมเป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจึงนำไปเทลงในแบบหล่อเพื่อเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัดต่อไป ขั้นตอนการผสมแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์

4.3 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างจะแยกเก็บเป็น 2 ชุดตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเก็บตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม. สำหรับมอร์-ตาร์ที่ใช้ผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อศึกษาผลของปริมาณผงยิปซัมต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ และเก็บตัวอย่างขนาด 140x65x40 ซม. ซึ่งเป็นขนาดอิฐมาตรฐานชั้นคุณภาพ ก [1] สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานเป็นอิฐก่อผนัง ตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกทดสอบที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน สำหรับชุดตัวอย่างขนาด 5x5x5 ซม. และทดสอบที่อายุ 3 และ 28 วันสำหรับชุดอย่างขนาด 140x65x40 ซม. ตัวอย่างถูกบ่มด้วยการแช่น้ำจนกว่าจะถึงอายุที่ทำการทดสอบ

5. ผลการทดสอบ

จากขั้นตอนการทดสอบในข้อ 4 สามารถแยกผลการทดสอบได้เป็น 2 ชุดคือกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้ผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนดังนี้

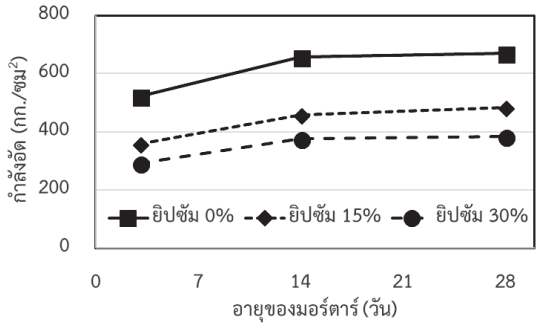
5.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้ผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. แสดงดังตารางที่ 5

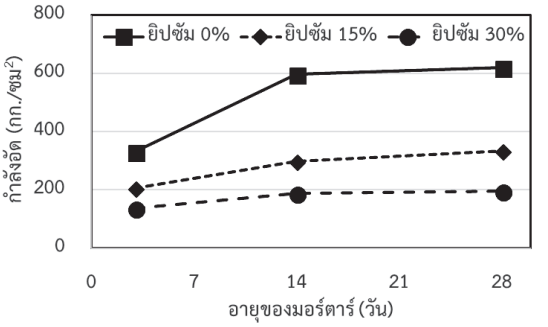
ตารางที่ 5 สมบัติของวัสดุต่างที่ใช้ในการศึกษา

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	ปริมาณยิปซัมต่อวัสดุผง (g/b, %)	กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก./ซม^2)	กำลังอัดที่อายุ 14 วัน (กก./ซม^2)	กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (กก./ซม^2)
35	50	0	523.2	657.6	669.7
		15	357.8	459.3	482.6
		30	293.3	377.1	382.9
40	50	0	332.5	596.9	619.9
		15	206.8	298.8	334.7
		30	137.9	187.5	195.8
40	55	0	475.8	619.6	633.6
		15	267.8	350.8	366.7
		30	160.4	231.7	241.2
40	60	0	458.1	657.7	711.5
		15	269.6	381.6	417.9
		30	147.3	93.9	147.3
45	50	0	279.7	506.9	548.3
		15	193.6	257.2	276.5
		30	106.0	159.3	180.8

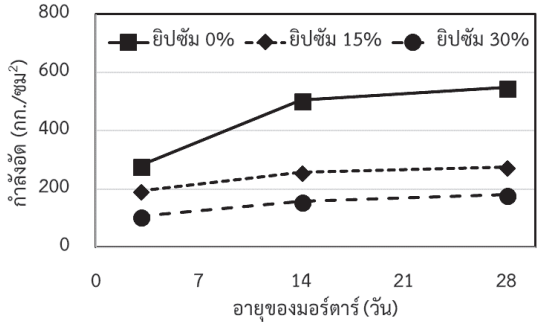
* กำลังที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง



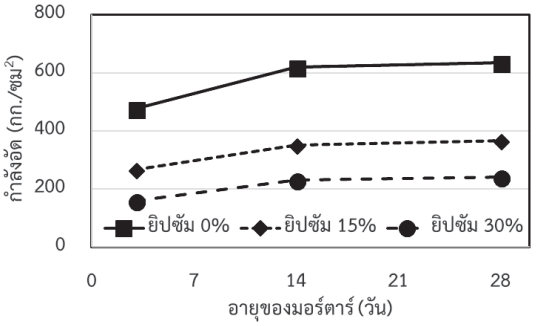
ก) มอร์ตาร์ที่มี W/C 35%, s/m 50%



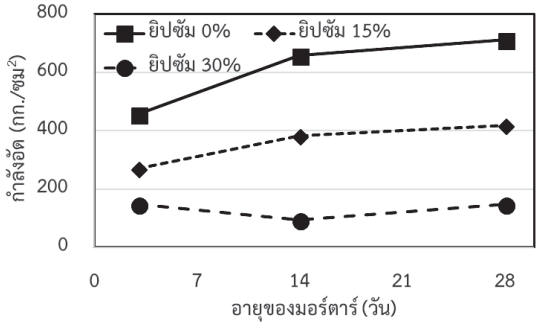
ข) มอร์ตาร์ที่มี W/C 40%, s/m 50%



ค) มอร์ตาร์ที่มี W/C 45%, s/m 50%



ง) มอร์ตาร์ที่มี W/C 40%, s/m 55%

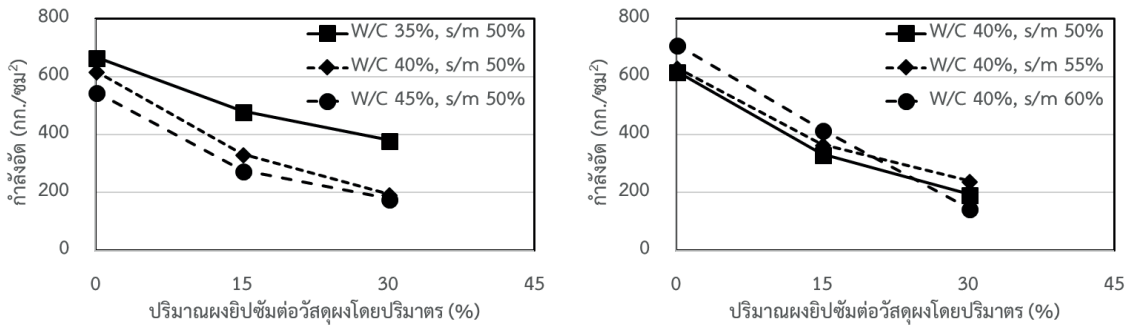


จ) มอร์ตาร์ที่มี W/C 40%, s/m 60%

รูปที่ 4 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อมีปริมาณผงยิปซัม, น้ำและทรายที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4 แสดงผลกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งมีปริมาณส่วนผสมที่แตกต่างกัน ณ อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงชัดเจนเมื่อปริมาณผงยิปซัมเพิ่มมากขึ้น โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของผงยิปซัมมีค่าอยู่ระหว่าง 550-650 กก/ซม^2 ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณผงยิปซัมลงในมอร์ตาร์ 15% และ 30% ทำให้กำลังอัดลดลงประมาณ 27-50% และ 42-79% เนื่องจากผงยิปซัมไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก ดังนั้นการนำผงยิปซัมมาให้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนอาจไม่เหมาะสมที่

จะนำไปใช้สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการกำลังพอสมควร แต่อาจจะเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทที่ไม่ต้องการกำลังอัดมาก เช่นอิฐก่อผนังหรืออิฐบล็อกปูพื้นทั่วไป เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการพัฒนากำลังอัดในช่วง 7-14 วันแรกยังลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงจากการแทนที่ด้วยผงยิปซัม ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นลดลงตามลำดับ ในส่วนการพัฒนากำลังอัดช่วงอายุ 14-28 นั้นไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์แล้วในช่วง 14 วันแรกเมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำแตกต่างกันโดยปริมาณทรายเท่ากับ 50% แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำ 40-45% มีกำลังน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำ 35% ประมาณ 50% ในขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณทรายที่แตกต่างกันโดยมีปริมาณน้ำเท่ากันที่ 40% ปริมาณทรายที่แตกต่างกันนี้แปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสม ปริมาณทรายที่ลดลงจะถูกแทนที่ด้วยซีเมนต์เพสต์ กำลังอัดของมอร์ตาร์ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อปริมาณทรายอยู่ในช่วง 50-55% สำหรับมอร์ตาร์ที่มีปริมาณทราย 60% มีกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อไม่ผสมผงยิปซัมและผสมผงยิปซัม 15% ซึ่งตามทฤษฎีแล้วกำลังอัดควรจะน้อยที่สุดเนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยจะทำให้ปริมาณยิปซัมที่ใช้น้อยลงด้วยเมื่อเทียบสัดส่วนที่เท่ากัน ดังนั้นการถูกรบกวนการก่อตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากยิปซัมมีความเป็นไปได้ที่จะลดลง ทำให้กำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมอื่นในช่วงต้น อย่างไรก็ตามเมื่อปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยผงยิปซัม 30% กำลังอัดของมอร์ตาร์นี้มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยที่สุดทำให้การพัฒนากำลังอัดแย่ที่สุดในกลุ่มมอร์ตาร์นี้



ก) มอร์ตาร์ที่มี W/C 35-40%, s/m 50%

ข) มอร์ตาร์ที่มี W/C 40%, s/m 50-60%

รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณผงยิปซัมต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

5.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 140x65x40 ซม. แสดงดังตารางที่ 6 ผลกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์เท่ากันที่ 50% และ 55% แสดงดังรูปที่ 6 ก) และ ข) ตามลำดับ พิจารณาชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ 50% พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงสุดประมาณ 751.2 กก/ซม^2 เมื่อไม่มีส่วนผสมของแผ่นยิปซัมบดและลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณแผ่นยิปซัมบดแทนที่ทรายบางส่วน โดยทุกส่วนผสมมีกำลังอัดน้อยกว่า 200 กก/ซม^2 เมื่อเพิ่มปริมาณแผ่นยิปซัมบด 20% ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานอิฐชั้นคุณภาพ ก ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมสังเกตได้ว่าที่ปริมาณแผ่นยิปซัมบด 10% และ 20% นั้นปริมาณน้ำน้อยที่สุด 35% ไม่ได้ให้กำลังอัดสูงสุดโดยมีกำลังอัดเท่ากับ 273.1 และ 98 กก/ซม^2 ตามลำดับสำหรับแผ่นยิปซัมบด 10% และ 20% ตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแผ่นยิปซัมบดเป็น 20% ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ 50% โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 311.7 กก/ซม^2 สาเหตุเนื่องมาจากแผ่นยิปซัม

บดดูดน้ำปริมาณมากส่งผลให้ส่วนผสมค่อนข้างแห้ง เข้าแบบยาก ส่งผลให้กำลังอัดลดลงเนื่องจากการบดอัดทำได้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้จะสังเกตจากตารางที่ 6 ได้ว่าค่ากำลังอัดที่อายุ 4 วัน และ 28 วันของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำ 45% และปริมาณซีเมนต์เพสต์ 55% มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมีปริมาณยิปซัม 20% อาจมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำและแผ่นยิปซัมบดที่มากเกินไป ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นถูกขัดขวางอย่างสมบูรณ์ กำลังอัดที่อายุ 4 มีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีที่มอร์ตาร์มีปริมาณน้ำ 35-40% และปริมาณซีเมนต์เพสต์ 50% เมื่อมีปริมาณแผ่นยิปซัมบด 20% เนื่องจากปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปทำให้ส่วนผสมแห้งมาก ไม่สามารถเชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์จึงไม่สามารถรับน้ำหนักได้นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำมาก (W/C 50-60%) ของชุดตัวอย่างที่มีซีเมนต์เพสต์ 50% นั้น เมื่อเพิ่มปริมาณแผ่นยิปซัมบดจาก 10% เป็น 20% กำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (สูงขึ้นเล็กน้อย, ลงลดเล็กน้อย หรือใกล้เคียงกัน) เนื่องจากปริมาณน้ำดังกล่าวเพียงพอให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีจึงมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 10% เมื่อตัวอย่างมีปริมาณมวลรวมละเอียดมาก (ซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ 50%) ปริมาณน้ำที่เพียงพอจะมากขึ้นตามไปด้วยดังค่า W/C ข้างต้น พบว่ากำลังอัดมีค่าน้อยมากหรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำน้อย (W/C 35-40%) มีและปริมาณยิปซัม 20% เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้ส่วนผสมยึดติดกันอย่างต่อเนื่องจึงไม่สามารถรับน้ำหนักได้ดี

มอร์ตาร์ที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ 55% มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่สำหรับชุดตัวอย่างนี้กำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นส่วนผสมที่มีปริมาณยิปซัมบด 20% ซึ่งปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดคือ 40% ให้กำลังอัด 383.5 กก/ซม^2 ผ่านมาตรฐานอิฐชั้นคุณภาพ ก ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีปริมาณน้ำ 45% ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากไม่สามารถบดอัดได้ และมอร์ตาร์มีกำลังอัดเท่ากับ 139.5 กก/ซม^2 ไม่ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ ก เช่นเดียวกัน สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมอร์ตาร์มีปริมาณซีเมนต์เพสต์ปานกลางที่ 50% ปริมาณน้ำมากจะช่วยให้สามารถบดอัดได้ แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 55% ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 40%

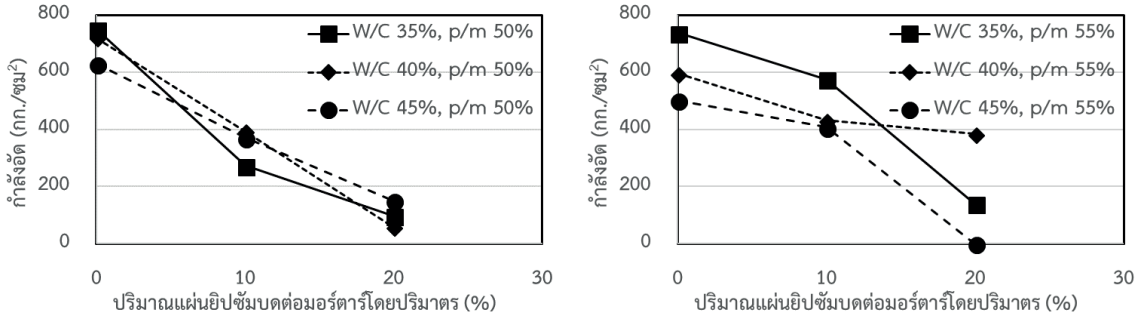
ตารางที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	ซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	ปริมาณยิปซัมต่อซีเมนต์ (g/c, %)	กำลังอัดที่อายุ 4 วัน	กำลังอัดที่อายุ 28 วัน
35	55	45	0	608.4	738.0
		35	10	444.7	575.5
		25	20	25.6	139.5
40		45	0	458.7	595.1
		35	10	368.2	431.6
		25	20	354.6	383.5
45		45	0	261.1	501.4
		35	10	383.8	407.5
		25	20	0	0
35		50	0	668.6	751.2
		40	10	133.9	273.1
		30	20	0	98.0
		50	0	602.3	720.9

ตารางที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน (ต่อ)

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C, %)	ซีเมนต์เพสต์ต่อมอร์ตาร์ (p/m, %)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m, %)	ปริมาณยิปซัมต่อซีเมนต์ (g/c, %)	กำลังอัดที่อายุ 4 วัน	กำลังอัดที่อายุ 28 วัน
40	50	40	10	335.6	393.1
		30	20	0	57.8
45		50	0	470.4	629.7
		40	10	213.6	370.8
		30	20	66.2	150.4
50		50	0	390	507.7
		40	10	229.7	297.7
		30	20	52.2	311.7
55		50	0	349	505.5
		40	10	56.2	293.3
		30	20	77.9	271.1
60		50	0	313.2	422.8
		40	10	32.5	226.1
		30	20	27.8	227.0

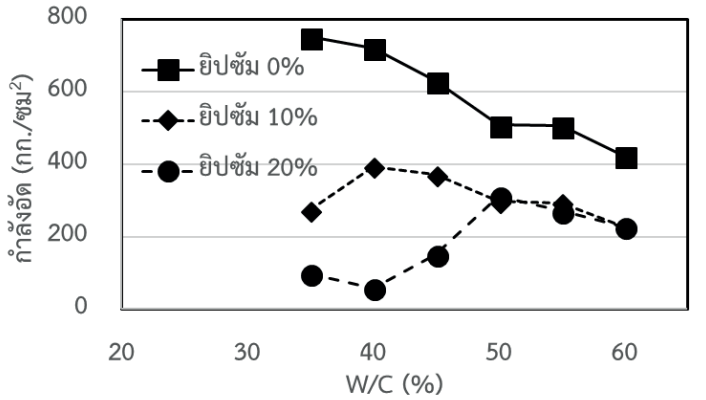
* กำลังที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง



ก) มอร์ตาร์ที่มี W/C 35-40%, p/m 50%

ข) มอร์ตาร์ที่มี W/C 35-40%, p/m 55%

รูปที่ 6 ผลกระทบของปริมาณแผ่นยิปซัมบดที่แตกต่างกันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อมีปริมาณแผ่นยิปซัมบดที่แตกต่างกัน สำหรับปริมาณซีเมนต์เพสต์ 50% ที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณแผ่นยิปซัมบดที่แตกต่างกัน พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมแผ่นยิปซัมบดมีค่ากำลังอัดลดลงอย่างเนื่องเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแผ่นยิปซัมบดมีความสัมพันธ์ที่ต่างออกไป โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเมื่อผสมแผ่นยิปซัมบด 10% และ 20% มีค่า 40% และ 50% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 393.1 กก/ซม^2 และ 311.7 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 วัน ซึ่งเพียงพอสำหรับอิฐก่อผนังตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพียง 98 และ 57.8 กก/ซม^2 เท่านั้นที่อายุ 28 วัน เมื่อมีปริมาณน้ำ 35% และ 40% ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแผ่นยิปซัมบด 20% เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ปริมาณน้ำยังถูกดูดไปบางส่วนทำให้ส่วนผสมแห้งอย่างรวดเร็วยากต่อการบดอัด ส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก การเพิ่มปริมาณน้ำแม้ว่าจะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นแต่สามารถทำให้แน่นได้ง่ายขึ้น ดังนั้นกำลังอัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำลงไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเกินกว่า 50% กำลังอัดมีค่าลดลงตามทฤษฎีเนื่องจากปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับทำให้มอร์ตาร์แน่นแล้ว การเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นอีกจึงทำให้มอร์ตาร์มีรูพรุนมากขึ้นหลังจากแข็งตัวทำให้กำลังอัดลดลงอย่างต่อเนื่อง

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

1. การใช้ผงยิปซัมที่ได้จากอุตสาหกรรมก่อสร้างมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตสามารถทำได้แต่ต้องคำนึงถึงกำลังอัดที่ลดลงอย่างมากโดยเมื่อใส่ผงยิปซัมแทนที่ปูนซีเมนต์ 30% จะทำให้มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 382.9 กก/ซม.^{2} และต่ำสุดเท่ากับ 180.8 กก/ซม.^{2} ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ ดังนั้นการเลือกใช้ส่วนผสมต่างๆ จะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งานอย่างรอบคอบ

2. การประยุกต์ใช้แผ่นยิปซัมบดแทนที่ทรายบางส่วนต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่จะถูกชดเชยจากยิปซัมอย่างมาก ปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแผ่นยิปซัมบด 10% และ 20% คือ 40% และ 50% ตามลำดับ โดยให้กำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 393.1 กก/ซม^2 และ 311.7 กก/ซม^2 ตามลำดับที่อายุ 28 วัน

3. แผ่นยิปซัมบดสามารถนำมาใช้ในการผลิตอิฐก่อผนังได้ด้วยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งให้กำลังอัดเพียงพอมากกว่า 210 กก/ซม^2 ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐสามัญชั้นคุณภาพ ก จึงเป็นอีกทางหนึ่งในการกำจัดขยะที่มาจากอุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบัน

7. เอกสารอ้างอิง

1. Thai Industrial Standard, 2002, "Building Bricks" TIS 77-2545. (In Thai)

2. Davidovits, J., 1991, "Geopolymers : Inorganic Polymeric New Materials," *Journal of Thermal Analysis,* 37 (8), pp. 1633-1656.

3. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2015, "Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar Cured with Electric Oven," *KMUTT Research and Development*, 38 (1), pp. 3-18. (In Thai)

4. Phatitriwatt, N. and Chalee, W., 2017, "Effect of Curing Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar," *KMUTT Research and Development*, 40 (3), pp. 355-364. (In Thai)

5. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2016, "Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks," *KMUTT Research and Development*, 39 (2), pp. 271-286. (In Thai)

6. Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S. and Chindaprasert, P., 2016, "Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement," *KMUTT Research and Development,* 39 (2), pp. 127-137. (In Thai)

7. Boonserm, K., Baoulan, A., Lisnund, S., Supamathanon, N., Sombatsri, S., Paopongpaiboon, K., Chotetanorm, C. and Chindaprasirt, P., 2018, "Synthesis of Geopolymer from Phimai Soil with Fly Ash," *KMUTT Research and Development*, 41 (4), pp. 465-474. (In Thai)

8. Poltue, T., Suddeepong, A. and Horpibulsuk, S., 2017, "Strength of Recycled Concrete Aggregate Binding with Fly Ash-Rice Husk Ash Geopolymer for Pavement Sub Bases Application," *KMUTT Research and Development*, 40 (4), pp. 567-581. (In Thai)

9. Sanawung, W., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "Strength, Abrasion Resistance, and Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development,* 41 (1), pp. 83-96. (In Thai)

10. Ramjan, S., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2016, "Effect of Palm Oil Fuel Ash on Alkali-Silica Reaction of Mortar," *KMUTT Research and Development,* 39 (3), pp. 379-394. (In Thai)

11. Srisen, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2014, "Properties of Concrete Using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material," *KMUTT Research and Development*, 37 (2), pp. 165-175. (In Thai)

12. Rattanachu, P., Karnthong, I., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "Use of Ground Bagasse Ash to Increase Chloride Resistance of High Strength Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate," *KMUTT Research and Development*, 41 (2), pp. 169-183. (In Thai)

13. Sua-iam, G., Makul, N., Lamthong, A. and Chatveera, B., 2016, "Use of Incinerated Sugarcane Filter Cake as a Material in Producing Cellular Lightweight Concrete," *KMUTT Research and Development,* 39 (2), pp. 155-170. (In Thai)

14. Joyklad, P., Ali, N. and Hussain, Q., 2018, "Performance of Hollow Brick Made of Fly Ash, Cement and Sand," *KMUTT Research and Development*, 41 (1), pp. 97-113.

15. Kongsitthanakorn, A., Sangkakit, P. and Dampanrat, W., 2003, A Study on Possibility of Using Synthesis Gypsum for Paving Blocks, Bachelor of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Civil and Environmental Engineering Technology Department, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 112 p. (In Thai)

16. Sriwichai, J., Chareonsukkho, S., Chaiyasith, A., Kongsomsaksiri, S. and Yamoth, N., 2005, Effects of

Synthesis Gypsum in Concrete, Bachelor of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Civil and Environmental Engineering Technology Department, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 145 p. (In Thai)

17. Cholatarn, T., Klubprasith, T., Permrith, W., Kongsomsaksiri, S. and Yamoth, N., 2004, Effects of Water Content on Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum, Bachelor of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Civil and Environmental Engineering Technology Department, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 104 p. (In Thai)

18. Noochaya, N., Wisutchanon, W., Piyo, S., Kongsomsaksiri, S. and Yamoth, N., 2004, A Development of Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum, Bachelor of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Civil and Environmental Engineering Technology Department, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 117 p. (In Thai)

19. Thai Industrial Standard, 2003, “Facing Bricks” TIS 168-2545. (In Thai)