

ประโยชน์ของหางแร่ดินขาวผลิตคอนกรีตโฟม

Utilization of Kaolin Tailing Fabricated Foamed Concrete

ฉันทยาภรณ์ จันทร์ศรีนวล¹ และ ดนุพล ตันนโยภาส²

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112^{1,2}

E-mail: danupon.t@psu.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตโฟมที่ใช้สารก่อฟองชนิดโปรตีนกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 1:50 1:60 และ 1:70 ผสมหางแร่ดินขาวที่แทนทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างมีทั้งผ่านและไม่ผ่านการอบไอน้ำแรงดันต่ำ จากนั้นบ่มภายใต้บรรยากาศห้องเป็นเวลา 3 7 และ 28 วัน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดมีขนาด 10×10×10 ซม. นำไปทดสอบความหนาแน่นรวม กำลังอัด วิเคราะห์แร่ องค์ประกอบและโครงสร้างจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และการถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างผสมหางแร่ดินขาวร้อยละ 50 อัตราส่วนสารก่อฟองต่อน้ำ 1:70 ผ่านการอบไอน้ำและบ่มในบรรยากาศห้องทดสอบอายุบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดสูงสุด 29.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีความหนาแน่นรวม 952.15 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร นอกเหนือจากนี้ โครงสร้างจุลทรรศน์มีขนาดโพรงเล็กและเกิดหลายวัฏภาคแร่ขึ้น สภาวะการอบไอน้ำสามารถพัฒนากำลังให้แก่คอนกรีตโฟม และการเติมหางแร่ดินขาวลดความพรุนในคอนกรีตโฟมลง ในบางสูตรผสมของคอนกรีตโฟมได้ตามเกณฑ์ มอก.2601-2556

Abstract

This paper was presented the properties of foamed concrete with a protein foaming agent to water ratio (PFA/w) varied of 1:40, 1:50, 1:60 and 1:70. Kaolin tailing (KT) containing of 50 and 100wt% were replaced in fine sand. All cube specimens were in dimension of 10×10×10 cm. Samples were performed without and with low pressure stream (LPS) and continuous cured in ambient atmosphere for 3, 7, and 28 days. Testing was carried out in bulk density, compressive strength, mineral composition and microstructure analysis by X-ray diffraction and electron microscopy imaging, respectively. Results exhibited that the 28-day LPS sample with PFA/w ratio of 1:70 contained KT 50wt.% led highest compressive strength of 29.42 ksc and bulk density of 952.15 kg/m³ Furthermore, microstructure had decreased pore size and occurred several mineral phases. The LPS condition can be developed strength of samples and filling KT reduced porosity in foamed concrete. Based on some formulations of the foamed concrete can be met TIS. 2601-2556.

1. บทนำ

ปัจจุบันของเสียที่มาจากกระบวนการผลิตหลายชนิดได้นำไปฝังกลบ ทั้งที่ยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ บ่อยครั้งก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การฝังกลบยังเป็นการสูญเสียพื้นที่ และบริเวณที่ฝังกลบนั้นก็ยังไม่สามารถใช้ทำประโยชน์อย่างอื่นใดได้ทันทีหรืออาจถาวร ในการผลิตดินขาวนั้นมีของเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตในแต่ละปีประมาณ 52,000 ม.³ หรือประมาณร้อยละ 38 [1] ซึ่งเป็นปริมาณสูงเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตทั้งหมด ของเสียเหล่านี้ได้ก่อปัญหาแก่ผู้ประกอบการ เช่น บริเวณพื้นที่ไม่เพียงพอในการเก็บแร่ทิ้ง การขนส่งไปทิ้งบริเวณอื่นก็เสียค่าใช้จ่ายสูง และยังมีตะกอนในบ่อดักตะกอนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อมลภาวะสิ่งแวดล้อมทางอ้อม หากของเสียเหล่านี้ไปทำให้เกิดมูลค่าขึ้นจะช่วยลดปริมาณทางแร่ในแต่ละปีและอาจจะช่วยเพิ่มกำลังการผลิตได้อีกด้วยการผลิตคอนกรีตประเภทมวลเบาจากทางแร่ดินขาวจึงเป็นทางเลือกที่น่าเหมาะสมที่จะช่วยลดปัญหาเหล่านี้

ปัจจุบันคอนกรีตโฟม (foamed concrete) มักผลิตจาก ปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม น้ำ และสารก่อฟอง (foaming agent) เป็นต้น ซึ่งมีอัตราส่วนผสมพิเศษที่เป็นสูตรตำรับเฉพาะและราคาสูงกว่าอิฐมวลเบา คอนกรีตโฟมได้พัฒนาเพื่อตอบสนองในประเด็นถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จึงมีการนำวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้นำมาใช้ในกระบวนการผลิต [2] ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

Kearsley and Wainwright [3] ผสมเถ้าลอยทั้งคัดและไม่คัดขนาดร้อยละ 50, 66.6 และ 75 แทน

ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3, 0.4 และ 0.6 ได้คอนกรีตโฟมมีความหนาแน่น 1,000, 1,250 และ 1,500 กก./ม.³ ปริมาณเถ้าลอยส่งผลต่อกำลังอัดและรูพรุนที่มากขึ้น เถ้าลอยคัดขนาดให้ผลดีกว่าเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด โดยแทนที่ร้อยละ 70 ของปูนซีเมนต์มีกำลังอัดสูงกว่าไม่ใส่เถ้าลอย ยังมีการผลิตคอนกรีตโฟมมีความหนาแน่น 100-300 กก./ม.³ ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และส่วนผสมสารเคมี ผลิตรูพรุนขนาด 2.0 - 4.0 มิลลิเมตร ส่งผลให้สภาพการนำความร้อน และกำลังแรงดึงและอัดลดลง [4] ได้มีการพัฒนาคอนกรีตโฟมกำลังอัดกันซัลเฟต ใช้เถ้าลอยหยาบแทนทราย ได้ความหนาแน่น 1,000 ถึง 1,400 กก./ม.³ เถ้าลอยเพิ่มสมบัติของสารก่อฟอง รวมทั้งดูดซับคาร์บอนปริมาณสูง เถ้าลอยหยาบแทนที่ทรายส่งผลคอนกรีตโฟมเพิ่มการกระจายและการไหลแผ่มากกว่าคอนกรีตที่ใส่ทรายล้วน อย่างไรก็ตามเถ้าลอยหยาบต้องใช้ปริมาณมากกว่าในความหนาแน่นที่เท่ากัน เป็นสาเหตุให้สารก่อฟองไม่เสถียร อันมีสาเหตุจากการที่มีคาร์บอนตกค้างอยู่ในเถ้าลอย คอนกรีตโฟมอายุเกิน 28 วัน ให้กำลังมากกว่าเมื่อเทียบกับใส่ทราย [5]

Nambiar and Ramamurthy [6] ทดสอบการดูดซับของคอนกรีตโฟม มีผลจากส่วนผสมและโครงสร้างโพรง ผสมเถ้าลอยแทนที่ทรายหลายระดับและน้ำยาก่อฟองต่างกัน พบว่าค่าการดูดซับต่ำกว่าไม่ใส่น้ำยาก่อฟอง ค่าลดลงตามปริมาตรน้ำยาก่อฟองเพิ่มขึ้น การดูดซับขึ้นกับชนิดสารตัวเติม ความหนาแน่นและโครงสร้างโพรง และรวมทั้งกลไกการซึมผ่าน ผลใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสงและการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าปริมาตร ขนาด และ

ระยะห่างของโพรงอากาศล้วนมีอิทธิพลต่อกำลังและความหนาแน่น ส่วนผสมที่ขนาดโพรงกระจายเท่ากันมีกำลังสูงกว่า ขนาดฟองใหญ่ขึ้นแพร่กระจายทำให้กำลังลดลง แต่รูปทรงโพรงไม่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตโฟม [7]

Ibrahim et al. [8] ใช้เศษอิฐเหลือใช้ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ผสมกับสารก่อฟอง ทำคอนกรีตมวลเบา บ่ม 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบการอัด การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการเทได้ และความหนาแน่น อัตราส่วนที่อิฐเหมาะสมคือ ร้อยละ 25 ให้กำลังอัดสูงสุด 25 เมกะพาสคัล ความหนาแน่น 1,647 กก./ม³ Pan et al. [9] ผสมปูนซีเมนต์ 280 กก. หรือ 650 กก./ม³ ตะกรันเตาถลุงบดละเอียด 64-146 กก./ม³ เถ้าลอย 42-97 กก./ม³ เชม่าซิลิกา (silica fume) 34-78 กก./ม³ และทราย 0-920 กก./ม³ ด้วยการเติมฟองอากาศ กำลังอัด 28 วัน ประมาณ 11 - 23.7 เมกะพาสคัล ค่าการนำความร้อน 0.16 - 0.75 วัตต์/เมตร-เคลวิน ความหนาแน่นแห้ง 1,500 กก./ม³ ใส่สารลดน้ำได้กำลังอัดสูงถึง 44.1 เมกะพาสคัล คอนกรีตโฟมสดสามารถไหลแผ่ได้ดี จึงเหมาะกับการหล่อในที่ และหล่ออุดโพรงใต้ดิน ยกเว้นสำหรับหล่ออิฐบล็อก อิฐ หรือผนังกำแพง Panesar [10] ทดสอบคอนกรีตรูโพรง (cellular concrete) ปริมาณอากาศแปรผันจากร้อยละ 6 ถึง 35 ใส่สารกระจายฟองสามชนิด เป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง และเป็นสารสังเคราะห์อีกสองชนิด พบว่าคอนกรีตรูโพรงใช้ได้กับด้านโครงสร้างมวลเบา เนื่องจากพัฒนาสมบัติเชิงกล การส่งผ่านและต้านทานความร้อน แต่อ่อนไหวตามชนิดสารกระจายฟองที่ใช้และมีผลต่อ

ต้านทานความร้อน และสัมประสิทธิ์สภาพการดูดซับ แต่ส่งผลน้อยต่อสมบัติเชิงกล

คอนกรีตโฟมโดยใช้สารก่อฟองชนิดโปรตีนและสังเคราะห์ ผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน การบ่มแบบขึ้นส่งผลต่อค่ากำลังเพียงเล็กน้อย คอนกรีตโฟมที่ใช้น้ำยาโปรตีนได้ค่ากำลังอัดสูงกว่า คอนกรีตโฟมที่ใช้น้ำยาสังเคราะห์ถึง 1.5 เท่า และเมื่อเติมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 บ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดมากที่สุด 32.37 กก./ชม.² ความหนาแน่น 995.63 กก./ม³ ส่วนเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 บ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดสูงสุด 22.68 กก./ชม.² และความหนาแน่นรวม 904.97 กก./ม³ ขณะที่ผสมเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ในน้ำยาสังเคราะห์ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 17.76 กก./ม³ ความหนาแน่น 935.32 กก./ม³ [11] Ma and Chen [12] ศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเชม่าซิลิกา ได้ความหนาแน่น 800 กก./ม³ กำลังอัด 7.5 เมกะพาสคัล และนำความร้อน 0.16 W/mk การเติมเชม่าซิลิการ้อยละ 20 ช่วยเพิ่มกำลังและปรับปรุงสมบัติการทนไฟ การกระจายของรูพรุนให้สม่ำเสมอ เพิ่มอุณหภูมิ ความร้อน Hilal et al. [13] ศึกษาโครงสร้างโพรงของคอนกรีตโฟม ประกอบด้วยปริมาณช่องว่างทั้งหมด รูปทรง ขนาด และการกระจายตัว มีผลต่อกำลังและความคงทน เติมสารบิวเทนทำให้รูปถ่ายโครงสร้างชัดด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง พบความแตกต่างระหว่างการกระจายขนาดฟองในคอนกรีตโฟมที่มีรูฟองอากาศเชื่อมต่อกันมาก

ทำให้ปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นลดลง

จากวรรณกรรมปริทัศน์ที่กล่าวมาข้างต้น ได้มาเป็นแนวทางการวิจัยนี้ นำหางแร่ดินขาวมาเป็นวัตถุดิบทำคอนกรีตโฟม ตามเกณฑ์ มอก [14,15] สำหรับงานก่อสร้าง

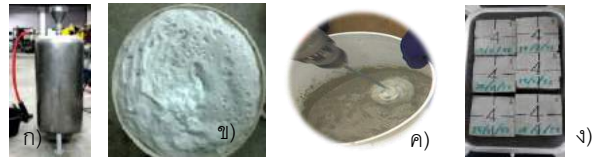
2. วิธีการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

น้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีน (protein foaming agent, PFA) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC) ทรายละเอียด มีความถ่วงจำเพาะ 2.65 ส่วนหางแร่ดินขาวที่คัดขนาดผ่านเครื่องไฮโดรไซโคลอน (underflow hydrocyclone) ของ บริษัท MRD จ. ระนอง มีความถ่วงจำเพาะ 2.60 เครื่องผลิตโฟมตั้งความดันลมไว้ 5 บาร์ (รูปที่ 1 ก) และเครื่องกวน

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 มิลลิเมตร ใส่มวลรวมหางดินขาวแทนทราย ใช้น้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีนปริมาณ 125 มิลลิลิตร (รูปที่ 1 ข) ทุกสูตรผสมใช้ปูนซีเมนต์ 456 กก./ม.³ หางแร่ดินขาว 312.6 กก./ม.³ อัตราส่วนน้ำกับวัสดุประสาน 0.48 คงที่ตลอด ส่วนผสมระหว่างน้ำกับน้ำยาก่อฟอง 4 ชุด คือ 1:40, 1:50, 1:60 และ 1:70 (ตารางที่ 1) กวนทั้งหมดให้เข้ากัน (รูปที่ 1 ค) ชุดละ 9 ตัวอย่าง บ่ม 2 วิธี คือ อบและไม่อบไอน้ำแรงดันต่ำ 8 ซม. บ่มต่อในบรรยากาศห้องเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ทั้งหมด 117 ก้อน (รูปที่ 1 ง)



รูปที่ 1 ก) เครื่องผลิตโฟม ข) โฟม ค) กวน และ ง) ตัวอย่าง

ครบกำหนดบ่มนำตัวอย่างไปทดสอบความหนาแน่นรวม กำลังอัด วิเคราะห์วิภูภาคแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยการถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตโฟมที่ทดลอง

สัญลักษณ์	s	KT	w	w/c
	kg/m ³		litre	
s1:40	675	0	6.0	0.45
KTs1:40	360	313	6.0	0.45
KT1:40	0	633	6.0	0.59
KTs1:50	360	313	6.25	0.66
KTs1:60	350	313	7.50	0.66
KTs1:70	360	313	8.75	0.66
KT1:70	0	570	8.75	0.94

3. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของหางแร่ดินขาว

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหางแร่ดินขาวโดยวิธี XRF จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มอ. (ตารางที่ 2) ค่ารวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ร้อยละ 87.76 มีค่า LOI 9.16 สูง ผลวิเคราะห์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของธนุพลและอัครเดช [16] ที่ผสมในมอร์ตาร์ พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เกิด เนื่องจากไม่อยู่ในรูปอสัณฐานและความละเอียดน้อย

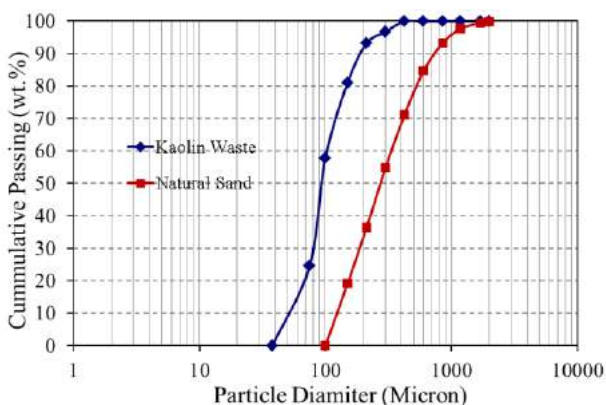
จึงไม่เป็นวัสดุปอซโซลานตามที่กำหนดใน ASTM C618-15 [17]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของหางแร่ดินขาวที่ใช้

สารประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide, Al ₂ O ₃)	34.84
ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO ₂)	51.38
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide, K ₂ O)	2.85
ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂)	0.07
แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide, MnO)	0.18
เหล็กออกไซด์ (Iron(III) oxide, Fe ₂ O ₃)	1.54
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (Loss on Ignition, LOI)	9.14

3.2 การวิเคราะห์ขนาดและรูปร่าง

ผลการวิเคราะห์ขนาดของทรายมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 100 – 2,000 ไมครอน หางแร่ดินขาวมีขนาดการกระจายตัวอยู่ในช่วง 38 - 300 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 1 ทรายที่ใช้ได้ส่วนขนาดละเอียด (well graded) ส่วนหางแร่ดินขาวกระจายค่อนข้างขนาดเดียว ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้คละขนาดของทั้งทรายและหางแร่ดินขาว (รูปที่ 2) มีค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus, F.M.) คือ 2.438 และ 2.262



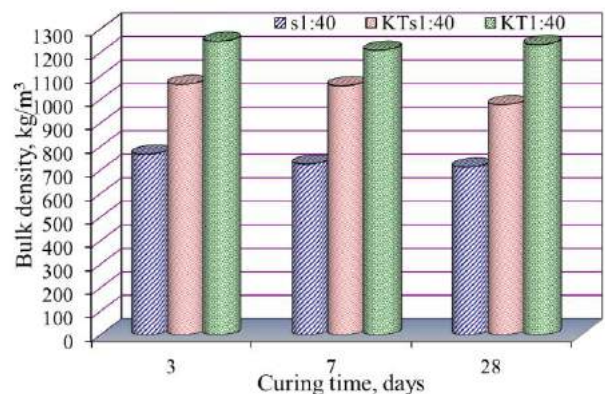
รูปที่ 2 การกระจายขนาดของวัสดุที่ใช้ในคอนกรีตโฟม

ตามลำดับ ค่าหางแร่ดินขาวมีค่าน้อยกว่าทราย จึงดูดซึมน้ำมากกว่าและแร่ประกอบหางแร่ดินขาวมี ผลึก

ควอตซ์รูปเหลี่ยม เคโอลิไนต์ (kaolinite) และผงเกล็ดมัสโคไวต์ (muscovite)

3.3 ผลต่อความหนาแน่นรวมของคอนกรีตโฟม

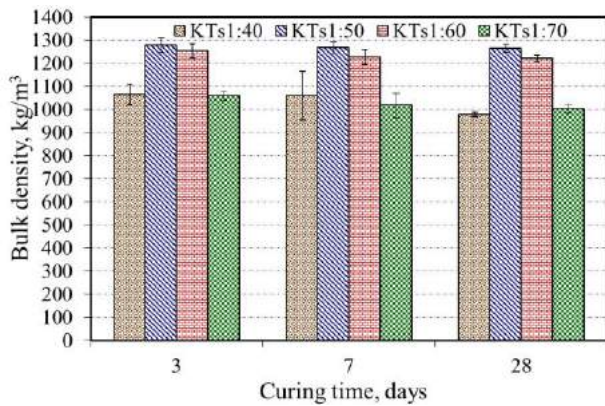
คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนของน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:40 ใส่ทราย (s) หางแร่ดินขาวผสมทรายอย่างละครึ่ง (KTs) และหางแร่ดินขาวล้วน (KT) ที่ไม่อบไอน้ำ 8 ชั่วโมง ก่อนบ่ม ที่อายุบ่ม 28 วัน ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยคือ 713, 978 และ 1,233 กก./ม.³ ตามลำดับ (รูปที่ 3) ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหางแร่ดินขาวเพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตโฟมอบไอน้ำก่อนบ่มที่ผสมหางแร่ดินขาวและทรายอย่างละครึ่งอายุบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ได้ค่าความหนาแน่น 1,606 1,549 และ 1,569 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งค่าของตัวอย่างอบก่อนบ่มสูงกว่าไม่อบราวร้อยละ 31-37 และแนวโน้มลดลงตามอายุบ่ม (รูปที่ 3) ผลทดลองอัตราส่วนนี้ใส่ทรายล้วนได้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยอื่น [11] จึงมั่นใจว่าวิธีนี้พัฒนาตัวอย่างผสมหางแร่ดินขาวกับ



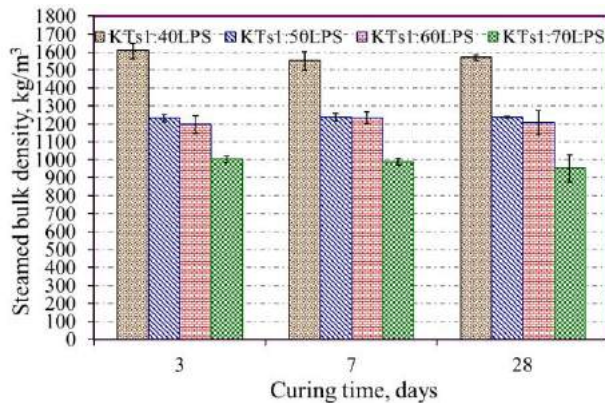
รูปที่ 3 ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมไม่ผ่านการอบไอน้ำ อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:40

อัตราส่วนของน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:50 ใส่หางแร่ดินขาวกับทรายอย่างละครึ่ง ไม่อบไอน้ำก่อนบ่มอากาศ

28 วัน มีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด 1,281 กก./ม.³ (รูปที่ 4) และเมื่ออบไอน้ำ 8 ชั่วโมง ก่อนบ่ม 28 วัน ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมได้ลดลง ค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 1,234 กก./ม.³ (รูปที่ 5) ลดลงไปร้อยละ 3.67



รูปที่ 4 ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมใส่หางแร่ดินขาวและทรายอย่างละครึ่งไม่ผ่านการอบไอน้ำก่อนบ่ม

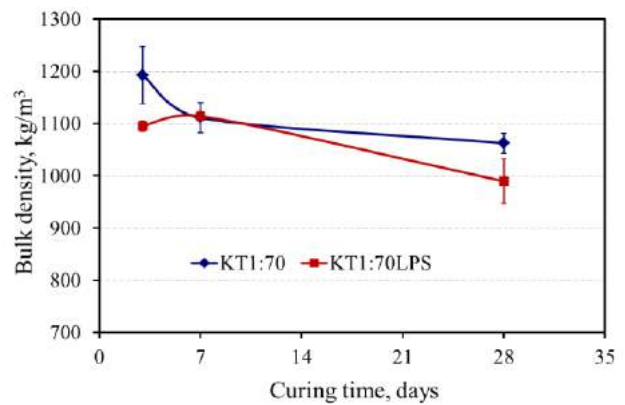


รูปที่ 5 ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมใส่หางแร่ดินขาวและทรายอย่างละครึ่งหลังผ่านการอบไอน้ำแรงดันต่ำ

หางแร่ดินขาวผสมทรายที่ร้อยละ 50 และอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำยาก่อฟอง 1:60 (KTs1:60) ความหนาแน่นไม่อบไอน้ำก่อนบ่มบรรยากาศห้อง 28 วัน มีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด 1,211 กก./ม.³ (รูปที่ 4) เมื่ออบไอน้ำ 8 ชั่วโมง บ่ม 28 วัน ค่าลดลงความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 1,137 กก./ม.³ (รูปที่ 5) ในขณะที่

อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำยาก่อฟอง 1:70 ที่ไม่อบไอน้ำ 8 ชั่วโมง ก่อนบ่มเป็นเวลา 28 วัน มีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 988 กก./ม.³ (รูปที่ 5) และความหนาแน่นเมื่ออบและบ่มในบรรยากาศ 28 วัน เช่นกัน มีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 876 กก./ม.³ (รูปที่ 5) ค่าเฉลี่ยลดลงไปประมาณร้อยละ 5

คอนกรีตโฟมที่ใส่หางแร่ดินขาวล้วน มีอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70 อบไอน้ำ 8 ชม. ก่อนบ่มในบรรยากาศห้องเป็นระยะเวลา 28 วัน ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 940 กก./ม.³ (รูปที่ 6)

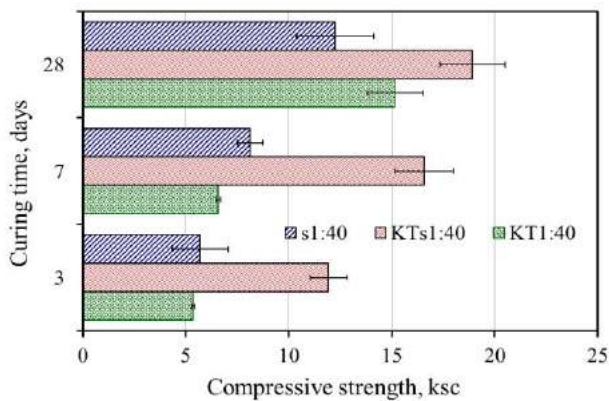


รูปที่ 6 ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมใส่หางแร่ดินขาวล้วน อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70

ในขณะที่ไม่อบไอน้ำก่อนบ่มในบรรยากาศห้อง 28 วัน ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 1,043 กก./ม.³ อันแสดงถึงอิทธิพลของการอบไอน้ำก่อนบ่มว่ามีผลต่อค่าความหนาแน่นของคอนกรีตโฟม นำเป็นผลมาจากทำให้เกิดรูโพรงในเนื้อคอนกรีตกระจายมากขึ้น ดังผลงาน Nambiar and Ramamurthy [20] ได้สร้างแบบจำลองจากการพิจารณาองค์ประกอบของส่วนผสมว่ามีผลต่อค่าของความหนาแน่นและกำลังของคอนกรีตโฟม

3.4 ผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตโฟม

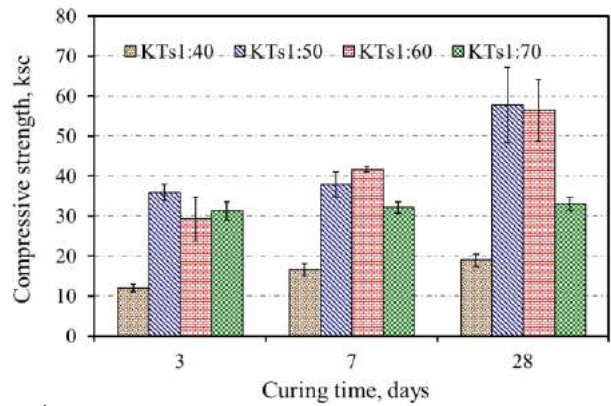
กำลังอัดของคอนกรีตโฟมที่ใส่หางแร่ดินขาว แทนที่ทรายร้อยละ 50 ไม่อบไอน้ำก่อนบ่ม มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองกับน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตโฟมที่อบไอน้ำก่อนบ่ม ค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองกับน้ำที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ทุกตัวอย่างอายุบ่มไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัด กรณีตัวอย่างผสมอัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาก่อฟอง 1:40 ไม่อบไอน้ำก่อนบ่ม 28 วัน ของตัวอย่างใส่ทรายล้วน ทรายผสมหางแร่ดินขาวและหางแร่ดินขาวล้วน ให้ชุดค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด คือ 12.26 18.92 และ 15.16 กก./ซม.² ตามลำดับ (รูปที่ 7) ให้ค่าน้อยจึงได้ยุติการทดลองชุดนี้ แต่ตัวอย่างชุดผสมทรายและหางแร่ดินขาวอย่างละครึ่ง อบไอน้ำก่อนบ่มในบรรยากาศห้องทดสอบอายุบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด คือ 94.16 กก./ซม.² (รูปที่ 9)



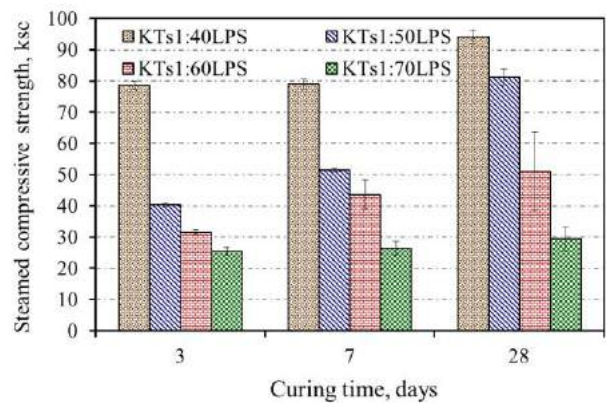
รูปที่ 7 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตโฟมภายหลังที่ไม่อบไอน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่ม อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:40

คอนกรีตโฟมที่ใส่หางแร่ดินขาวและทรายอย่างละครึ่ง มีอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:50 ไม่อบไอน้ำก่อนบ่มในบรรยากาศห้อง บ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด คือ 57.70 กก./ซม.² (รูปที่ 8) ในขณะที่ส่วนผสมเดียวกันและอบไอน้ำก่อนบ่มใน

บรรยากาศห้อง 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด คือ 81.23 กก./ซม.² (รูปที่ 9)



รูปที่ 8 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตโฟมชุดทรายและหางแร่ดินขาวอย่างละครึ่ง ภายหลังไม่อบไอน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่ม

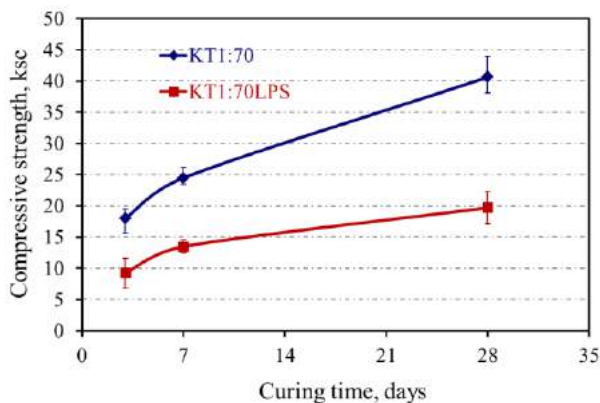


รูปที่ 9 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตโฟมชุดทรายและหางแร่ดินขาวอย่างละครึ่ง ภายหลังบ่มหลังอบไอน้ำแรงดันต่ำ

สำหรับการให้ชุดตัวอย่างใส่หางแร่ดินขาวและทรายอย่างละครึ่ง อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำมากกว่า 1:50 (1:60 และ 1:70) พบว่าการไม่อบไอน้ำก่อนบ่มได้กำลังอัดต่ำกว่าเล็กน้อยตามอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำเพิ่มขึ้น เกือบทุกอายุบ่ม ยกเว้น 7 วัน (รูปที่ 8) ซึ่งตัวอย่างที่อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:60 อายุบ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด 56.47 กก./ซม.² (รูปที่ 8) และบ่มหลังอบไอน้ำทดสอบอายุ

28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด 51.01 กก./ซม.² (รูปที่ 9)

คอนกรีตโฟมที่ใช้อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70 ไม่อบไอน้ำก่อน ที่อายุการทดสอบ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดคือ 33.0 กก./ซม.² (รูปที่ 8) และบ่มหลังอบไอน้ำที่อายุการทดสอบ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 29.41 กก./ซม.² (รูปที่ 9) ในขณะที่เดียวกันตัวอย่างใส่ทางแร่ดินขาวล้วน อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70 อบไอน้ำก่อนบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด คือ 19.72 กก./ซม.² (รูปที่ 10) และไม่อบไอน้ำก่อนบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดคือ 40.62 กก./ซม.² (รูปที่ 10) ซึ่งค่าชุดนี้ต่ำกว่าของคอนกรีตอัตราส่วน 1:40 และ 1:50 ถึงราวร้อยละ 50 จึงเห็นได้ว่าองค์ประกอบส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดและความหนาแน่นอย่างมาก [20] การที่ทางแร่ดินขาวมี LOI สูงก็น่าเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่พิจารณาว่าส่งผลแก่กำลังคอนกรีตโฟมพัฒนาไปได้ไม่ถึงขั้นสมบูรณ์ที่ควรจะเป็น



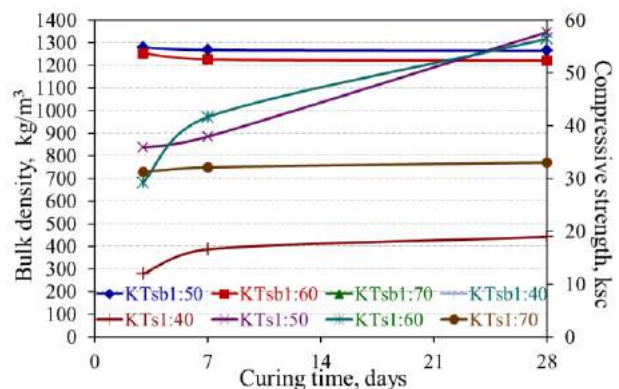
รูปที่ 10 กำลังอัดของตัวอย่างชุดอัตราส่วนผสม 1:70 ไม่อบและอบไอน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่ม

อนึ่งด้วยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพบรรยากาศห้องที่บ่มไม่คงที่ตลอดการศึกษา จึง

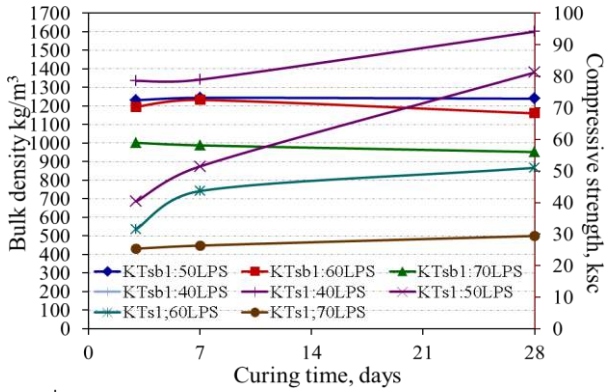
ส่งผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยาในแต่ละสูตรตัวอย่างและอายุบ่ม ทำให้สมบัติความหนาแน่นและกำลังอัดมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไม่มากนักน้อย

3.5 ประเมินคุณภาพคอนกรีตโฟม

ค่าปัจจัยได้รับจากการทดสอบตัวอย่าง ได้แก่ ความหนาแน่น กำลังอัดทั้งไม่อบและอบไอน้ำก่อนบ่ม ชุดอัตราส่วนผสมของน้ำยาก่อฟองต่อน้ำที่ต่างกัน และเวลาอายุบ่ม สามารถที่นำมาช่วยในการจำแนกตามความต้องการลักษณะคอนกรีตโฟมที่ต้องการใช้งานได้ ทำนองเดียวกับผลงานของ Ramamurthy et al. [19] ยกตัวอย่าง คอนกรีตโฟมที่อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองกับน้ำ 1:60 ไม่อบไอน้ำ ก่อนบ่มในบรรยากาศห้อง หากต้องการค่าความหนาแน่นไม่เกิน 1,200 กก./ม.³ และกำลังอัดที่อยู่ในช่วง 50-52 กก./ม.² จะต้องใช้เวลาบ่มในช่วงระยะเวลา 24-25 วัน (รูปที่ 10) หรืออัตราส่วนที่ 1:70 อบไอน้ำ 8 ชั่วโมง หากต้องการความหนาแน่นไม่เกิน 1,000 กก./ม.³ และบ่มในช่วงระยะเวลา 17-19 วัน ก็จะได้ค่ากำลังอัดราว 28 กก./ม.² (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังอัดของคอนกรีตโฟมชุดทรายและทางแร่ดินขาวอย่างละครึ่ง



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังอัดของคอนกรีตโพลีซุคทราสายและหางแร่ดินขาวอย่างละครึ่งออปโชน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่ม

3.6 วัฏภาคแร่ในคอนกรีตโพลี

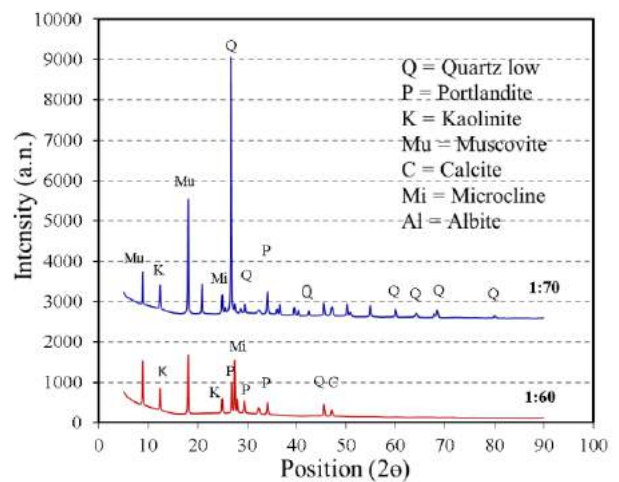
ตัวอย่างทดสอบที่ค่ากำลังอัดและมีความหนาแน่นน้อยกว่า 1,000 กก./ม.³ ตัวอย่างทดสอบที่ออปโชน้ำมีกำลังอัดปานกลางและความหนาแน่นต่ำคือคอนกรีตโพลีที่เติมน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70 และตัวอย่างที่มีกำลังอัดเด่นและความหนาแน่นค่อนข้างสูงคือ คอนกรีตโพลีมน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:60 โดยทั้งสองอัตราส่วนใส่หางแร่ดินขาวที่ร้อยละ 50 นำมาวิเคราะห์ XRD คำนวณหาปริมาณแร่แต่ละชนิดอย่างคร่าวด้วยวิธีการคำนวณพื้นที่ได้กราฟรูปที่ 13 ผลวิเคราะห์พบวัฏภาคแร่ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz low, Q) แคลไซต์ (calcite, C) พอร์ตแลนด์ (portlandite, P) ไมโครไคลน์ (microcline, Mi) แอลไบต์ (albite, Al) เคโอลิไนต์ (kaolinite, K) และมัสโคไวต์ (muscovite, Mu) ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3

น้ำยาก่อฟองเจือจางลง การออปโชน้ำช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สารประกอบอะลูมินา (Al₂O₃) มีการจับตัวในโครงสร้างแบบง่ายก่อนเป็นผลึกวัฏภาคมัสโคไวต์ ขณะเดียวกันสารประกอบอื่นจับกันเป็นโครงสร้างซับซ้อนกว่าลดลงเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เดิมจับกับ

สารประกอบ Al₂O₃ และ SiO₂ ก่อนเป็นวัฏภาคแอลไบต์ แต่ในส่วนผสมใหม่ (1:70) ไม่สามารถก่อตัวได้ ดังนั้น SiO₂ จึงรวมตัวกันเข้าก่อตัวขึ้นเป็นแร่ควอตซ์เพิ่มขึ้นแทน

ตารางที่ 3 ชนิดและปริมาณวัฏภาคแร่ในตัวอย่างวิเคราะห์ด้วย XRD

Mineral composition (%)	Chemical formula	PFA:w	
		1:60	1:70
ควอตซ์ (quartz low)	SiO ₂	-	29.55
พอร์ตแลนด์ (portlandite)	CaOH ₂	18.03	13.00
เคโอลิไนต์ (kaolinite)	Al ₂ Si ₂ O ₅	15.24	9.89
มัสโคไวต์ (muscovite)	KAISi ₃ O ₈	22.55	25.96
แคลไซต์ (calcite)	CaCO ₃	6.16	3.87
ไมโครไคลน์ (microcline)	KAISiO ₈	27.17	17.72
แอลไบต์ (albite)	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈	10.85	-

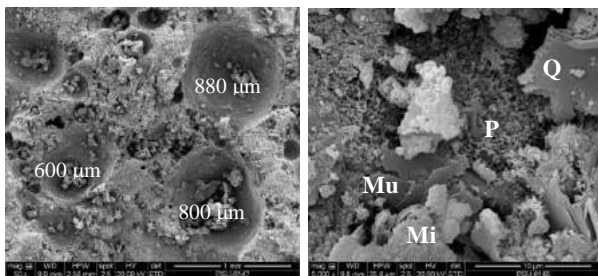


รูปที่ 13 เส้นกราฟ XRD ของคอนกรีตโพลีที่ซุคอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:60 และ 1:70

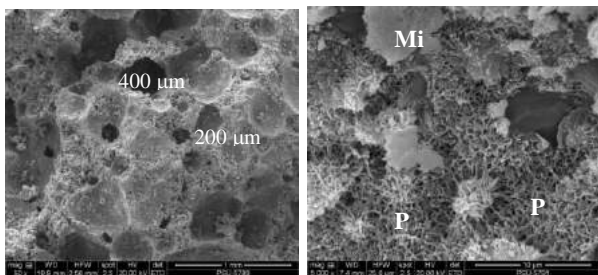
3.7 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) ของตัวอย่างคอนกรีตโพลีผสมทรายต่อหางแร่ดินขาวร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาก่อฟอง 1:60 และ 1:70 เปรียบเทียบที่กำลังขยาย 50 เท่า อัตราส่วนน้ำต่อ

น้ำยาก่อฟอง 1:60 มีฟองอากาศขนาดตั้งแต่ 30 – 880 ไมครอน กระจายตัว (รูปที่ 14) รูฟองเล็ก ในขณะที่ตัวอย่างผสมอัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาก่อฟอง 1:70 ทำให้เกิดรูฟองมีขนาดแต่ตั้งแต่ 10 – 400 ไมครอน (รูปที่ 15) กระจายตัวมากขึ้น รูฟองตื้น และมีขนาดเล็กลง โครงสร้างต่างกันมีผลต่อกำลังเช่นกัน [21] และรวมถึงสภาพการนำความร้อนด้วย [22] ด้วยขนาดฟองที่ใหญ่ส่งผลต่อกำลังอัด ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ [6,13,16] ส่วนผลึกแผ่นบางมีสโคไวต์ กิงปะการัง พอร์ตแลนด์ ดั้งในรูปที่ 14 และ 15



รูปที่ 14 ภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตโม่ที่อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:60



รูปที่ 15 ภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตโม่ที่อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70

3.8 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตโม่

บนพื้นฐานกำลังการผลิตนำร่อง 2,000 ก้อน ปัจจัยสำคัญมีผลต่อต้นทุนมากคือ พลังงาน พิจารณาการใช้ไฟฟ้า 1 หน่วยหรือ 1 ยูนิท คือ เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ใช้งาน 1 ชั่วโมง คิดจากกำลังไฟฟ้า

(วัตต์) ชนิดนั้น x จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า ÷ 1000 x จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานใน 1 วัน = จำนวนหน่วยหรือยูนิท ดังนั้นการอบไอน้ำแรงดันต่ำด้วยเตาไฟฟ้าขนาด 500 วัตต์ จำนวน 1 เครื่อง เปิดใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง ใช้งานวันละ (500x1÷1000) x 8 = 4 หน่วย ส่วนรายการค่าใช้จ่ายด้านอื่นอีกในการประกอบการผลิตคอนกรีตโม่มีดังต่อไปนี้ สรุปผลการคำนวณไว้ในตารางที่ 4

ทรายราคา 200 บาท/ลูกบาศก์เมตร

น้ำยาก่อฟอง 2,500 บาท/แกลลอน

น้ำประปาคิดอัตรา 9.50 บาท/ลูกบาศก์เมตร

ไฟฟ้าคิดอัตรา 2.5 บาท/ยูนิท

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ราคา 170 บาท/ถุง

ค่าแรงงานกรรมกร 300 บาท/วัน

ตารางที่ 4 การคำนวณต้นทุนการผลิตคอนกรีตโม่ หน่วยเป็น บาท

รายการค่าใช้จ่าย	ราคาต้นทุน บาท/ก้อน
ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1	1.52
น้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีน	1.25
ทรายละเอียด	0.40
น้ำประปา	0.16
ไฟฟ้า	1.11
หางแร่ดินขาว	0.0
รวม	4.44

4. สรุป

หางแร่ดินขาวและทรายที่ใช้ผลิตคอนกรีตโม่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.438 และ 2.262 หางแร่ดินขาวมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงในเกณฑ์สารปอซโซลาน แต่มีค่า LOI ค่อนข้างสูง และยังเป็นเนื้อผลึก (crystalline) จึงเฉื่อยในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปอซโซลาน

ผลการอบไอน้ำก่อนบ่มของคอนกรีตโฟม ช่วยให้คอนกรีตโฟมมีสีผิวขาวขึ้น ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตทุกอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำให้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตโฟมที่ใส่หางแร่ดินขาวร้อยละ 50 แต่การแทนที่ด้วยหางแร่ดินขาวล้วนส่งผลให้กำลังอัดลดลง ในทางตรงกันข้ามการใช้หางแร่ดินขาวแทนที่ทรายร้อยละ 50 ในอัตราส่วนของน้ำยาก่อฟองต่อน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงร้อยละ 2.97 ความหนาแน่นของคอนกรีตโฟมเฉลี่ยใช้น้ำยาก่อฟองต่อน้ำ 1:70 ได้ผลดีที่สุด ที่ใส่หางแร่ดินขาวร้อยละ 50 มีค่าความหนาแน่นน้อยสุด 952 กก./ม.³ และค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อใส่หางแร่ดินขาวล้วน มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 989 กก./ม.³ บ่ม 28 วัน

อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำ ส่งผลต่อความหนาแน่นและกำลังอัดคอนกรีตในแต่ละอัตราส่วนต่างกัน เมื่อใช้หางแร่ดินขาวล้วน และอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำร้อยละ 70 บ่มในบรรยากาศห้อง ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 40.62 กก./ซม.² จัดอยู่ในเกณฑ์ระดับ C9 C10 และ C12 [14] เหมาะสำหรับคอนกรีตมวลเบาแกนก่อ (masonry concrete) และเมื่อเพิ่มปริมาณทรายร้อยละ 50 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตโฟมเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำร้อยละ 50 อบไอน้ำก่อนบ่มให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 81.23 กก./ซม.² อยู่ในเกณฑ์ระดับ C14 และ C16 [14] จัดอยู่ในประเภทคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (structure lightweight concrete) และเมื่อใช้หางแร่ดินขาวแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 50 และอัตราส่วนน้ำยาก่อฟองต่อน้ำร้อยละ 70 บ่มอบไอน้ำให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 29.41 กก./ซม.² อยู่ในเกณฑ์ระดับ C9 C10 และ C12 [14] เหมาะสำหรับคอนกรีต

มวลเบาสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (insulating concrete)

การใช้วัสดุหางแร่ดินขาวทิ้งแล้วมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีตโฟม ช่วยประหยัดต้นทุนต่ำลงมาก อีกทั้งยังเป็นแนวทางช่วยลดมลภาวะสิ่งแวดล้อม และเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างประหยัดพลังงานและลดภาวะโลกร้อนอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทโครงการนักศึกษาประจำปี 2558 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตามสัญญาเลขที่ ENG-57-2-7-08-0203-S และขอขอบคุณบริษัทมินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด จังหวัดระนอง ที่ได้สนับสนุนตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัทมินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด, รายงานประจำปี 2556.
- [2] Y.H. Mugahed Amran, N. Farzadnia and A.A. Abang Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review" Construction and Building Materials, 101, Part 1: 990-1005, 2015.
- [3] E.P. Kearsley, and P.J. Wainwright, "Porosity and permeability of foamed concrete" Cement and Concrete Research, 31(5): 805-812, 2001a.

- [4] Z. Huang, T. Zhang, and Z. Wen, "Proportioning and characterization of Portland cement-based ultra-lightweight foam concretes" *Construction and Building Materials*, 79: 390–396, 2015.
- [5] M.R. Jones, and A. McCarthy, "Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete" *Fuel*, 84(11): 1398–1409, 2004.
- [6] E.K.K. Nambiar, and K. Ramamurthy, "Sorptions characteristics of foam concrete" *Cement and Concrete Research*, 37(9): 1341–1347, 2007
- [7] E.K.K. Nambiar, and K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete" *Cement and Concrete Research*, 37(2): 221-230, 2007
- [8] N.M. Ibrahim, S. Salehuddin, and R.C. Amat, N.L. Rahim, and T.N.T. Izhar, "Performance of lightweight foamed concrete with waste clay brick as coarse aggregate" *APCBEE Procedia*, 5: 497–501, 2013.
- [9] Z. Pan, H. Fujiwara, and T.W. Wee, "Preparation of high performance foamed concrete from cement sand and mineral admixtures" *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(2): 295-298, 2007
- [10] D.K. Panesar, "Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents" *Construction and Building Materials*, 44: 575–584, 2013.
- [11] พงศ์ภักดิ์ สุขสวัสดิ์ และพงษ์เทพ บุญคงทอง. "คอนกรีตโฟมผสมเถ้าไม้ยางพาราและเถ้าปาล์มน้ำมัน" รายงานโครงการงานวิศวกรรมเห มี อ ง แ ร้ MNE 1/2557 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2557.
- [12] C. Ma, and B. Chen, "Properties of a foamed concrete with soil as filler" *Construction and Building Materials*, 76: 61–69, 2015.
- [13] A.A. Hilal, N.H. Thom, and A.R. Dawson, "On entrained pore size distribution of foamed concrete"
- [14] มอก. 2601-2556. "คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ" สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม 2556.
- [15] มอก. 1505-2541. "ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ" สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม 2541.
- [16] ดนุพล ตันนโยภาส และอัครเดช ทองคำ. "การใช้ประโยชน์ทางแร่ดินขาวจากไฮโดรไซโคลนเป็นแร่ผสมเพิ่มในคอนกรีต" การประชุมวิชาการวิศวกรรม มอ. 2002, 3–7 กรกฎาคม 2545 หาดใหญ่ 2545.

- [17] American Society for Testing and Materials. "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete" ASTM C618. 2015.
- [18] E.P. Kearsley, and P.J. Wainwright, "The effect of porosity on the strength of foamed concrete" *Cement and Concrete Research*, 32(2): 233-239, 2002.
- [19] K. Ramamurthy, E.K.K. Nambiar, and G.I.S. Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete" *Cement and Concrete Composites*, 31(6): 388-396, 2009
- [20] E.K.K. Nambiar, and K. Ramamurthy, "Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology" *Cement and Concrete Composites*, 28(9): 752-760, 2006.
- [21] A. Just, and B. Middendorf, "Microstructure of high-strength foam concrete" *Materials Characterization*, 60(7): 741-748, 2009.
- [22] W. Chen, Y. Zhang, and M.R. Jones "Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete" *Construction and Building Materials*, 47: 1278-1291, 2013.