คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ากำลังสูงทำจากเพอร์ไลต์เผาขยาย

High–strength cellular lightweight concrete made from expanded perlite

คำภี จิตชัยภูมิ[1,*] และ ปริญญา จินดาประเสริฐ[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

**Corresponding author; E-mail address: khampeej@yahoo.com*

[2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

E-mail address: prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ากำลังสูงทำจากเพอร์ไลต์เผาขยายผสมกับโฟมเหลวชนิดเติมฟองอากาศ ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาประมาณ 800 kg/m^3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.6 คอนกรีตผ่านการบ่มไอน้ำเมื่อมีอายุ 1 วัน ภายในห้องควบคุมที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5 % ความดัน 2±1 kg/cm^2 เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่แข็งตัวแล้วได้ทำการทดสอบคุณสมบัติ กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง และ โครงสร้างระดับจุลภาค ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 1.8 – 3.1 MPa ซึ่งมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิบ่มไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 29 – 42 ลดลงตามตามอุณหภูมิบ่มไอน้ำที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: กำลังสูง, เพอร์ไลต์เผาขยาย, โฟม, คอนกรีตมวลเบา, ไอน้ำ

Abstract

This paper report on the physical properties of high–strength cellular lightweight concrete, made from expanded perlite mixed with pre–formed foam. Dry density of cellular lightweight concrete about 800 kg/m^3. The water–to–binder ratio was 0.6, the concrete has been cured with steam at age of 1 day in the temperature control room at 60 ° C, 80 ° C, and 100 ° C, relative humidity 80±5 %, and pressure of 2±1 kg/cm^2 for 12 hours. The properties of compressive strength, water absorption, drying shrinkage and microstructure were tested. The testing results founded that the compressive strength are between 1.8 – 3.1 MPa, which has higher compressive strength as the steam curing temperature increases. The water absorptions are between 29 – 42 % , which decreases with increasing steam curing temperature.

Keywords: high–strength, expanded perlite, foam, lightweight concrete, steam

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ หน่วยน้ำหนักเบา แข็งแรง และนำความร้อนต่ำ คอนกรีตมวลเบานำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้หลากหลาย เช่น ฉนวนกันความร้อนหลังคา วัสดุดูดซับเสียงภายในห้อง พื้นคอนกรีตเททับหน้า (topping) วัสดุถมคอสะพาน และ วัสดุอุดรูโพรง (void filling) เป็นต้น อาคารที่ก่อผนังด้วยคอนกรีตมวลเบาจะช่วยลดภาระการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง คอนกรีตมวลเบามีความแข็งแรงเทียบเท่าอิฐก่อสร้างสามัญ (อิฐมอญ) ที่ใช้กันมานานนับตั้งแต่สมัยโบราณ คอนกรีตมวลเบาช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคาร ทำให้ประหยัดไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศ นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังทำให้ผู้บริโภคได้รับประโยชน์ทางอ้อม คือ ลดเวลาในการก่อสร้าง งานแล้วเสร็จเร็ว เนื่องจากมีน้ำหนักเบา การทำงานในระหว่างยกประกอบ ติดตั้ง ทำได้ง่าย [1]

ประเภทของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (cellular lightweight concrete, CLC) แบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามขบวนการผลิต [2] แบบแรกเป็นระบบอบไอน้ำ (autoclaved aerated concrete, AAC) ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (หรือใช้ปูนขาว) ทราย ยิปซั่ม และ ผงอลูมิเนียม ซึ่งทำหน้าที่ขยายตัวกลายมาเป็นโฟมโดยอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (chemical expansion) สำหรับขบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าระบบอบไอน้ำนั้น เริ่มจากการผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันดีและรอให้คอนกรีตฟูขึ้นจากการขยายตัวของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดจากปูนขาวทำปฏิกิริยากับผงอลูมิเนียม เมื่อคอนกรีตผ่านการก่อตัวระยะปลายแล้วจะถูกนำไปบ่มไอน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูงในถังออโตเคลป (autoclave) เป็นเวลา 8 ถึง 10 ชั่วโมง เพื่อเร่งกำลังของคอนกรีตให้สามารถนำไปใช้งานได้เร็ว นอกจากนี้การอบไอน้ำยังมีผลดีทำให้ลดการหดตัวและความชื้นในเนื้อคอนกรีตลง แบบที่สองเป็นระบบเติมฟองอากาศ (PRE–FORMED FOAM METHOD) หรือโฟมคอนกรีต (foamed concrete) ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และ โฟมเหลว (liquid foam) หรือ โฟมแข็ง (physically foam) สำหรับขบวนการผลิตโฟมคอนกรีตนั้นเริ่มจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และ น้ำ ให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม ก่อนที่โฟมเหลวซึ่งเป็นสารเพิ่มฟอง (foaming agent) เจือจางกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดจะถูกทำให้เป็นฟองด้วยเครื่อง

กำเนิดโฟม (foam generator) โดยเตรียมไว้ก่อนแล้ว จากนั้นโฟมเหลวจะถูกฉีดผสมลงไปในคอนกรีตสดและผสมต่อไปอีกจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี จากนั้นคอนกรีตสดจะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยการเทเข้าแบบหล่อ หรือ ผ่านการตัดเมื่อคอนกรีตมีอายุประมาณ 4 ชั่วโมง โฟมคอนกรีตจะผ่านการบ่มชื้นด้วยอากาศโดยใช้แผ่นพลาสติกคลุมไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 2 สัปดาห์ คอนกรีตจึงจะมีความแข็งแรงพอที่จะนำไปใช้งานได้

เทคโนโลยี CLC ระบบอบไอน้ำได้เข้ามาในอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 เป็นต้นมา ส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ที่มีมูลค่าการลงทุนมากกว่า 10 ล้านบาท ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มักประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม โดยวางขายตามท้องตลาดทั่วไปเป็นชนิดก้อนที่เรียกว่า คอนกรีตบล็อกหรืออิฐมวลเบา ตามขนาดมาตรฐาน มอก. 1505–2541 คือ 7 × 20 × 60 เซนติเมตร (cm) มีรูปลักษณ์ภายนอกเป็นก้อนสีขาว (สีปูนขาว) เมื่อจะนำไปก่อผนังต้องใช้ปูนกาวและปูนฉาบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเท่านั้น ต่อมาเทคโนโลยี CLC ระบบเติมฟองอากาศได้ตามมาในปี พ.ศ. 2548 ส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมที่มีมูลค่าการลงทุนไม่เกิน 5 ล้านบาท ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกจำหน่ายนั้นเน้นรูปลักษณ์ภายนอกคล้ายกับ CLC ระบบอบไอน้ำ แต่แตกต่างกันที่ CLC ระบบเติมฟองอากาศมีลักษณะเป็นก้อนสีเทา (สีปูน) เมื่อจะนำไปก่อผนังอาจใช้ปูนกาว ปูนฉาบ สำหรับคอนกรีตมวลเบา หรือ ใช้ปูนก่อ ปูนฉาบทั่วไป

การเข้ามาของ CLC ในช่วงแรกยังไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคเท่าใดนัก เนื่องจากเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับตลาดภายในประเทศ อย่างไรก็ตามในช่วงหลังได้มีผลการวิจัยและการทดสอบเกี่ยวกับ CLC เผยแพร่ออกมาเป็นจำนวนมากด้วยคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ดูดซับเสียง การนำความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับอิฐมอญ หากนำไปก่อผนังพบว่าคอนกรีตมวลเบาเหมาะใช้งานกับสภาพอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศ ซึ่งอาคารที่ใช้งานจะได้รับประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ลดน้ำหนักบรรทุกต่อโครงสร้างอาคาร งานก่อเสร็จเร็ว อุณหภูมิภายในตัวอาคารต่ำ ซึ่งถ้าอาคารได้ติดตั้งเครื่องปรับอากาศร่วมด้วยจะทำให้ประหยัดพลังงานการใช้เครื่องปรับอากาศ ทำให้ CLC ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคกันอย่างแพร่หลายตามลำดับจนถึงปัจจุบัน ต่อมาค่าแรงขั้นต่ำได้มีการปรับตัวสูงขึ้นประกอบกับสภาวะเศรษฐกิจที่ชะลอตัวลง ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาชนิดก้อนก่อได้รับความนิยมลดลง เนื่องจากขบวนการติดตั้ง (ก่อ ฉาบ) ของคอนกรีตมวลเบาชนิดก้อนก่อต้องพึ่งพาแรงงานเป็นส่วนใหญ่ ประกอบกับมีจุดอ่อนในเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความไม่สม่ำเสมอในการผลิต โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ CLC ระบบเติมฟองอากาศ ซึ่งประสบปัญหาในเรื่องความแข็งแรง และ การหดตัวสูงของคอนกรีต อีกทั้งการผลิตที่ต้องรออายุบ่มนาน บางครั้งไม่ทันต่อความต้องการของตลาด ส่งผลกระทบต่อเนื่องไปยังผู้บริโภค อาทิเช่น ปัญหาคอนกรีตบล็อกมวลเบาแตกหักในระหว่างขนส่ง เมื่อนำไปก่อฉาบแล้วพบว่าผนังมักเกิดการแตกร้าวในภายหลัง ปัญหาดังกล่าวทำให้ภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ CLC ระบบเติมฟองอากาศด้อยกว่าระบบอบไอน้ำ เป็นเหตุให้เกิดผลกระทบแบบตีกลับ (feedback) มายังผู้ผลิต CLC ระบบเติมฟองอากาศ จนทำให้โรงงานผู้ผลิต CLC ระบบเติมฟองอากาศขนาดย่อมบางรายต้องปิดตัวลง สร้างความเสียหายต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ

ถึงแม้คอนกรีตมวลเบาที่เคยได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายจนถึงปี พ.ศ. 2555 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิดก้อนสำหรับก่อ แต่ภายหลังปี พ.ศ. 2555 เป็นต้นมาตลาดคอนกรีตมวลเบาได้ประสบปัญหา คอนกรีตมวลเบาแบบก้อนได้รับความนิยมลดลง เนื่องจากต้องพึ่งพาแรงงานในการก่อและฉาบผิว ประกอบกับสภาวะเศรษฐกิจที่ชะลอตัว รวมทั้งค่าแรงขั้นต่ำได้ปรับตัวสูงขึ้น ผู้รับเหมาก่อสร้างต้องแบกรับภาระต้นทุนค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้น โรงงานผู้ประกอบการที่ผลิตคอนกรีตมวลเบามีจำนวนเพิ่มขึ้น ทำให้มีการแข่งขันสูง ทั้งในด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์และราคา

เพอร์ไลต์เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการสลายตัวของหินภูเขาไฟ ชื่อว่าหินเพอร์ไลต์ ซึ่งเพอร์ไลต์ตามธรรมชาติยังไม่เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุปลูกจะต้องนำไปเผาที่อุณภูมิ 980 – 1,000 °C ก่อนเพื่อให้เพอร์ไลต์ขยายตัวเช่นเดียวกับเวอร์มิคูไลท์ เมื่อเผาแล้วเรียกว่า เพอร์ไลต์เผาขยาย มีความหนาแน่นประมาณ 95 – 145 kg/m^3 และขยายตัวออกไปได้ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพูมิซ สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้เรียกว่า เพอร์ไลต์ ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี เพอร์ไลต์เมื่อขยายตัวแล้วมี เสถียรภาพดี มีการยุบตัวน้อย ราคาไม่แพงนักจึงนิยมใช้กันแพร่หลายในประเทศที่มีแหล่งวัตถุดิบ [3]

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิก้าค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นๆ ได้ง่ายนัก จัดอยู่ในพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (diversification) เมื่ออายุของหินเพอร์ไลท์มากขึ้น ดังนั้นหินเพอร์ไลต์ที่มีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพเป็นผลึก เพอร์ไลต์ถูกนำมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณที่ผลิตได้ทั้งโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติ น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ความพรุนสูง และทนไฟ ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลต์จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซั่มแผ่นเรียบบาง เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงทะลุผ่านไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แห้งเร็ว โดยไม่เกิดรอยร้าวเนื่องจากคอนกรีตมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษา CLC ระบบเติมฟองอากาศอบไอน้ำภายใต้แรงดันต่ำให้มีกำลังสูงภายในระยะเวลาสั้น เพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นแผงผนังหล่อสำเร็จรูปพร้อมยกติดตั้งและก้อนคอนกรีตบล็อกมวลเบาสำหรับก่อผนังทั่วไป

อนึ่ง CLC ระบบเติมฟองอากาศมีจุดแข็งในด้านต้นทุนการผลิตต่ำ การประยุกต์ใช้งานทำได้หลากหลาย ผู้ประกอบการสามารถแข่งขันตลาดได้เมื่อเทียบกับ CLC ระบบอบไอน้ำแรงดันสูง

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของ CLC ระบบเติมฟองอากาศทำจากเพอร์ไลต์เผาขยาย (expanded perlite, EP) ผสมกับสารเพิ่มฟองอากาศ ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาประมาณ 800 kg/m^3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (binder, b) เท่ากับ 0.6 บ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5 % ความดัน 2±1 kg/cm^2 เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังทดสอบคุณสมบัติ การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง และ โครงสร้างระดับจุลภาค ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

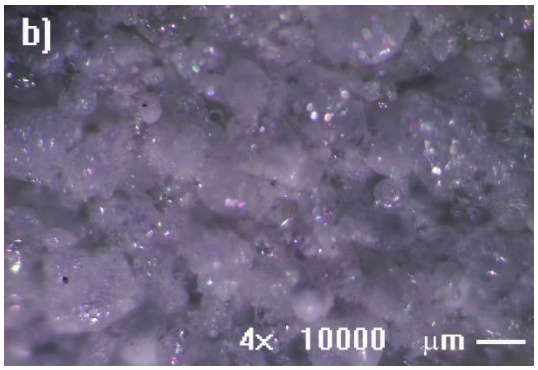
3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ordinary Portland cement, OPC) จากบริษัทแห่งหนึ่งในประเทศไทย ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ความละเอียดของเม็ดซีเมนต์จากการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลน (Blaine's fineness modulus) เท่ากับ 3,620 g/cm^2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสะสมที่ร้อยละ 50 หรือ d_{50} ของเม็ดปูนซีเมนต์จากการทดสอบด้วยวิธี Laser Particle Analyzer เท่ากับ 8.82 µm

เพอร์ไลต์เผาขยาย (expanded perlite, EP) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นหินเพอร์ไลต์ดิบผ่านการบดละเอียดและผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจนเกิดการขยายตัว มีลักษณะสีขาว (รูปที่ 1a) เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าโปร่งแสง เนื้อภายในเป็นโพรง ดังรูปที่ 1b มีหน่วยน้ำหนักแห้งสภาพหลวมเท่ากับ 175 kg/m^3 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.98 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยสะสมที่ร้อยละ d_{50} เท่ากับ 45.0 µm ความละเอียดของเม็ด EP จากการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลนเท่ากับ 4,168 g/cm^2 เพอร์ไลต์เผาขยาย**ได้มาจากแหล่งแร่เพอร์ไลต์บนเขาพนมฉัตร ตั้งอยู่ ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี**

สารเพิ่มฟอง (foaming agent) ที่ใช้ในการศึกษา เป็นสารเพิ่มฟองสังเคราะห์ชนิดประจุลบ ภายหลังเจือจางน้ำ (water, w) และเมื่อฉีดออกจากปืนฉีดของเครื่องสร้างฟองจะขยายตัว ให้ฟองในปริมาณมาก ความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยของฟองเหลวเท่ากับ 65 kg/m^3 ลักษณะฟองเหลวดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เม็ดเพอร์ไลต์เผาขยาย a) ภาพถ่ายปกติ b) ภาพขยาย

รูปที่ 2 ฟองเหลว

3.2 ปฏิภาคส่วนผสม

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ได้ใช้เพอร์ไลต์เผาขยายแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10, และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน (binder, b) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 ควบคุมความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตเท่ากับ 800 kg/m^3

ในการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตได้กำหนดความหนาแน่นแห้ง (oven-dry density) คงที่ไว้ ส่วนน้ำที่ผสมคอนกรีตถือว่า 20 % ของน้ำหนักซีเมนต์ต้องทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กลายเป็นของแข็งหรือซีเมนต์เจล ฉะนั้นถ้าต้องการความหนาแน่นแห้งที่ 800 kg/m^3 ปริมาณปูนซีเมนต์จึงเท่ากับ 666.7 กิโลกรัม ต่อคอนกรีต 1 m^3 เพราะว่าน้ำหนักคอนกรีตส่วนหนึ่งมาจากน้ำหนักน้ำเท่ากับ $(20\times800)/(100+20)=133.3$ กิโลกรัม ทั้งนี้ความหนาแน่นของคอนกรีตสัมพันธ์กับปริมาณโพรงอากาศ (air pores) ที่ได้จากปริมาณฟองเหลวที่จะฉีดใส่เข้าไป ซึ่งมาจากการแก้สมการที่ 1 และปฏิภาคส่วนผสมของ CLC แสดงไว้ในตารางที่ 1

$$D_d = \frac{W_w + W_c + W_f}{\left[(W_w/1000)+(W_c/3.15\times1000)+V_f\right]} \quad (1)$$

เมื่อ D_d คือ Design density of cellular lightweight concrete มีหน่วยเป็น kg/m^3, W_w คือ Weight of water มีหน่วยเป็น kg, W_c คือ

Weight of cement มีหน่วยเป็น kg, W_f คือ Weight of foam required มีหน่วยเป็น kg, V_f คือ Volume of foam required มีหน่วยเป็น m^3

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

No.	Specimen	% Poz	Mix proportion (kg/m³)						w/b
			Binder (b)		Water (w)			f	
			OPC	EP	for paste	for foam	total		
1	0.6D800CON	-	666.67	-	353	46	399	1.14	0.6
2	0.6D800EP5	5	633.37	33.34	355	44	399	1.11	0.6
3	0.6D800EP10	10	600.03	66.67	356	43	399	1.11	0.6
4	0.6D800EP20	20	533.36	133.34	359	40	399	1.00	0.6

หมายเหตุ

- OPC = ordinary Portland cement, EP = expanded perlite, CON = control mix, w/b = water-to-binder ratio, D = dry density, S = sand, f = foaming agent, Poz = pozzolan, paste = cement paste
- SG_{EP} = 0.98, SG_{OPC} = 3.15, f : w = 1 : 40, foam density = 65 kg/m^3

3.3 การผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

การผลิต CLC ทำได้โดยเตรียมวัสดุผสม ปูนซีเมนต์ เพอร์ไลต์เผาขยายชั่งน้ำหนัก โดยแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกนำปูนซีเมนต์และเพอร์ไลต์เผาขยายมาผสมกันในถุงพลาสติกให้วัสดุทั้งสองเข้ากัน พร้อมทั้งเตรียมน้ำไว้คอยผสม ส่วนที่สองนำน้ำเจือจางสารเพิ่มฟองในอัตราส่วนน้ำต่อสารเพิ่มฟอง 1 : 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นเทลงในถังสำหรับให้เครื่องสร้างฟองดูด จากนั้นทดสอบความหนาแน่นของฟองเหลวโดยการฉีดลงบนถังความจุ 20 ลิตร ทำการชั่งน้ำหนักฟองพร้อมทั้งบันทึกค่ามีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) นำค่าที่ได้หารด้วยปริมาตรถัง มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) ค่าที่ได้คือความหนาแน่นของฟองเหลวมีหน่วยเป็น kg/m^3 ทำเช่นนี้ถึง 3 ครั้ง จากนั้นนำค่ามาเฉลี่ยกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมของ CLC

การผสมคอนกรีตเริ่มจากเทน้ำที่เตรียมไว้ลงไปในเครื่องผสมเป็นอันดับแรก จากนั้นเทปูนซีเมนต์และเพอร์ไลต์เผาขยายลงไป ผสมต่อไปจนส่วนผสม (w + OPC + EP) เข้ากันดี เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว จึงฉีดฟองเหลวจากปืนฉีดของเครื่องสร้างฟองลงไปในเครื่องผสมคอนกรีต เมื่อส่วนผสมทั้งหมด (w + OPC + EP + foam) เข้ากันดีจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเทส่วนคอนกรีตสดลงแบบหล่อก้อนตัวอย่าง (mold) ขนาดต่าง ๆ จากนั้นปล่อยไว้ 24±2 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบออก นำไปบ่มโดยการห่อด้วยแผ่นพลาสติกใสสำหรับส่วนผสมควบคุม (control mixture) หรือนำไปบ่มไอน้ำสำหรับส่วนผสมที่บ่มภายใต้อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5 %

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ของ CLC ทำได้โดยหล่อแท่งทดสอบคอนกรีตมวลเบาด้วยแบบหล่อมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร (cm) สูง 30 เซนติเมตร (cm) โดยตักหรือเทคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อหรือโมลด์ (mold) ดังกล่าว พร้อมทั้งเคาะข้างแบบเล็กน้อย ปาดผิวคอนกรีตให้เรียบเสมอขอบ ปิดทับด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำระเหยออก ปล่อยไว้ 24±4 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออก จากนั้นห่อแท่งทดสอบด้วยแผ่นพลาสติกหรือนำไปบ่มในห้องบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นตามที่กำหนด จนกระทั่งถึงวันทดสอบกำลัง โดยอัตราการให้แรงกดบนแท่งทดสอบอยู่ระหว่าง 0.14 – 0.34 MPa/วินาที วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 39 (2003) [4]

3.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของ CLC ทำได้โดยเอาก้อนตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 cm ที่มีอายุ 3 วัน จำนวน 3 ก้อน แช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงเอาออกจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินที่ผิว พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้เป็นน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาและน้ำหนักของน้ำที่ซึมเข้าไป จากนั้นนำก้อนตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 110±5° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะนำก้อนตัวอย่างออกจากเตาอบ ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจึงชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้เป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำค่าที่ได้คำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำในสมการที่ 2 การดูดซึมน้ำของแต่ละก้อนนำมาเฉลี่ยกันจำนวน 3 ก้อน ตัวอย่าง วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 642 [5]

$$Water\ absorption(\%) = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{W_{dry}} 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_{sat} คือน้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำชั่งในอากาศ, และ W_{dry} คือน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง

3.4.3 การทดสอบความพรุน

การทดสอบความพรุน (porosity) แต่เดิมที่ใช้เทคนิคการแทนที่ช่องว่างด้วยปรอทภายใต้ระบบสุญญากาศตามวิธีการทดสอบของ Gaafar [6] โดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความพรุนแบบอิ่มตัวด้วยน้ำในระบบสุญญากาศ ซึ่งวิธีการทดสอบคล้ายกับที่พัฒนาโดย Cabrera and Lynsdale [7] ทำได้โดยการเอาก้อนตัวอย่างของคอนกรีตมวลเบาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัดให้มีขนาด 3 × 3 × 1.5 cm อบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งชั่งน้ำหนัก จากนั้นทำให้ก้อนตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำในภายใต้ระบบสุญญากาศแล้วชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้แทนค่าลงไปในสูตรสมการที่ 3 เพื่อหาค่าความพรุน

$$Porosity\ (\%) = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{(W_{sat} - W_{wat})} 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_{sat} คือน้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำชั่งในอากาศ, W_{wat} คือน้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำชั่งในน้ำ, และ W_{dry} คือน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง

3.4.4 การทดสอบการหดตัวแห้ง

การทดสอบการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของ CLC ทำได้โดยการหล่อคอนกรีตมวลเบาด้วยแบบหล่อมาตรฐานขนาด 75 × 75 × 285 มิลลิเมตร (mm) พร้อมติดตั้งหัวปุ่ม (stud) เพื่อหาค่าการหดตัวแห้งเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง ภายหลังถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวมาตรฐานคงที่ (285 mm) ซึ่งจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 23±2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50±2

% ทำการวัดความยาวของแท่งตัวอย่างจำนวน 3 แท่ง เป็นเวลา 3, 7, 28, 60, และ 90 วัน นับจากวันที่ปล่อยให้หดตัวแห้ง

ค่าความยาวที่วัดได้ที่อายุต่าง ๆ สามารถนำไปคำนวณค่าอัตราความเครียด (strain) ของการหดตัวแห้ง ได้จากสมการที่ 4

$$\Delta L = \frac{L - L_i}{L_g} \quad (4)$$

เมื่อ ΔL คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือหดตัวแห้ง มีหน่วยเป็น mm/mm, L คือ ความยาวของแท่งตัวอย่างที่อายุต่าง ๆ มีหน่วยเป็น mm, L_i คือ ความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่างมีหน่วยเป็น mm, L_g คือ Gauge length เท่ากับ 250 mm

3.4.5 การบ่มไอน้ำ

การบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ (low pressure steam curing) ทำได้โดยแกะก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24±2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มไอน้ำภายใต้แรงดันต่ำที่ความดันไม่เกิน 0.2±0.1 MPa ที่อุณหภูมิสูงสุดระหว่าง 60 °C ถึง 100 °C เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง ซึ่งการให้อุณหภูมิแก่ตัวอย่างมีขบวนการเพิ่ม การคงที่ และการลดอุณหภูมิเป็น 3 ช่วงเวลา ดังนี้

ช่วงที่ 1 เพิ่มไอน้ำให้กับคอนกรีตอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/ชั่วโมง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุดตามที่กำหนด

ช่วงที่ 2 รักษาอุณหภูมิสูงสุดของไอน้ำให้คงที่จนกระทั่งใกล้จะสิ้นสุดการบ่มก่อน 1 ชั่วโมง จึงหยุดการให้ความร้อน

ช่วงที่ 3 ปล่อยให้อุณหภูมิลดลง จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้อง

4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ส่วนผสมต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 เมื่อนำไปผลิตคอนกรีต พบว่าส่วนผสม 0.6D800EP20 ไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็น CLC ได้เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอที่ทำให้ความข้นเหลวของคอนกรีตเพียงพอต่อความสามารถไหลได้ (flowability)

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC แสดงในตารางที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดบ่มอุณหภูมิห้องปกติที่ 28 วัน สำหรับส่วนผสม 0.6D800CON เท่ากับ 2.80 MPa ส่วนกำลังรับแรงอัดบ่มอุณหภูมิห้องปกติที่ 28 วัน ของส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย EP ในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 เท่ากับ 2.79 MPa และ 2.44 MPa สำหรับส่วนผสม 0.6D800EP5 และ 0.6D800EP10 ตามลำดับ ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ EP ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง (ตารางที่ 1)

กำลังรับแรงอัดของ CLC ที่ผ่านการอบหรือบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60° C เท่ากับ 1.76, 1.94, และ 1.82 MPa สำหรับส่วนผสม 0.6D800CON, 0.6D800EP5, และ 0.6D800EP10 ตามลำดับ ซึ่งส่วนผสม0.6D800EP5 ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม 0.6D800EP10 ส่วนกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 80° C เท่ากับ 2.22, 2.47, และ 2.32 MPa สำหรับส่วนผสม 0.6D800CON, 0.6D800EP5, และ 0.6D800EP10 ตามลำดับ ซึ่งส่วนผสม 0.6D800EP5 ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม 0.6D800EP10 เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคและปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

กำลังรับแรงอัดของ CLC ที่ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° C เท่ากับ 2.71, 3.05, และ 2.86 MPa สำหรับส่วนผสม 0.6D800CON, 0.6D800EP5, และ 0.6D800EP10 ตามลำดับ ซึ่งส่วนผสม0.6D800EP5 มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดกว่าส่วนผสม 0.6D800EP10 เช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ 60° C และ 80° C เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคทำให้คอนกรีตได้ผลิตภัณฑ์ C–S–H ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับส่วนผสม 0.6D800EP10 ที่ให้กำลังอัดต่ำกว่า 0.6D800EP5 นั้น ขอแนะนำว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย EP ในระดับปริมาณร้อยละ 10 สำหรับ w/b = 0.6 เพราะว่า EP มีปริมาณไม่พอเหมาะ (ปริมาณมากเกินไป)

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิอบไอน้ำต่อกำลังรับแรงอัดของ CLC พบว่ากำลังคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° C ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 80° C และ 60° C เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคให้ประสิทธิผลดีในอุณหภูมิและความชื้นสูง

ตารางที่ 2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

No.	Symbol	% Poz	Compressive strength (MPa)			
			Ambient room at 28 days	Steam curing for 12 hours		
				60 °C	80 °C	100 °C
1	0.6D800CON	-	2.80	1.76	2.22	2.71
2	0.6D800EP5	5	2.79	1.94	2.47	3.05
3	0.6D800EP10	10	2.44	1.82	2.32	2.86
4	0.6D800EP20	20	-	-	-	-

4.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของ CLC บ่มในอุณหภูมิห้องปกติที่อายุ 28 วัน และ บ่มในตู้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C พบว่าการดูดซึมน้ำลดลงตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำของ CLC บ่มปกติที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มไอน้ำ การดูดซึมน้ำของ CLC อยู่ระหว่าง 29 % – 42 % คล้ายผลงานวิจัยที่พบโดย Kunhanandan and Ramamurthy (2007) [8]

ตารางที่ 3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

No.	Symbol	% Poz	Water absorption (%)			
			Ambient room at 28 days	60 °C	80 °C	100 °C
1	0.6D800CON	-	33.1	42.0	39.5	37.9
2	0.6D800EP5	5	29.1	36.4	34.0	32.0
3	0.6D800EP10	10	30.8	37.6	35.6	33.5

4.3 ผลการทดสอบความพรุน

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบความพรุนรวมของ CLC บ่มปกติที่อายุ 28 วัน และบ่มในตู้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60° C, 80° C, และ 100° C ความ

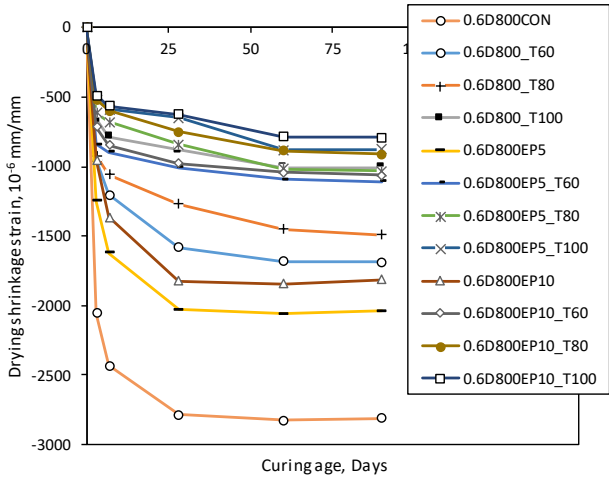
พรุนรวมของ CLC บ่มปกติที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าความพรุนของ CLC บ่มไอน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าความพรุนรวมสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำ โดยการดูดซึมน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้น ค่าความพรุนรวมของ CLC อยู่ระหว่าง 33 % – 45 % คล้ายผลงานวิจัยที่พบโดย Kearsley and Wainwright (2001) [9]

ตารางที่ 4 ความพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

No.	Symbol	% Poz	Total porosity (%)			
			Ambient room at 28 days	60 °C	80 °C	100 °C
1	0.6D800CON	-	37.0	45.2	42.0	40.0
2	0.6D800EP5	5	33.0	39.0	37.7	35.5
3	0.6D800EP10	10	35.0	39.9	38.8	36.0

4.4 ผลการทดสอบการหดตัวแห้ง

ผลการทดสอบการหดตัวแห้งของ CLC พบว่ามีอัตราการหดตัวมากในช่วงอายุต้น การหดตัวเริ่มลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นเกือบคงที่ในช่วงอายุปลาย โดยส่วนผสมควบคุม (0.6D800CON) มีอัตราการหดตัวสูงสุดในทุกส่วนผสม ดังรูปที่ 3 เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในช่องว่างซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการดูดซึมน้ำ (ตารางที่ 3) และความพรุน (ตารางที่ 4) อย่างไรก็ตามการหดตัวของ CLC มีอัตราการหดตัวที่ลดลงเมื่อคอนกรีตได้ผ่านการอบไอน้ำแล้ว โดยส่วนผสม 0.6D800EP10 อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° C ให้อัตราการหดตัวต่ำสุดในทุกส่วนผสม นี้เป็นเพราะว่าผลของปริมาณปูนซีเมนต์ ความชื้น และอุณหภูมิบ่ม



รูปที่ 3 อัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

5. สรุปผลการศึกษา

การผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าโดยใส่ EP แทนที่ซีเมนต์ในระดับปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 20 % โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน สำหรับ w/b เท่ากับ 0.6 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า 800 kg/m^3 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ใส่ EP แทนที่ปูนซีเมนต์อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° C ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60° C, 80° C, เล็กน้อย และ บ่มปกติ 28 วัน ซึ่งการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60° C และ 80° C ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าบ่มปกติที่อายุ 28 วัน ส่วนการบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° C ของส่วนผสมควบคุมให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าลดลงตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าบ่มปกติอายุ 28 วัน ต่ำกว่าการบ่มด้วยไอน้ำ การดูดซึมน้ำสัมพันธ์กับความพรุน คือ การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้น

การบ่มด้วยไอน้ำช่วยทำให้ลดการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าลง โดยส่วนผสมที่ใส่ EP แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 ให้อัตราการหดตัวแห้งต่ำสุดในทุกส่วนผสม

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2561 ประเภททุนเสริมสร้างงานวิจัยภาคอุตสาหกรรม (Supporting Research Funds for Industry ,SuRF) สัญญาทุนเลขที่ RDG6150052

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่ 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ให้ความอนุเคราะห์สถานที่วิจัย

ห้างหุ้นส่วนจำกัด คลองยาง ตำบลมหาโพธิ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี และบริษัท ไทยทริดีไมท์ เลขที่ 108/1 หมู่ 10 ถนนพุแค-แก่งคอย ตำบลสองคอน อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ให้ความอนุเคราะห์เพอร์ไลต์เผาขยาย

เอกสารอ้างอิง

[1] สุขสงญาติ, ก., ชัยสายัณห์, อ., จันทน์กะพ้อ, อ., จันทวงษ์, ป., วิมานจันทร์, ว. และ นามประกาย, พ. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างบ้านที่ใช้ผนังอิฐมอญกับผนังมวลเบาด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติทางความร้อน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 17(2), 9.

[2] Just, A., and Middendorf, B. (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characterization*. 60(7): 741–748.

[3] ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2551). *การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา.* ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ประเทศไทย.

[4] ASTM C 39 (2003) "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" *American Society for Testing and Materials, Philadelphia*.

[5] ASTM C 642 (1997). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.*

[6] Gaafar B.A., The effect of environmental curing conditions on the gas and water permeability of concrete. *Ph.D. Thesis Department of Civil Engineering, University Leeds*, UK, 1995.

[7] Cabrera J.G. and Lynsdale C.J., A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete. *Management and Concrete Research*, 1988. 40 (144) p. 177–182.

[8] Kunhanandan Nambiar, E. K., and Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and Concrete Research.* 37(9): 1341–1347.

[9] Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*. 31(5): 805–812.