วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การประเมินค่าการนำความร้อนและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อุณหภูมิความร้อนแตกต่างกัน

Evaluation of thermal conductivity and compressive strength of cellular lightweight concrete with various heating temperatures

ธนภร ทวีวุฒิ* นท แสงเทียน อิทธิพงศ์ พันธ์นิกุล วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Thnabhorn Thaveevouthti* Note Sangtian Ittipong Phannikul Wiwat Puatasananon

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: thanabhorn.t@ubu.ac.th; Telephone: 0 4535 3375

วันที่รับบทความ 11 พฤศจิกายน 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 8 พฤษภาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ 3 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นมอร์ต้าที่ผสมฟองอากาศหรือโฟมเหลวคงรูปให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบ เพื่อลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าขึ้นกับค่าหน่วยน้ำหนัก คอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศมากมีความพรุนสูง น้ำหนักเบา ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะต่ำ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ถูกออกแบบและผลิตเพื่อศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดเมื่อคอนกรีตได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.164 – 0.255 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน (2) ค่ากำลังรับแรงอัดคงเหลือเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส อยู่ที่ประมาณร้อยละ 91, 76, 52, 28 และ 17 ตามลำดับ

คำสำคัญ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า คอนกรีตโฟม การนำความร้อน กำลังรับแรงอัด การทนความร้อน

Abstract

Cellular lightweight concrete is mortar mixed with preserved air bubbles or foam liquid distributed in concrete instead of coarse aggregate in order to reduce the concrete unit weight. The properties of cellular lightweight concrete vary with unit weights. Concrete with great amount of bubbles given high porous and light weight provides low thermal conductivity. Cellular lightweight concrete with unit weights of 1600 and 1800 kilograms per cubic meter using water to cement ratio of 0.45 and 0.55 and sand to cement ratio of 2:1 and 3:1 were designed and produced for the study of thermal conductivity and the remained compressive strength after heating at various temperatures. The results are as follows: (1) the thermal conductivity coefficient ranged from 0.164 to 0.255 watts per meter Kelvin and (2) the average remained compressive strength after heating at temperature of 200, 400, 600, 800 and 1000 degrees are approximately 91, 76, 52, 28 and 17 percent, respectively.

Keywords

cellular lightweight concrete; foam concrete; thermal conductivity; compressive strength; heat resistance

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (cellular lightweight concrete) เป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของโฟมเหลวที่ใส่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบ โฟมเหลวนี้ถูกฉีดเข้าไปผสมกับทราย ปูนซีเมนต์และน้ำ เมื่อคอนกรีตแห้งจะพบฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต น้ำหนักของคอนกรีตขึ้นกับปริมาณโฟมเหลวที่ใส่เข้าไป ดังนั้นลักษณะเด่นของคอนกรีตชนิดนี้ คือ มีหน่วยน้ำหนักเบา [1-3] ค่าหน่วยน้ำหนักอาจเริ่มได้ตั้งแต่ 300 ไปจนถึง 1920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [4-5] ในปี 2541 ประเทศไทยได้เริ่มมีการกำหนดมอก.1505-2541 มาตรฐานสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบามีฟองอากาศ-อบไอน้ำ และ ในปี 2556 ก็ได้มีมาตรฐานสำหรับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ- มอก. 2601-2556 [6] ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับหน่วยน้ำหนักและอัตราการดูดซึมน้ำ ด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตมวลเบา ก่อให้เกิดความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ มีค่าประมาณ 0.089-0.132 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน [7-9] คอนกรีตมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 800 ถึง 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.113-0.566 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล [10-11] ส่วนอิฐมอญมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 1.15 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน [7] ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตทั่วไป ตามราชกิจจานุเบกษา แสดงไว้ที่ประมาณ 1.442 วัตต์ต่อเมตรเคลวิล ส่วนคอนกรีตชนิดเบาความหนาแน่น 960, 1120 และ 1280 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.303, 0.346, 0.476 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน ตามลำดับ [12]

ผลงานวิจัยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ในช่วงหน่วยน้ำหนัก 300-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดอาจแปรผันได้ตั้งแต่ช่วงประมาณ 10-250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [9-10, 13-14] ที่ค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างลูกบาศก์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน มีค่าระหว่าง 66-113.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [15]

เนื่องจากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการทนความร้อนของคอนกรีตของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก บทความนี้นำเสนอการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ สภาพปกติ และ กรณีคอนกรีตได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ที่ค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ0.55 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 และ โดยบ่มแห้งในอากาศที่อายุ 28 วัน เพื่อศึกษาแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

2. การทดสอบวัสดุผสมและการผลิต

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ต้องเตรียมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ประกอบด้วย (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 (2) ทรายสะอาด (3) น้ำสะอาด และ(4) น้ำยาสร้างฟองโฟม

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ (รูปที่ 1) ประกอบด้วย (1) โม่ผสมคอนกรีต (2) เครื่องผลิตโฟมเหลว (3) แบบหล่อคอนกรีตขนาด 30x30x2.5 เซนติเมตร และแบบหล่อลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร และ (4) เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต การทดสอบการนำความร้อน เครื่องอบ

รูปที่ 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

2.3 การเตรียมมวลรวมละเอียด

(1) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการดูดซึมน้ำของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C128 - Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate [16] เพื่อใช้ในการออกแบบปริมาณส่วนผสม ในที่นี้ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย อยู่ที่ประมาณ 2.6 และความสามารถในการดูดซึมน้ำมีค่าร้อยละ 1.6

(2) ทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย (FM.) ในการศึกษานี้ใช้ทรายที่มีค่า FM. อยู่ในช่วง 2.2-2.5 [17]

(3) ทดสอบหาความชื้นของทราย ดำเนินการทุกครั้งที่ผลิตคอนกรีตเพื่อใช้คำนวณปริมาณส่วนผสม

2.4 การเตรียมน้ำยาสร้างฟองโฟมและสารผสมเพิ่ม

(1) การเตรียมน้ำยาสร้างฟองโฟมใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 50 แล้วทดสอบหาอัตราการขยายตัวของปริมาตรน้ำยาโฟม พบว่ามีค่าประมาณ 43 เท่า และ อัตราการไหลของโฟมเหลว อยู่ที่ประมาณ 1.3 ลิตรต่อวินาที

(2) เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลว โดยต่อเครื่องอัดอากาศเข้ากับถังรับแรงดันสำหรับผสมน้ำยาสร้างฟองโฟม ใช้น้ำยากับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 50 ใส่ลงในถังรับแรงดันและปรับแรงดันให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.4-0.6 MPa

2.5 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การศึกษานี้ผลิตคอนกรีตทั้งหมด 8 สูตรส่วนผสม รายละเอียดสูตรส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1 บ่มคอนกรีตแห้งในอากาศตามอายุการทดสอบ ซึ่งการบ่มแห้งในอากาศนี้สามารถใช้ได้กับการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตได้ [18-20]

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ลำดับ	หน่วยน้ำหนักออกแบบ(กก./ลบ.ม.)	S/C	W/C	ปริมาณการฉีดฟองโฟม (วินาที) *
1	1800	2:1	0.45	146.86
2	1800	3:1	0.45	165.21
3	1800	2:1	0.55	126.42
4	1800	3:1	0.55	148.85
5	1600	2:1	0.45	211.26
6	1600	3:1	0.45	227.6
7	1600	2:1	0.55	193.07
8	1600	3:1	0.55	213.05

*หมายเหตุสำหรับการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

3. การทดสอบ

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและกำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า อายุ 28 วัน

3.1 การทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C 177 Standard Test Method for Steady- State Thermal Transmission by Mean of The Guarded Hot Plate [21] มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

การเตรียมชิ้นทดสอบจากตัวอย่างแผ่นคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร มิลลิเมตร สูตรละ 5 ตัวอย่าง ที่บ่มแห้งในอากาศ 28 วัน

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$k = \frac{QL}{A(T_h - T_c)} \quad (1)$$

เมื่อ

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านผนัง (หน่วยวัตต์)

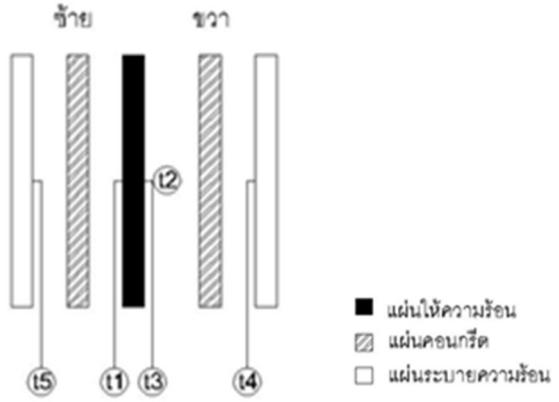
k = ค่าการนำความร้อนของผนัง (หน่วยวัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน)

A = พื้นที่ของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางไหลของความร้อน (หน่วยตารางเมตร)

L = ความหนาของผนัง (หน่วยเมตร)

T_h= อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านร้อน (หน่วยองศาเซลเซียสหรือองศาเคลวิน)

T_c = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น (หน่วยองศาเซลเซียสหรือองศาเคลวิน)



รูปที่ 2 การทดสอบการนำความร้อน

โดยที่ T1, T2, T3, T4 และ T5 คือตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ

วิธีการทดสอบดำเนินการโดย นำตัวอย่างที่บ่มครบ 28 วัน ไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของคอนกรีตทั้งสองตัวอย่างที่จะทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบติดตั้งกับเครื่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบโดยกำหนดให้อุณหภูมิแผ่นทำความร้อนส่วนกลางและส่วนอบแตกต่างไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส การวัดค่าอุณหภูมิประกอบด้วย 5 จุด (รูปที่ 2) ได้แก่ จุดกลางแผ่นทำความร้อนส่วนกลางด้านละ 1 จุด แผ่นทำความร้อนส่วนขอบ 1 จุด และจุดกลางแผ่นระบายความร้อนด้านละ 1 จุด แล้วนำตัวอย่างทดสอบประกอบเข้ากับเครื่องมือทดสอบ โดยนำไปประกบเข้ากับแผ่นให้ความร้อนและแผ่นระบายความร้อน ให้ขันแผ่นเหล็กเพื่อยึดแน่นชุดวัสดุทดสอบเข้าด้วยกันบันทึกค่าอุณหภูมิ ความต้านทานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทุก 30 นาที จนกระทั่งการถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาวะคงตัว โดยสังเกตจากอุณหภูมิทุกจุดจะคงที่ จากนั้นทำการทดสอบต่อไปอีก 1-2 ชั่วโมง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิขณะคงที่ แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

3.2 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อุณหภูมิความร้อนต่างกัน

การทดสอบการทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (รูปที่ 3) โดยการผลิตตัวอย่างทดสอบขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ที่บ่มแห้งในอากาศ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิเผา 3 ตัวอย่าง โดยใช้เวลาในการให้ความร้อน 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งตัวอย่างเย็นตัวในอากาศ ก่อนนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด [22] ต่อไป

รูปที่ 3 การทดสอบการทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4. ผลการศึกษา

ผลการทดสอบการนำความร้อนและการทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า นำเสนอในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

4.1 ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากผลการทดสอบการนำความร้อนทั้งหมด พบว่าคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.255 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรที่ 2 มีหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ คอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.164 วัตต์ต่อเมตร องศาเคลวิน พบที่สูตรที่ 7 มีหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 รายละเอียดข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์/(เมตรxองศาเคลวิน) ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์/(เมตรxองศาเคลวิน) ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร				
สูตรที่	**1**	**2**	**3**	**4**
S:C	**2:1**	**3:1**	**2:1**	**3:1**
W/C	**0.45**	**0.45**	**0.55**	**0.55**
1	0.221	0.231	0.226	0.229
2	0.208	0.231	0.258	0.225
3	0.188	0.274	0.213	0.233
4	0.197	0.265	0.217	0.250
5	0.211	0.281	0.231	0.240
6	0.255	0.251	0.251	0.219
เฉลี่ย	0.213	0.255	0.233	0.233

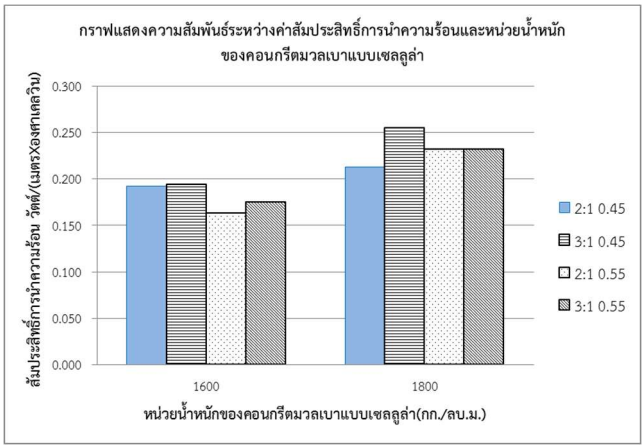
ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์/(เมตรxองศาเคลวิน) ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์/(เมตรxองศาเคลวิน) ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร				
สูตรที่	5	6	7	8
S:C	2:1	3:1	2:1	3:1
W/C	0.45	0.45	0.55	0.55
1	0.193	0.213	0.156	0.166
2	0.182	0.195	0.154	0.166
3	0.189	0.191	0.174	0.181
4	0.186	0.183	0.164	0.171
5	0.200	0.198	0.169	0.192
6	0.202	0.188	0.166	0.175
เฉลี่ย	0.192	0.195	0.164	0.175

ผลการทดสอบพบว่าที่หน่วยน้ำหนักต่ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ

ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดประมาณ 0.255 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.213 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดมีค่าประมาณ 0.195 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.164 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับหน่วยน้ำหนัก

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อุณหภูมิความร้อนต่างกัน

การทดสอบการทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาดำเนินการโดยทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สภาพปกติและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ตัวอย่างทดสอบมีมิติความกว้าง ความ

ยาว และความสูง เท่ากับ 10x10x10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 18 ก้อนตัวอย่างต่อสูตร จำนวนทั้งหมด 8 สูตร แบ่งเป็นหน่วยน้ำหนัก 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้ผลการทดสอบดังในตารางที่ 4 และ 5

จากตารางที่ 4 และ 5 พบว่า ที่สภาพปกติ สูตรที่ให้กำลังอัดสูงสุดประมาณ 166.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คือ หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และสูตรที่ให้กำลังอัดต่ำสุดประมาณ 52.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คือหน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55

ตารางที่ 4 การทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร				
สูตรที่	1	2	3	4
หน่วยน้ำหนัก	1800	1800	1800	1800
S/C	2:1	3:1	2:1	3:1
W/C	0.45	0.45	0.55	0.55
คอนกรีตปกติ	166.87	103.64	148.83	133.13
ที่ 200 °C	165.75	102.45	140.61	116.45
ที่ 400 °C	132.69	92.22	113.86	63.57
ที่ 600 °C	100.17	41.79	65.72	55.73
ที่ 800 °C	48.69	24.43	52.16	29.12
ที่ 1000 °C	31.63	16.45	30.89	19.71

โดยภาพรวมที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากที่สุด สภาพคอนกรีตปกติ มีค่ากำลังรับแรงประมาณ 166.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ คอนกรีตที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงมีค่าประมาณ 165.75, 132.69, 100.17, 48.69 และ 31.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำสุดของหน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คือสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่สภาพคอนกรีตปกติ มีค่ากำลังรับแรงประมาณ 103.64 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ คอนกรีตที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงมีค่าประมาณ 102.45, 92.22, 41.79, 24.43 และ 16.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5 การทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร				
สูตรที่	5	6	7	8
หน่วยน้ำหนัก	1600	1600	1600	1600
S/C	2:1	3:1	2:1	3:1
W/C	0.45	0.45	0.55	0.55
คอนกรีตปกติ	77.54	75.40	69.42	52.63
ที่ 200 °C	70.45	71.59	55.86	41.62
ที่ 400 °C	66.53	69.35	45.97	38.53
ที่ 600 °C	36.43	49.3	31.87	36.36
ที่ 800 °C	26.50	15.19	20.56	14.98
ที่ 1000 °C	13.35	9.65	12.47	7.58

ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สูตรที่ให้กำลังอัดสูงสุด คือสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 สภาพคอนกรีตปกติ มีค่ากำลังรับแรงประมาณ 77.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ คอนกรีตที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงมีค่าประมาณ 70.45, 66.53, 36.43, 26.50 และ 13.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำสุดของหน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คือสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่สภาพคอนกรีตปกติ มีค่ากำลังรับแรงประมาณ 52.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ คอนกรีตที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส

ค่ากำลังรับแรงมีค่าประมาณ 41.62, 38.53, 36.36, 14.98 และ 7.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 6 อัตราส่วนกำลังของคอนกรีตเนื่องจากการทนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

สูตรที่ทดสอบ	หน่วยน้ำหนัก	1800	1800	1800	1800	1600	1600	1600	1600	ช่วง	เฉลี่ย
	S/C	2:1	3:1	2:1	3:1	2:1	3:1	2:1	3:1		
	W/C	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.45	0.55	0.55		
อัตราส่วนกำลังรับแรงอัด	ปกติ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	**1**	**1**
	200	0.99	0.99	0.94	0.87	0.96	0.95	0.80	0.79	**0.79-0.99**	**0.91**
	400	0.80	0.89	0.77	0.48	0.86	0.92	0.66	0.73	**0.48-0.92**	**0.76**
	600	0.60	0.40	0.44	0.42	0.47	0.65	0.46	0.69	**0.40-0.69**	**0.52**
	800	0.29	0.24	0.35	0.22	0.34	0.20	0.30	0.28	**0.20-0.35**	**0.28**
	1000	0.19	0.16	0.21	0.15	0.17	0.13	0.18	0.14	**0.13-0.21**	**0.17**

จากตารางที่ 6 พบว่า

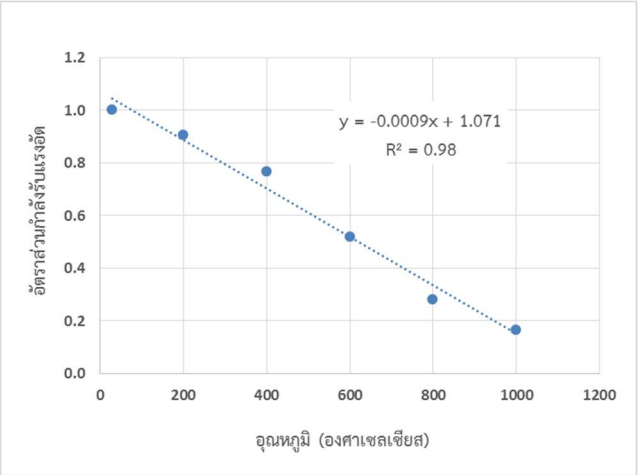
1) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงของกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 0.79 - 0.99 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่สภาพปกติ

2) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงของกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 0.48 - 0.92 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่สภาพปกติ

3) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงของกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 0.40 - 0.69 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่สภาพปกติ

4) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงของกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 0.20 - 0.35 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่สภาพปกติ

5) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงของกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 0.13 - 0.21 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่สภาพปกติ ซึ่งสูตรที่มีอัตราส่วนกำลังอัดคงเหลือน้อยสุด ร้อยละ 13 คือ หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ สูตรที่มีอัตราส่วนกำลังอัดคงเหลือมากที่สุด ร้อยละ 21 คือ สูตรหน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55



รูปที่ 5 อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

รูปที่ 5 นำเสนอกราฟอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ผ่านการให้ความร้อน อุณหภูมิต่างๆ เทียบกำลังรับแรงอัดในสภาพปกติ

จากกราฟความสัมพันธ์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าลดลง ตามอุณหภูมิของให้ความร้อน โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ ดังสมการ (2) ข้างล่าง

$$y = (-0.0009)x + 1.071 \quad (2)$$

เมื่อ

y คือ อัตราส่วนกำลังรับแรงอัดที่คงเหลือ และ

x คือ ค่าอุณหภูมิการให้ความร้อน (^{o}C)

โดยมีค่า R^2 = 0.98

5. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสภาพปกติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าสูง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะสูงตามไปด้วย ซึ่งมีความแปรผันตามกัน โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ ดังสมการ (3)

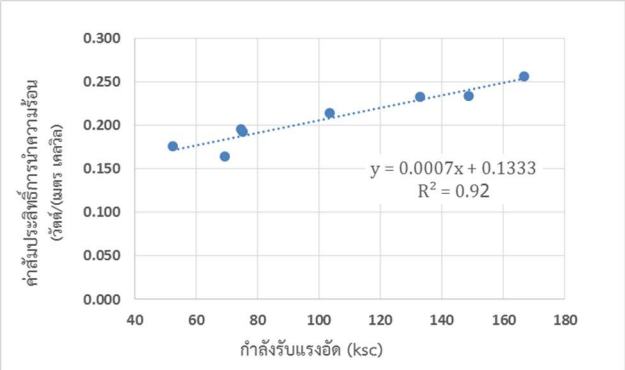
$$y = 0.0007x + 0.133 \quad (3)$$

เมื่อ

y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.°K) และ

x คือ กำลังรับแรงอัดสภาพปกติ (ksc)

โดยมีค่า R^2 = 0.92



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ตารางที่ 7 สรุปค่าการนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สูตรที่ทดสอบ			ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตรองศาเคลวิน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)					
				ก่อนเผา	การอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)				
หน่วยน้ำหนัก	S/C	W/C		อุณหภูมิปกติ	200	400	600	800	1000
1800	2:1	0.45	0.213	166.87	165.75	132.69	100.17	48.69	31.63
1800	3:1	0.45	0.255	103.64	102.45	92.22	41.79	24.43	16.45
1800	2:1	0.55	0.233	148.83	140.61	113.86	65.72	52.16	30.89
1800	3:1	0.55	0.233	133.13	116.45	63.57	55.73	29.12	19.71
1600	2:1	0.45	0.192	77.54	74.45	66.53	36.43	26.50	13.35
1600	3:1	0.45	0.195	75.40	71.59	69.35	49.30	15.19	9.65
1600	2:1	0.55	0.164	69.42	55.86	45.97	31.87	20.56	12.47
1600	3:1	0.55	0.175	52.63	41.62	38.53	36.36	14.98	7.58

จากตารางที่ 7 หากในการออกแบบต้องการกำลังรับแรงอัดมากที่สุดจะพบที่สูตรหน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดประมาณ 166.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.213 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน หลังจากนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 165.75, 132.69, 100.17, 48.69 และ 31.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุดมีค่าประมาณ 0.164 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน พบที่สูตรหน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ ประมาณ 69.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณ 55.86, 45.97, 31.87, 20.56 และ 12.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า

(1) จากการทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM C 177 Standard Test Method for Steady- State Thermal Transmission by Mean of the Guarded Hot Plate ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ใน ช่วง 0.164 – 0.255 วัตต์ต่อเมตรองศาเคลวิน และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีดังนี้

1) คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักน้อย จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ

2) อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มาก มีแนวโน้มจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง

3) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มาก มีแนวโน้มจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ

(2) การทนความร้อน ดำเนินการทดสอบโดยนำตัวอย่างคอนกรีตไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส แล้วนำไปกดเพื่อหากำลังรับแรงอัดเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าในสภาพปกติ คอนกรีตที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกำลังรับแรงอัดคงเหลือน้อยกว่ากรณีที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า สรุปผลที่ได้คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อุณหภูมิความร้อนต่าง ๆ กัน มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าในสภาพปกติ โดยค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดคงเหลือของคอนกรีตมวลเบาแบบ

เซลลูล่าที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตแบบเซลลูล่าในสภาพปกติ อยู่ที่ประมาณร้อยละ 91, 76, 52, 28 และ 17 ตามลำดับ

7. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการทนความร้อนของคอนกรีต ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย การศึกษาที่หน่วยน้ำหนักต่าง ๆ ที่กว้างขึ้น รวมไปถึงอาจเพิ่มเติมการศึกษาความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตโครงสร้างภายในของเนื้อคอนกรีตด้วย เพื่อเพิ่มความเข้าใจในคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมคอนกรีตด้านนี้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์น้ำยาโฟมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*. 2000; 22: 321-329.

[2] Fouad FH. Cellular concrete. In: Lamond JF, Pielert JH. (eds). *Significance of Tests and Properties of concrete and concrete- making material*. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2006. p. 561-569.

[3] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Air void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2007; 37: 221-230.

[4] Shetty M, Jain AK. *Concrete Technology: Theory and Practice*. S Chand & Company Limited. Ram Nagar, New Delhi; 2000.

[5] Gambhir ML. *Concrete Technology: Theory and Practice*. McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi; 2013.

[6] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 60-2516. มาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงต้นรับน้ำหนัก*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม; 2516.

[7] บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน*. พิมพ์ครั้งที่ 2; 2548. หน้า 293.

[8] Dcon. Citing & Referncing: Available from: www. dconproduct. com https: / / www. dconproduct.com/ wp-content/ uploads/2019/ 09/โบรชัวร์-อิฐมวลเบา-Final-11.05.64.pdf [เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย.2565]

[9] Qcon. Citing & Referncing: Available from: www. qcon.co.th. https://qcon.co.th/products/ qcon-block [เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ย.2565]

[10] อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชญ์, ธนภร ทวีวุฒิ. 2553. คุณสมบัติการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 12-14 พฤษภาคม 2553 ณ โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี*. 2553.

[11] ปภาวิน สินรัมย์, ธนภร ทวีวุฒิ. ช่องว่างอากาศและคุณสมบัติการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17 9-11 พฤษภาคม 255 ณ โรงแรม เซ็นทารา แกรนด์แอนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จ.อุดรธานี*. 2555.

[12] คณะกรรมการกฤษฎีกา. *ราชกิจจานุเบกษา เรื่อง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ*. หน้า 15 เล่ม 113 ตอนพิเศษ 21 ลงวันที่ 17 กรกฎาคม 2539.

[13] Steven HK, Kerkhoff B, William CP. *Design and Control of Concrete Mixture*s, Portland Cement Association; 2003.

[14] Rodriguez A, Pedraza M, Luciano J, Constantiner D. Mixture design optimisation of cellular concrete. In: Dhir RK, Henderson NA. (eds). *Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction*. Thomas Telford Publishing. London; 1999.

[15] ธนภร ทวีวุฒิ, นท แสงเทียน, วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์, อิทธิพงศ์ พันธ์นิกุล. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2563*; 13(2): 88-101.

[16] ASTM standards. *ASTM C128 - Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. Washington; 2023.

[17] ASTM C 136 – 96a Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates and Maximum Size of Aggregate

[18] Adam MN. *Properties of Concrete*. Fourth Edition. Pearson Prentice Hall, England; 2003.

[19] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2006; 28: 475–480.

[20] Falade F, Ikponmwosa E, Fapohunda C. A study on the compressive and tensile strength of foamed concrete containing pulverized bone as a partial replacement of cement. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2013;13: 82-93.

[21] ASTM standards. *ASTM C 177 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission by Mean of The Guarded Hot Plate*. 2023.

[22] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 409-2525. มาตรฐานวิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2525.