

# กำลังรับแรงอัดและ การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

## Compressive Strength and Water Absorption of Cellular Lightweight Concrete

ธนกร ทวีวุฒิ นท แสงเทียน\*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Thanabhorn Thaveevouthti Note Sangtian\*

Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4535-3375 E-mail: ensuwath@ubu.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าตัวอย่างรูปทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ที่บ่มแห้งในอากาศอายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน และ การดูดกลืนน้ำที่ 28 วัน โดยผลิตคอนกรีตที่ค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบในช่วง 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 26 สูตรส่วนผสม จากผลการศึกษาพบว่า (1) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีค่าระหว่าง 10.4-242 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทรงลูกบาศก์มีค่าระหว่าง 10.7-185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ (2) ค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำพบอยู่ในช่วงร้อยละ 8.3-49.3 และปริมาณการดูดกลืนน้ำพบอยู่ในช่วง 140 -285.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับมอก. 2601-2556 พบว่าสูตรที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1200, 1400, 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เทียบเคียงได้กับ มอก. 2601-2556 ชนิด C12, C14 และ C16 ตามลำดับ

**คำหลัก** คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า คอนกรีตโฟม กำลังรับแรงอัด การดูดกลืนน้ำ

### Abstract

This paper presents a study of compressive strength for standard cylinder and cube specimens in air-curing condition at the ages of 7, 14, 28 and 56 days, and water absorption at the age of 28 days. A total of 26 designed mixes of cellular lightweight concrete with unit weights ranging between 800 kg/m<sup>3</sup> to 1800 kg/m<sup>3</sup> using water to cement ratios of 0.45 and 0.55 and sand to cement ratios of 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 and 3:1 were produced. The results shown that (1) the compressive strengths of the standard cylinder specimens ranging from 10.4-242 kg/cm<sup>2</sup> and of the standard cubes ranging from 10.7-185 kg/cm<sup>2</sup>, and (2) the percentage of water absorption ranged from 8.3-49.3% and the volume of water absorption ranged from 140-285.8 kg/m<sup>3</sup>. In comparison with TIS 2601-2556, the test results of cellular light weight concrete with unit weight 1200, 1400 and 1600 kg/m<sup>3</sup> reached the standard class C12, C14 and C16, respective.

**Keywords:** cellular lightweight concrete, foam concrete, compressive strength, water absorption

## 1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (cellular lightweight concrete) เป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของโฟมเหลว ซึ่งถูกฉีดเข้าไปผสมกับทราย ปูนซีเมนต์และน้ำ โดยไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบ เมื่อคอนกรีตแห้งตัวจะพบฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต น้ำหนักของคอนกรีตขึ้นกับปริมาณฟองโฟมที่ใส่เข้าไป ดังนั้นคอนกรีตชนิดนี้จึงมีลักษณะเด่นคือหน่วยน้ำหนักเบา [1-3] ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเริ่มได้ตั้งแต่ 300 ไปจนถึง 1920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (20-120 lb/ft<sup>3</sup>) [4-6] ช่วงแรกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าถูกใช้เป็นตัวฉนวน โดยใช้ที่หน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 240 ถึง 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [5-6] ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาส่วนผสมและคุณสมบัติต่างๆ สำหรับใช้เป็นบล็อก แผ่นพื้น และในงานด้านอื่นๆ มากขึ้น [7-9] ในประเทศไทยได้เริ่มมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานสำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาในปี 2541 [10] และในปี 2556 ก็ได้มีมาตรฐานสำหรับคอนกรีตมวลเบาในช่วงหน่วยน้ำหนัก 300-1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [11]

คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแปรผันกับปัจจัยหลายประการ เช่น อัตราส่วนผสม หน่วยน้ำหนักหรือความพรุนของคอนกรีต วิธีการบ่มและอายุคอนกรีต เป็นต้น ในช่วงหน่วยน้ำหนัก 300-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดอาจแปรผันได้ตั้งแต่ช่วงประมาณ 10-250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [5-6, 12] จากผลงานวิจัย [13-14] พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานและทรงลูกบาศก์ มีค่าระหว่าง 16-210 และ 12-176 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังอัดที่อายุ 56 วัน ของตัวอย่างทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ อยู่ในช่วง 18-237 และ 14-181 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีฟองอากาศอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก ดังนั้นปริมาณการดูดกลืนน้ำจึงมีค่าค่อนข้างสูง โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยความพรุนจะมากและการดูดกลืนน้ำก็มากด้วย [4-7] ในช่วงหน่วยน้ำหนัก 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาจพบว่าร้อยละการดูดกลืนน้ำมีค่าในช่วงร้อยละ 8- 50 [13]

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์มาตรฐาน และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบในช่วง 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 26 สูตร (ตารางที่ 1) เพื่อหาแนวโน้มกำลังรับแรงและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ (1) มอก. 58-2533 [15] (2) มอก. 57-2533 [16] และ (3) มอก. 2601-2556 [11] และเพื่อเป็นฐานข้อมูลการวิจัย สำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าต่อไป

## 2. การทดสอบวัสดุผสมและการผลิต

### 2.1 วัสดุ

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

### 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย (1) โม่ผสมคอนกรีต (2) เครื่องผลิตโฟมเหลว (foam generator) (3) แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร (4) แบบหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร (5) เครื่องชั่งน้ำหนัก และ (6) เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (7) ตู้อบ

### 2.3 การเตรียมมวลรวมละเอียด

- (1) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด (ทราย) และทดสอบหาค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 - standard test method for specific gravity and absorption of Fine aggregate เพื่อใช้ในการออกแบบปริมาณส่วนผสม ในที่นี้ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย อยู่ที่ประมาณ 2.7 และความสามารถในการดูดซึมน้ำมีค่าร้อยละ 1.6
- (2) ทดสอบหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย (FM.) ในการศึกษาที่ใช้ทรายที่มีค่า FM. เท่ากับ 2.28
- (3) ทดสอบหาความชื้นของทราย ดำเนินการทุกครั้งที่ผลิตคอนกรีตเพื่อใช้คำนวณปริมาณส่วนผสม

## 2.4 การเตรียมน้ำยาสร้างฟองโฟม

การเตรียมน้ำยาสร้างฟองโฟมใช้อัตราส่วนสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 30 แล้วทดสอบหาอัตราการขยายตัวของปริมาตรน้ำยาโฟม พบว่ามีค่าประมาณ 26 เท่า และ อัตราการไหลของฟองโฟมเหลว อยู่ที่ประมาณ 6.45 ลิตรต่อวินาที รายละเอียดอัตราส่วนผสมสำหรับการศึกษานี้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

| No  | หน่วย                |      |      | ปูน     | ทราย    | น้ำผสม  | น้ำยา   | น้ำผสม   |
|-----|----------------------|------|------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Mix | น้ำหนัก              | S/C  | W/C  | ซีเมนต์ |         | มอร์ต้า | โฟม     | น้ำยาโฟม |
|     | (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      | (kg)    | (kg)    | (kg)    | (litre) | (litre)  |
| 1   | 800                  | 0.25 | 0.45 | 457.6   | 114.4   | 205.90  | 0.75    | 22.51    |
| 2   |                      |      | 0.55 | 432.6   | 108.1   | 237.90  | 0.72    | 21.71    |
| 3   |                      | 0.5  | 0.45 | 398.7   | 199.3   | 179.39  | 0.77    | 22.98    |
| 4   |                      |      | 0.55 | 379.6   | 189.8   | 208.75  | 0.74    | 22.25    |
| 5   | 1,000                | 0.5  | 0.45 | 503.0   | 251.5   | 226.35  | 0.64    | 19.25    |
| 6   |                      |      | 0.55 | 478.9   | 239.5   | 263.41  | 0.61    | 18.33    |
| 7   |                      | 1    | 0.45 | 400.0   | 400.0   | 180.00  | 0.67    | 20.07    |
| 8   |                      |      | 0.55 | 392.2   | 392.2   | 215.68  | 0.66    | 19.67    |
| 15  | 1,200                | 1    | 0.45 | 483.1   | 483.1   | 217.37  | 0.55    | 16.51    |
| 16  |                      |      | 0.55 | 464.5   | 464.5   | 255.45  | 0.52    | 15.57    |
| 17  |                      | 2    | 0.45 | 342.7   | 685.4   | 154.22  | 0.59    | 17.62    |
| 18  |                      |      | 0.55 | 333.3   | 666.5   | 183.29  | 0.56    | 16.92    |
| 9   | 1,400                | 1    | 0.45 | 566.1   | 566.1   | 254.75  | 0.43    | 12.94    |
| 10  |                      |      | 0.55 | 544.4   | 544.4   | 299.40  | 0.40    | 14.25    |
| 11  |                      | 2    | 0.45 | 401.7   | 803.3   | 180.74  | 0.47    | 14.25    |
| 12  |                      |      | 0.55 | 390.6   | 781.1   | 214.80  | 0.45    | 13.43    |
| 13  | 1,600                | 3    | 0.45 | 311.2   | 933.7   | 140.05  | 0.50    | 14.96    |
| 14  |                      |      | 0.55 | 304.5   | 913.6   | 167.49  | 0.48    | 14.31    |
| 19  |                      | 2    | 0.45 | 460.6   | 921.1   | 207.26  | 0.36    | 10.88    |
| 20  |                      |      | 0.55 | 447.9   | 895.8   | 246.35  | 0.33    | 9.94     |
| 21  | 1,800                | 3    | 0.45 | 356.9   | 1,070.7 | 160.61  | 0.39    | 11.70    |
| 22  |                      |      | 0.55 | 349.2   | 1,047.7 | 192.07  | 0.36    | 10.95    |
| 23  |                      | 2    | 0.45 | 519.6   | 1,039.1 | 233.80  | 0.25    | 7.51     |
| 24  |                      |      | 0.55 | 505.2   | 1,010.4 | 277.86  | 0.21    | 6.44     |
| 25  | 2,000                | 3    | 0.45 | 402.6   | 1,207.7 | 181.16  | 0.28    | 8.43     |
| 26  |                      |      | 0.55 | 393.9   | 1,181.7 | 216.65  | 0.25    | 7.58     |

## 2.5 การผลิตและการทดสอบ

ขั้นตอนการผลิตและการทดสอบ มีดังนี้

- (1) เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลว โดยต่อเครื่องอัดอากาศเข้ากับถังรับแรงดันสำหรับผสมน้ำยาสร้างฟองโฟม ใช้ น้ำยากับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 ใส่ลงในถังรับแรงดัน และปรับแรงดันให้อยู่ในช่วงประมาณ 0.60-0.65 MPa
- (2) ใส่ทรายและปูนซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีต ผสมให้เข้ากัน แล้วใส่น้ำ ใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ฉีดโฟมเหลวใส่ไปในโม่ ปั่นเพื่อให้ไม่ทำงานประมาณ 1-2 นาที จนเห็นว่าส่วนผสม

ทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงเทคอนกรีตที่ผลิตเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้

- (3) บ่มคอนกรีตแห้งในอากาศตามอายุการทดสอบที่ระบุในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการบ่มแห้งในอากาศนี้สามารถใช้ได้กับการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตได้ [17-19]

## 3. วิธีการศึกษา

### 3.1 การทดสอบกำลังอัด

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน เพื่อให้เห็นแนวโน้มการพัฒนากำลังเมื่อคอนกรีตอายุมากกว่า 28 วันด้วย เนื่องจากมีการศึกษาพบว่ากำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสนั้นเมื่ออายุหลัง 28 วันไปแล้ว ยังมีการพัฒนากำลังต่อไปอีก ในช่วง 28 วัน ถึง 6 เดือน อาจมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นได้อีกร้อยละ 30-80 [1]

สำหรับการทดสอบจะผลิตตัวอย่างทั้งสองรูปทรง คือ ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 เซนติเมตรและทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4 Method of Testing Concrete for Strength และ ASTM 39 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ตามลำดับ ทั้งหมด 624 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบกำลังอัด ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ครั้งละ 3 ตัวอย่าง

### 3.2 การหาอัตราการดูดกลืนน้ำ

การทดสอบหาการดูดกลืนน้ำใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร สูตรละ 6 ตัวอย่าง รวม 156 ตัวอย่างดำเนินการโดยนำตัวอย่างมาแช่ในภาชนะที่มีน้ำสะอาดทั้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เช็ดตัวอย่างให้อยู่ในสภาพผิวแห้งแล้วนำมาชั่งเป็นค่าน้ำหนักเปียก จากนั้นนำตัวอย่างเข้าตู้อบปรับอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาชั่งได้ค่าน้ำหนักอบแห้ง แล้วคำนวณหาปริมาณและอัตราการดูดกลืนน้ำ

## 4. ผลการศึกษากำลังรับแรงอัด

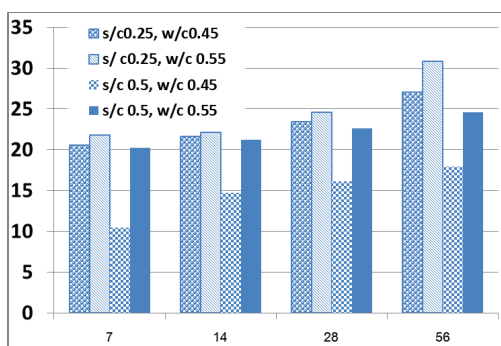
ในหัวข้อนี้นำเสนอกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอก (หัวข้อ 4.1) และลูกบาศก์มาตรฐาน (4.2) แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเมื่อพิจารณาตามอัตราส่วน

ทรายตอปูนซีเมนต์ (4.3) และอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (4.4) และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกกับรูปทรงลูกบาศก์ (4.5)

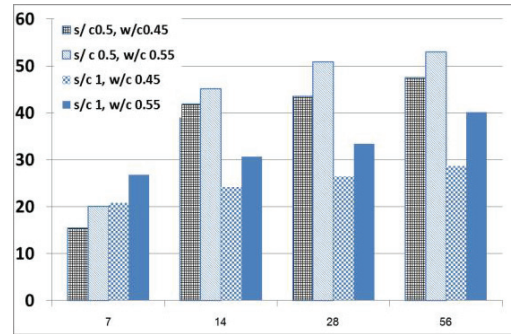
#### 4.1 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ของตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800, 1000, 1200, 1400, 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 1-6 ตามลำดับ โดยค่าในแนวนอนคืออายุของคอนกรีตหน่วยเป็นวัน ส่วนค่าในแนวตั้งคือกำลังรับแรงอัดหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.9 เท่า, ที่อายุ 14 วัน มีค่าประมาณ 0.8-0.99 เท่า และ ที่อายุ 56 วัน มีค่าประมาณ 1.03-1.25 เท่าของกำลังที่อายุ 28 วัน

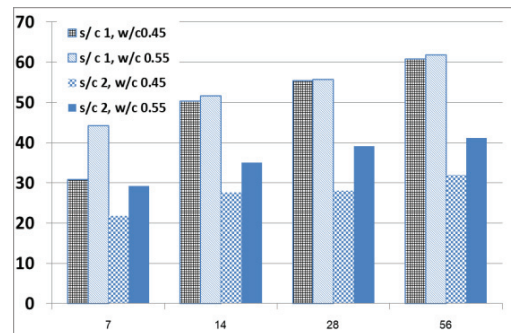
ที่อายุ 56 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 18-242 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังต่ำสุดพบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ต่อ 1 และใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดพบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 ต่อ 1 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45



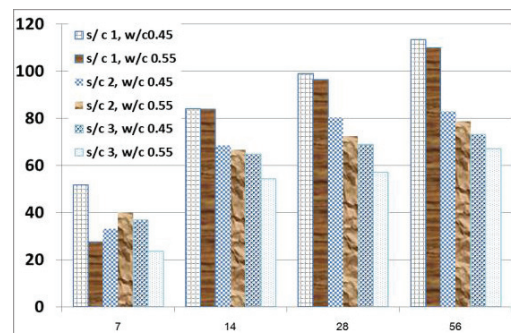
รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



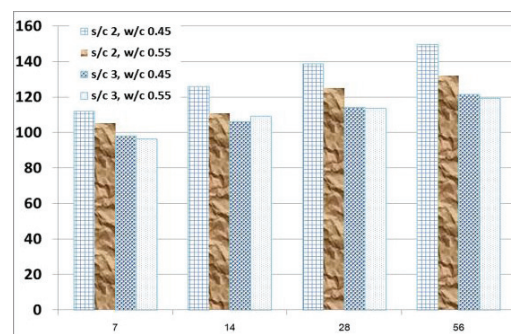
รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

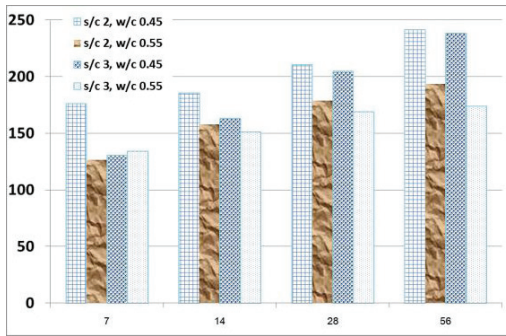


รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

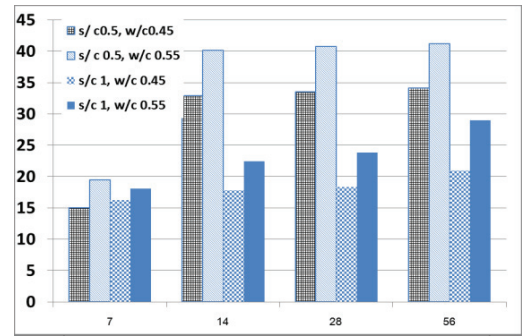


รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร





รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงกระบอกที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



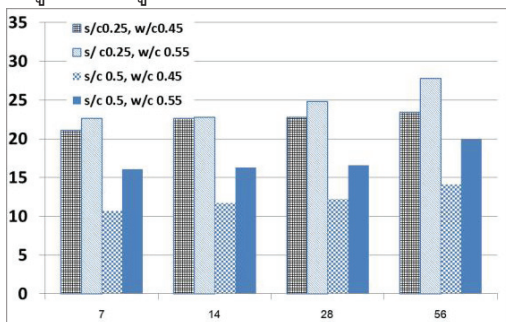
รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.2 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

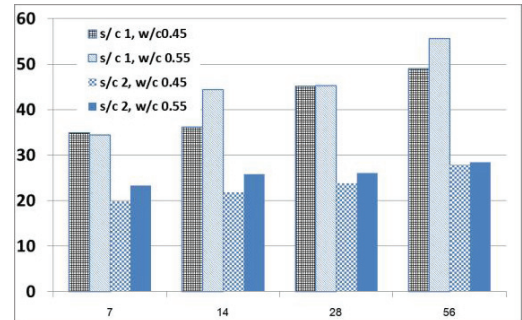
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ของตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาตรฐานที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800, 1000, 1200, 1400, 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในรูปที่ 7-12 ตามลำดับ โดยค่าในแนวนอนคืออายุของคอนกรีตหน่วยเป็นวัน ส่วนค่าในแนวตั้งคือกำลังรับแรงอัดหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.97, ที่อายุ 14 วัน มีค่าประมาณ 0.78-0.99 เท่า และ ที่อายุ 56 วัน มีค่าประมาณ 1.01-1.23 เท่าของกำลังที่อายุ 28 วัน

ที่อายุ 56 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 14-185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและต่ำสุดพบที่สูตรทดสอบเดียวกันกับของทรงกระบอก

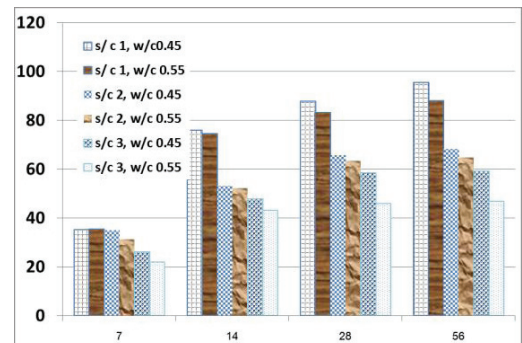
จะเห็นว่าแนวโน้มของอัตราการพัฒนากำลังแต่ละช่วงอายุของตัวอย่างรูปทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดถึงแม้ว่าจะพบที่สูตรเดียวกันแต่ค่ากำลังของตัวอย่างทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าทรงลูกบาศก์



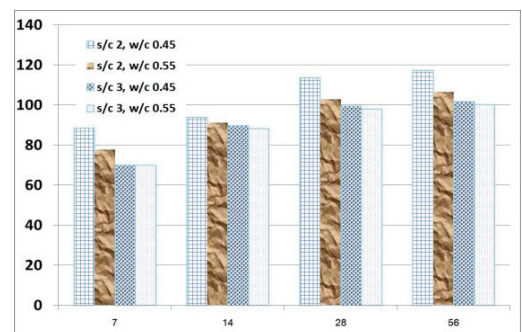
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



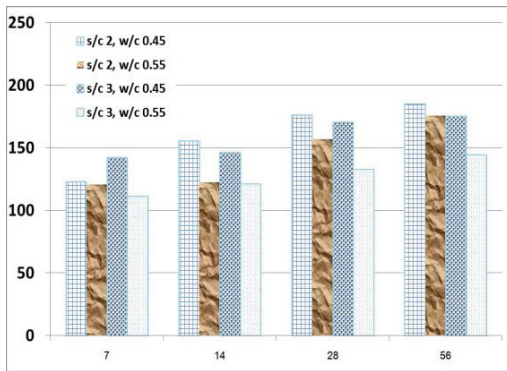
รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 11 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 12 กำลังรับแรงอัดกับอายุของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.3 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยภาพรวมแปรผกผันกับปริมาณทราย ดังรูปที่ 13 นำเสนอค่ากำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกกับค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบในช่วง 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ รูปที่ 14 ค่ากำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์กับหน่วยน้ำหนักออกแบบ ในช่วง 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่นกัน

ทั้งสองรูปได้นำเสนอที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ 0.25/1, 0.5/1, 1/1, 2/1 และ 3/1 จะเห็นว่าที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเดียวกันคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มาก

รายละเอียดในรูปที่ 13 นำเสนอสมการแนวโน้มกำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกอายุ 56 วัน ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 คือ

$$y = 0.145x - 94.75$$

ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 คือ

$$y = 0.0003x^2 - 0.5063x + 249.4$$

สมการแนวโน้มของกำลังอัดที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 คือ

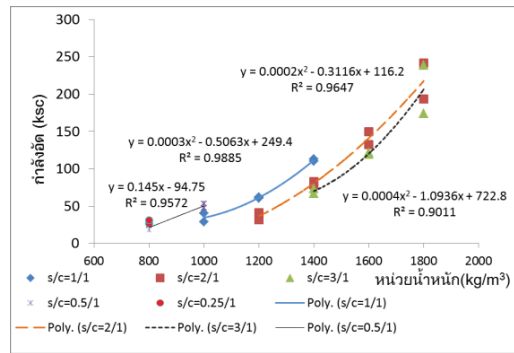
$$y = 0.0002x^2 - 0.3116x + 116.2$$

และที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 คือ

$$y = 0.0004x^2 - 1.0936x + 722.8$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก ( $\text{kg/m}^3$ ) และมีค่าระหว่าง 800-1800  $\text{kg/m}^3$

โดยมีค่า  $R^2 = 0.96, 0.99, 0.96$  และ  $0.90$  ตามลำดับ



รูปที่ 13 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอกที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ 0.25/1, 0.5/1, 1/1, 2/1 และ 3/1

รายละเอียดรูปที่ 14 นำเสนอสมการแนวโน้มกำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์อายุ 56 วัน ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 คือ

$$y = 0.1033x - 65.6$$

อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 คือ

$$y = 0.0002x^2 - 0.1933x + 68.2$$

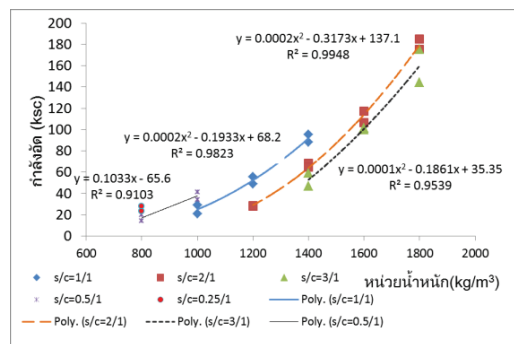
สมการแนวโน้มของกำลังอัดที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 คือ

$$y = 0.0002x^2 - 0.3173x + 137.1$$

ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 คือ

$$y = 0.0001x^2 - 0.1861x + 35.35$$

โดยมีค่า  $R^2 = 0.91, 0.98, 0.99$  และ  $0.95$  ตามลำดับ



รูปที่ 14 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ 0.25/1, 0.5/1, 1/1, 2/1 และ 3/1

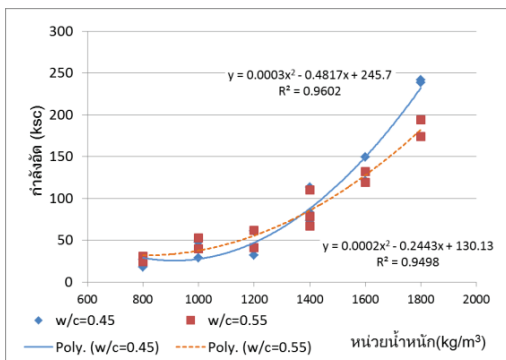
#### 4.4 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

เมื่อพิจารณาตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์พบว่า แนวโน้มการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ 56 วัน ทั้งตัวอย่างทรงกระบอกและลูกบาศก์มีลักษณะคล้ายกัน คือ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 คอนกรีตจะมี

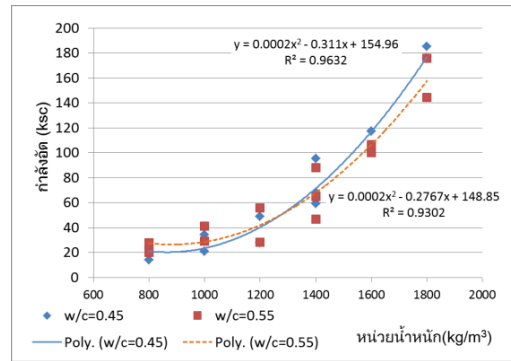
กำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 อย่างไรก็ตาม ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1400-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า

ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการบ่มคอนกรีตแบบการบ่มแห้งในอากาศ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่มีหน่วยน้ำหนักช่วง 800-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีฟองอากาศมาก มีความพรุนสูง ดังนั้นเมื่อบ่มโดยทิ้งไว้ในอากาศ จึงอาจมีน้ำบางส่วนระเหยออกจากคอนกรีตได้มาก [20] และส่งผลทำให้ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์สำหรับปูนซีเมนต์ Type I ทั่วไปและน้ำค่าอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่ไว้ที่ 0.42 สำหรับ full hydration [17] ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าสำหรับคอนกรีตหน่วยน้ำหนักเบา มีน้ำระเหยออกไปมาก และทำให้สูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์สูง มีน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีกว่าจึงให้ค่ากำลังที่สูงกว่า ส่วนหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1400-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเหนียวมากกว่า ปริมาณฟองอากาศมีน้อยกว่าและการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีตน่าจะน้อยกว่า จึงมีพฤติกรรมคล้ายคอนกรีตทั่วไป คือสูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ต่ำให้กำลังสูง ทำนองเดียวกับคอนกรีตทั่วไป

สมการความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดทรงกระบอกอายุ 56 วัน กับหน่วยน้ำหนักออกแบบ ที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 แสดงในรูปที่ 15 และ ในรูปที่ 16 เป็นของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์



รูปที่ 15 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอกอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน



รูปที่ 16 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงลูกบาศก์อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45, 0.55 อายุ 56 วัน

#### 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกกับรูปทรงลูกบาศก์

โดยทั่วไปแล้วกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานกับทรงลูกบาศก์จะให้ค่าที่แตกต่างกันอยู่แล้วถึงแม้ว่าจะใช้ส่วนผสมเดียวกัน โดยกำลังอัดทรงกระบอกจะให้ค่าน้อยกว่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ ถึงแม้ทำการบ่มภายใต้สภาวะเดียวกันและทดสอบที่อายุเท่ากัน [21] ทั้งนี้เนื่องจาก

- (1) องค์ประกอบเรื่องความชะลูด กล่าวคือ รูปทรงกระบอกมีสัดส่วน ความสูงต่อความกว้าง (slenderness ratio) มากกว่ารูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดรูปทรงกระบอกต่ำกว่ารูปทรงลูกบาศก์ และ
- (2) แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด ที่ก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า confining stress ถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก confining stress ก็จะมีค่ามากด้วย ดังนั้นจึงมีส่วนทำให้กำลังอัดของทรงลูกบาศก์อาจสูงกว่าความเป็นจริง

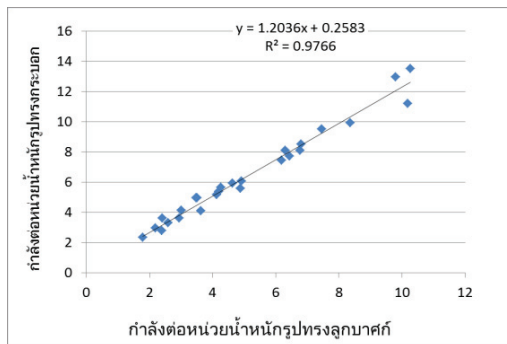
ทางวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้กำหนดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดทั้ง 2 รูปทรง ไว้ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและมอก.213-2520 มาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จก็ได้เสนอขึ้นคุณภาพของคอนกรีตทั้งสองรูปทรงไว้ โดยสรุปได้กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานมีค่าประมาณร้อยละ 70-80 ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ [21]

อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาพบว่าค่าที่ทดสอบแตกต่างจากทฤษฎี โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานมีค่ามากกว่ากำลังอัด

ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ อยู่ในช่วง 1.1-1.5 เท่า ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.25 เท่า ซึ่งผลการทดสอบพบในทำนองเดียวกันกับ [13-14] รูปที่ 17 เป็นกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการหาค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$y = 1.2036x - 0.2583$$

เมื่อ  $x$  คือ ค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ และ  $y$  คือ ค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานกับรูปทรงลูกบาศก์

ในหัวข้อนี้นำเสนอเพื่อมุ่งเน้นให้เห็นผลการศึกษาที่คลาดเคลื่อนกับทฤษฎี เพื่อเป็นข้อสังเกตและข้อควรระวังสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานที่รับผิดชอบคอนกรีตผู้ต้องการใช้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผลิตโดยใช้ไม่ผสมคอนกรีตทั่วไปเพราะอาจมีได้หลายสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตที่ผลิตได้ต่างจากที่ออกแบบไว้ [18] และส่งผลให้ผลการทดสอบต่างจากทฤษฎี ความเข้าใจที่แท้จริงในพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเป็นเรื่องที่จำเป็นยิ่งสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมคอนกรีตด้านนี้ต่อไป

## 5. การดูดกลืนน้ำ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสทั้ง 26 สูตรส่วนผสม ที่อายุ 28 วัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ มอก. 57-2533 [16] และ มอก.2601-2556 [11] ซึ่งกล่าวถึงการดูดกลืนน้ำเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักกอบแห้ง ตารางที่ 2 ผลการศึกษาจึงประกอบด้วยทั้งค่าหน่วยน้ำหนักกอบแห้งและค่าหน่วยน้ำหนักกอบแฉะ และในการนำเสนอค่าการดูดกลืนน้ำได้นำเสนอทั้งในรูปของค่า

ปริมาณการดูดกลืนน้ำและร้อยละการดูดกลืนน้ำ สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส แนะนำให้ใช้ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำ เนื่องจากการลดลงของค่าหน่วยน้ำหนัก [18] จากผลการทดสอบพบแนวโน้มชัดเจนว่าปริมาณการดูดกลืนน้ำแปรผกผันกับค่าหน่วยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผลิตจากการฉีดฟองโฟมเข้าไปผสมกับมอร์ต้าแทนการใช้มวลรวมหยาบ กรณีที่จะได้ค่าหน่วยน้ำหนักน้อย จะต้องฉีดฟองโฟมเข้าไปผสมในปริมาณที่มาก และเมื่อคอนกรีตแห้งตัวฟองโฟมที่ฉีดเข้าไปผสมก็กลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็กที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตนั่นเอง ดังนั้นคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยจึงมีปริมาณฟองอากาศมากและมีปริมาณการดูดกลืนน้ำสูง เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ พบว่า ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน ใช้อัตราส่วนทรายตอปูนซีเมนต์เท่ากัน สูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์น้อย โดยภาพรวมจะให้ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำน้อยกว่า ทางด้านอัตราส่วนทรายตอปูนซีเมนต์ ส่งผลต่ออัตราการดูดกลืนน้ำ คือ ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน ใช้อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากันแล้ว เมื่อใช้อัตราส่วนทรายตอปูนซีเมนต์มาก จะให้ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำน้อยกว่า

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาการดูดกลืนน้ำ

| No. Mix | หน่วยน้ำหนัก<br>ออกแบบ<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | S/C  | W/C  | หน่วยน้ำหนัก<br>ผลิต<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | หน่วยน้ำหนัก<br>อบแห้ง<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ปริมาณการดูดกลืนน้ำ<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | ร้อยละการดูดกลืนน้ำ |
|---------|------------------------------------------------|------|------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|
| 1       | 800                                            | 0.25 | 0.45 | 651.1                                        | 573.6                                          | 282.9                                       | 49.3                |
| 2       | 800                                            | 0.25 | 0.55 | 708.3                                        | 623.2                                          | 285.8                                       | 45.9                |
| 3       | 800                                            | 0.5  | 0.45 | 660.7                                        | 612.4                                          | 283.7                                       | 46.3                |
| 4       | 800                                            | 0.5  | 0.55 | 695.5                                        | 628.1                                          | 273.7                                       | 43.6                |
| 5       | 1000                                           | 0.5  | 0.45 | 909.5                                        | 819.7                                          | 257.7                                       | 31.4                |
| 6       | 1000                                           | 0.5  | 0.55 | 867.7                                        | 773.7                                          | 257.1                                       | 33.2                |
| 7       | 1000                                           | 1    | 0.45 | 887.5                                        | 817.6                                          | 211.4                                       | 25.9                |
| 8       | 1000                                           | 1    | 0.55 | 861.7                                        | 791.7                                          | 201.6                                       | 25.5                |
| 9       | 1200                                           | 1    | 0.45 | 1096.4                                       | 1005.1                                         | 208.7                                       | 20.8                |
| 10      | 1200                                           | 1    | 0.55 | 1157.5                                       | 1062.1                                         | 214.1                                       | 20.2                |
| 11      | 1200                                           | 2    | 0.45 | 1078.5                                       | 1016.1                                         | 200.1                                       | 19.7                |
| 12      | 1200                                           | 2    | 0.55 | 1095.8                                       | 1025.9                                         | 196.7                                       | 19.2                |
| 13      | 1400                                           | 1    | 0.45 | 1349.4                                       | 1234.6                                         | 187.7                                       | 15.2                |
| 14      | 1400                                           | 1    | 0.55 | 1375.3                                       | 1249.2                                         | 210.4                                       | 16.8                |
| 15      | 1400                                           | 2    | 0.45 | 1340.4                                       | 1265.6                                         | 180.3                                       | 14.3                |
| 16      | 1400                                           | 2    | 0.55 | 1364.3                                       | 1280.9                                         | 171.4                                       | 13.4                |
| 17      | 1400                                           | 3    | 0.45 | 1336.9                                       | 1282.5                                         | 156.2                                       | 12.2                |
| 18      | 1400                                           | 3    | 0.55 | 1367.9                                       | 1293.8                                         | 178.1                                       | 13.8                |
| 19      | 1600                                           | 2    | 0.45 | 1573.3                                       | 1488.7                                         | 157.7                                       | 10.6                |
| 20      | 1600                                           | 2    | 0.55 | 1522.3                                       | 1425.6                                         | 175.1                                       | 12.3                |
| 21      | 1600                                           | 3    | 0.45 | 1549.0                                       | 1470.3                                         | 152.9                                       | 10.4                |
| 22      | 1600                                           | 3    | 0.55 | 1583.6                                       | 1463.3                                         | 173.1                                       | 11.8                |
| 23      | 1800                                           | 2    | 0.45 | 1789.3                                       | 1686.0                                         | 166.9                                       | 9.9                 |
| 24      | 1800                                           | 2    | 0.55 | 1764.7                                       | 1655.0                                         | 179.1                                       | 10.8                |
| 25      | 1800                                           | 3    | 0.45 | 1766.0                                       | 1689.7                                         | 139.9                                       | 8.3                 |
| 26      | 1800                                           | 3    | 0.55 | 1733.3                                       | 1650.1                                         | 150.9                                       | 9.1                 |

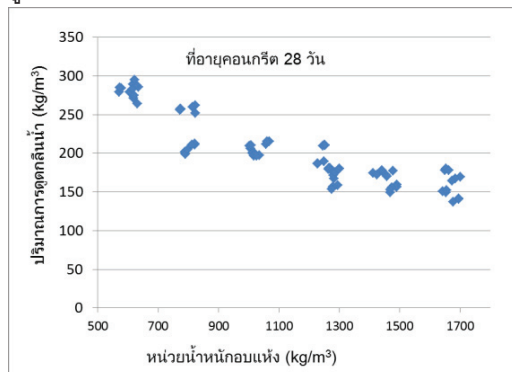


## 5.1 ปริมาณและร้อยละการดูดกลืนน้ำ

การนำเสนอค่าการดูดกลืนน้ำอาจนำเสนอในรูปของค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำและร้อยละการดูดกลืนน้ำ ซึ่งในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส แนะนำให้ใช้เป็นค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำ [18] ซึ่งแสดงในรูปที่ 18 ค่าหน่วยน้ำหนักของแห้งกับค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วน รูปที่ 19 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักของแห้งกับค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำ จะเห็นได้ชัดว่าการดูดกลืนน้ำแปรผกผันกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต โดยมีค่าแบ่งเป็นช่วงตามหน่วยน้ำหนัก

ปริมาณการดูดกลืนน้ำสูงสุดพบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 623 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีการดูดกลืนน้ำประมาณ 285.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 45.9

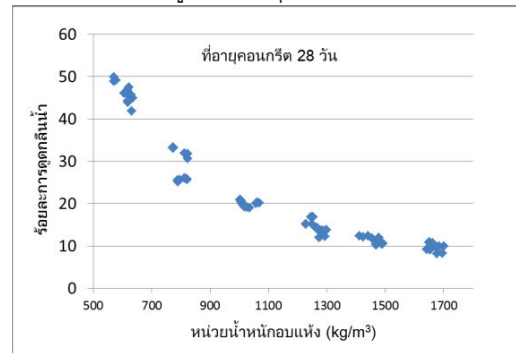
ปริมาณการดูดกลืนน้ำต่ำสุดพบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 1690 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดกลืนน้ำประมาณ 140 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 8.3



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักของแห้งกับค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ร้อยละการดูดกลืนน้ำสูงสุดพบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 573.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ร้อยละการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ประมาณ 49.3 คิดเป็น 282.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนร้อยละการดูดกลืนน้ำต่ำสุดมีค่าร้อยละ 8.3 พบที่สูตรเดียวกันกับ

กรณีปริมาณการดูดกลืนน้ำต่ำสุดที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักของแห้งกับค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำ

## 5.2 กำลังรับแรงอัดและร้อยละการดูดกลืนน้ำ

เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ให้ค่าต่ำกว่ารูปทรงกระบอก ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยกว่าสำหรับการนำไปใช้งาน จึงนำเสนอผลการศึกษากำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 56 วัน เทียบกับค่าการดูดกลืนน้ำ

ค่ากำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ต่ำสุด คือ ประมาณ 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ต่อ 1 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีปริมาณการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ประมาณ 283.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ ค่าการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ร้อยละ 46.3 ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 ต่อ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีปริมาณการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ประมาณ 166.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10

ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800, 1000, 1200, 1400, 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วงประมาณ 14-28, 21-41, 28-56, 47-95, 100-117 และ 144-185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีปริมาณการดูดกลืนน้ำอยู่ที่ประมาณ 273.7-285.8, 201.6-257.7, 196.7-214.1, 156.2-210.4, 152.9-175.1, 139.9-179.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ ค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 43.6-49.3, 25.5-33.2, 19.2-20.8, 12.2-16.8, 10.4-12.3 และ 8.3-10.8 ตามลำดับ

## 6. ผลเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

ผลการศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการนำไปใช้งาน ที่นำเสนอในตารางสรุปข้างล่างนี้ (ตารางที่ 3) เพื่อความปลอดภัยจึงเลือกใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์เนื่องจากให้ค่าต่ำกว่ารูปทรงกระบอก ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.5 ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานที่เกี่ยวข้องโดยสรุปมีดังนี้

**1) มอก. 58-2533 [15]** มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก กำหนดให้ค่ากำลังอัดต่ำสุดเฉลี่ยจากพื้นที่รวมมีค่า 2.5 เมกะปาสคาล หรือ ประมาณ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

**2) มอก. 57-2533 [16]** มาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ชั้นคุณภาพ ก กำหนดให้ค่ากำลังอัดต่ำสุดเฉลี่ยจากพื้นที่สุทธิมีค่า 14 เมกะปาสคาล หรือ ประมาณ 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มี 2 กรณีที่เกี่ยวข้อง คือ

กรณี (1) ที่ค่าหน่วยน้ำหนักอบแห้งน้อยกว่าและเท่ากับ 1680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด 240 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ

กรณี (2) ที่ค่าหน่วยน้ำหนักอบแห้งระหว่าง 1680-1760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด 224 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

**3) มอก.2601-2556 [11]** มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ แบ่งออกเป็น 8 ชนิด ได้แก่ ชนิด C6, C7, C8, C9, C10, C12, C14 และ C16 โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 501-600, 601-700, 701-800, 801-900, 901-1000, 1001-1200, 1201-1400 และ 1401-1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

ค่ากำลังรับแรงอัดของชนิด C6, C7 และ C8 ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 20.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าดูดกลืนน้ำไม่เกินร้อยละ 25

ค่ากำลังรับแรงอัดของชนิด C9, C10 และ C12 ไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าดูดกลืนน้ำไม่เกินร้อยละ 23

ค่ากำลังรับแรงอัดของชนิด C14 และ C16 ไม่น้อยกว่า 51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าดูดกลืนน้ำไม่เกินร้อยละ 20

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

| มาตรฐาน                                            | หน่วยน้ำหนัก<br>(kg/m <sup>3</sup> )                 | s/c  | w/c  | กำลังอัด<br>(ksc) | ร้อยละการดูดกลืนน้ำ |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------|------|-------------------|---------------------|
| <b>1) มอก. 58-2533</b>                             | 800                                                  | 0.25 | 0.55 | 27.8              | 45.9                |
|                                                    | 1000                                                 | 0.5  | 0.45 | 34.1              | 31.4                |
|                                                    | 1000                                                 | 0.5  | 0.55 | 41.2              | 33.2                |
|                                                    | 1000                                                 | 1    | 0.55 | 29.0              | 25.5                |
|                                                    | ผ่านทุกสูตรหน่วยน้ำหนัก 1200 -1800 kg/m <sup>3</sup> |      |      |                   |                     |
| <b>2) มอก. 57-2533</b><br>ชั้นคุณภาพ ก<br>กรณี (1) | 1800<br>(1650)*                                      | 3    | 0.55 | 144.5             | 151**               |
|                                                    | 1800<br>(1655)*                                      | 2    | 0.55 | 175.6             | 179**               |
| กรณี (2)                                           | 1800<br>(1690)*                                      | 3    | 0.45 | 175.5             | 140**               |
|                                                    | 1800<br>(1686)*                                      | 2    | 0.45 | 185.0             | 167**               |
| <b>3) มอก. 2601-2556</b><br>ชนิด C9, C10 และ C12   | 1200<br>(1185)*                                      | 1    | 0.45 | 49.0              | 20.8                |
|                                                    | 1200<br>(1140)*                                      | 1    | 0.55 | 55.6              | 20.2                |
|                                                    | 1200<br>(1171)*                                      | 2    | 0.45 | 28.0              | 19.7                |
|                                                    | 1200<br>(1182)*                                      | 2    | 0.55 | 28.4              | 19.2                |
| ชนิด C14 และ C16                                   | ผ่านทุกสูตรหน่วยน้ำหนัก 1400-1600 kg/m <sup>3</sup>  |      |      |                   |                     |

หมายเหตุ \* คือค่าหน่วยน้ำหนักอบแห้ง

\*\* ปริมาณการดูดกลืนน้ำ หน่วยเป็น kg/m<sup>3</sup>

## 7. สรุป

จากผลการศึกษา กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์มาตรฐาน และการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบในช่วง 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 26 สูตร เพื่อหาแนวโน้มกำลังรับแรงและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เปรียบเทียบกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง สรุปได้ว่า

(1) ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอก อยู่ในช่วงประมาณ 10.4-176.3, 14.7-185.5, 16.1-211 และ 17.9-242 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และ ค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ อยู่ในช่วงประมาณ 10.7-142, 11.7-155, 12.2-176 และ 14.1-185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

(2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสแปรผกผันกับปริมาณทราย ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มาก

(3) ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1400-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายคอนกรีตปกติ แต่ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 คอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่า ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่มีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตเนื่องจากวิธีการบ่มแห้งในอากาศ

(4) ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำพบอยู่ในช่วง 140 -285.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ ค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำพบอยู่ในช่วงร้อยละ 8.3-49.3

(5) คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่มีหน่วยน้ำหนักน้อย มีปริมาณฟองอากาศมากและมีค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำสูง คอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักเดียวกันและใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากัน เมื่อใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มาก มีแนวโน้มที่ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำน้อยกว่า

(6) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ พบว่า ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากัน สูตรที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจะให้ค่าปริมาณการดูดกลืนน้ำน้อยด้วย

(7) สรุปผลการศึกษาเทียบกับมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ พบว่าสูตรที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1200, 1400, 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเทียบเคียงได้กับ มอก. 2601-2556 ชนิด C12, C14 และ C16 ตามลำดับ

## 8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบข้อสังเกตที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาในอนาคต 2 ประเด็นสำคัญ คือ

(1) การบ่มคอนกรีตแห้งในอากาศ ทำให้มีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตซึ่งส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เสนอให้มีการวัดอัตราการระเหยน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส กำลังรับแรงอัด ที่อายุต่างๆ ของคอนกรีต รวมถึงเทียบกับการบ่มชื้นที่อายุต่างๆ ด้วย

(2) การศึกษาเรื่องความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตโครงสร้างภายใน ทั้งขนาดและลักษณะของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตของทั้งรูปทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์มาตรฐาน เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดสำคัญถึงคุณสมบัติการใช้งานต่างๆ และ กำลังของคอนกรีตประเภทฟองโฟมนี้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท แอลซีเอ็ม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบเครื่องมือและน้ำยาโม่สำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Narayanan N. and Ramamurthy K. 2000. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement & Concrete Composites. 22: 321-329.
- [2] Fouad H. Fouad. 2006. Cellular concrete. Joseph F.Lamond and James H.Pielert (eds). in: significance of tests and properties of concrete and concrete- making material, p561-569. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [3] Nambiar E.K.K. and Ramamurthy K. 2007. Air void characterisation of foam concrete. Cement and Concrete Composites. 37: 221-230.
- [4] Shetty M.S. 2000. Concrete Technology: Theory and Practice. S.CHAND & COMPANY. Ram Nagar, New Delhi.

- [5] Gambhir M. L. 2013. Concrete Technology: Theory and Practice, 5ed. McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi.
- [6] Kosmatka Steven H., Kerkhoff B., and Panarese William C. 2003. Design and control of concrete mixtures, 14ed. Portland Cement Association.
- [7] Sengupta J. 1992. Development and application of light weight aerated concrete blocks from Fly ash. Indian Concr J. 66:383-7.
- [8] Durack JM. and Weiqing L. 1998. The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production. Proceedings of the Fifth Australasian Masonry Conference, Gladstone, The Queensland, Australia. p.129-38.
- [9] Ramamurthy K. and Narayanan N. 1999. Influence of fly ash on the properties of aerated concrete. Proceedings of the International Conference on Waste as Secondary Sources of Building Materials. New Delhi: p. 276-82.
- [10] มอก. 1505-2541. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2541.
- [11] มอก. 2601-2556. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2556.
- [12] Rodriguez A., Pedraza M., Luciano J. and Constantiner D. 1999. Mixture design optimisation of Cellular concrete. Ravindra K Dhir and Neil A Henderson. (eds). in: specialist techniques and materials for concrete construction. Thomas Telford Publishing. London.
- [13] อิทธิเชษฐ อุตะธีรวิชัย และธนกร ทวีวุฒิ. 2553. คุณสมบัติการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 12-14 พฤษภาคม 2553 ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จ.อุบลราชธานี.
- [14] ธนกร ทวีวุฒิ, อิทธิพงศ์ พันธนิกุล, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และสถาพร โภคา. 2556. กำลังรับแรงอัดของ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. การประชุมวิชาการ คอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9. 21-23 ตุลาคม 2556 โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก.
- [15] มอก. 58-2533. มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2533.
- [16] มอก. 57-2533. มาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2533.
- [17] Neville Adam M. 2003. Properties of Concrete. Fourth Edition. Pearson Prentice Hall. England.
- [18] Kunhanandan Nambiar E.K. and Ramamurthy. K. 2006. Influence of filler type on the properties of foam concrete. Cement & Concrete Composites. 28 475-480.
- [19] Falade F., Ikponmwosa E. and Fapohunda C. 2013. A Study on the compressive and tensile strength of foamed concrete containing pulverized bone as a partial replacement of cement. Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol. 13, p. 82-93.
- [20] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. 2001. Porosity and permeability of foamed concrete. Cement and Concrete Research. 31: 805-812.
- [21] ชัชวาล เศรษฐบุต. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี. คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค พิมพ์ครั้งที่ 4.