



บทความวิจัย

## การใช้ประโยชน์ของเส้นใยและเถ้าผักตบชวาเพื่อเป็นวัสดุเสริมของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

### Utilization of water hyacinth fiber and water hyacinth ash as supplementary materials of non-load bearing concrete block

คณาธิป คำเพราะ<sup>1\*</sup> จริยาวรรณ กุณาศรี<sup>2</sup> วรพงษ์ เทียมสอน<sup>2</sup> อภินันท์ นันทิยา<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

<sup>2</sup> ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Kanatip Kumproa<sup>1\*</sup> Jariyawan Kunasri<sup>2</sup> Worapong Thiamsorn<sup>2</sup> Apinon Nuntiya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Agricultural Engineering and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok Chonburi 20110

<sup>2</sup> Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University Chiang Mai 50200

\* Corresponding author.

E-mail: kanatip\_ku@rmutto.ac.th; Telephone: 0 8705 66769

วันที่รับบทความ 3 กันยายน 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 20 ตุลาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 22 กุมภาพันธ์ 2567

วันที่ตอบรับบทความ 5 พฤษภาคม 2567

#### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือประเมินศักยภาพของเส้นใยผักตบชวาและเถ้าผักตบชวา สำหรับเป็นวัสดุผสมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักผลิตคอนกรีตบล็อกที่เสริมด้วยเส้นใยผักตบชวา ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และเถ้าผักตบชวา ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เช่นเดียวกัน รวมทั้งเสริมด้วยวัสดุผสมของเส้นใยผักตบชวาร่วมกับเถ้าผักตบชวา นอกจากนี้ศึกษาสมบัติกายภาพ เจียงกล และความร้อนของคอนกรีต พบว่า เส้นใยผักตบชวาและเถ้าผักตบชวาเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตบล็อก โดยปริมาณเส้นใยผักตบชวาและเถ้าผักตบชวาที่เสริมในคอนกรีตบล็อกแปรผกผันกับน้ำหนัก ค่าความต้านทานกำลังอัด และค่าการนำความร้อน แต่แปรผันตรงกับค่าการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยผักตบชวาส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลง ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าผักตบชวาส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตบล็อกเสริมด้วยเส้นใยผักตบชวา ปริมาณ 6 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และคอนกรีตบล็อกเสริมด้วยเถ้าผักตบชวา ปริมาณ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีสมบัติตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 แต่คอนกรีตบล็อกเสริมด้วยเส้นใยผักตบชวา ปริมาณ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าความต้านทานกำลังอัดต่ำที่สุด จึงเสริมคอนกรีตบล็อกดังกล่าวด้วยเถ้าผักตบชวา ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าค่าความต้านทานกำลังอัดเพิ่มขึ้นและมีค่าตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560

#### คำสำคัญ

คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ผักตบชวา ค่าความต้านทานกำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

#### Abstract

The objective of the research is to evaluate the potential of water hyacinth fiber and water hyacinth ash as supplementary materials for producing non-load bearing concrete block. In addition, the research aims to produce the

concrete block reinforced with water hyacinth fiber (2, 4, 6, 8 and 10 %wt by cement), water hyacinth ash (2, 4, 6, 8 and 10 %wt by cement) and the mixture of water hyacinth fiber combined with water hyacinth ash. It includes investigation of the concrete block reinforced with water hyacinth fiber/water hyacinth ash in terms of physical, mechanical and thermal properties. The results revealed that water hyacinth fiber and WHA were considered as the suitable supplementary materials in the production of concrete block. The weight, compressive strength and thermal conductivity of the concrete block decreased with the increasing of water hyacinth fiber and water hyacinth ash content; however, the water absorption increased with the increasing of the supplementary materials. The density of the concrete block decreased with increasing of water hyacinth fiber content. On the other hand, the density increased with increasing of water hyacinth ash content. The concrete block reinforced with 6 %wt of water hyacinth fiber and 8-10 %wt of water hyacinth ash were the most suitable content as the properties met the industrial standard (TIS58-2560), but the compressive strength of the concrete block reinforced with 8-10 %wt of water hyacinth fiber were the lowest. Therefore, this concrete block was improved the compressive strength by adding of 4-8 %wt of water hyacinth ash. The result indicated that the compressive strength increased with the increasing of water hyacinth ash; furthermore, the concrete block reinforced with the mixture of 8 %wt of water hyacinth fiber combined with 4-8 %wt of water hyacinth ash met the industrial standard (TIS58-2560).

### Keywords

non-load bearing concrete block; water hyacinth; compressive strength; thermal conductivity

## 1. บทนำ

การนำของเสียมมาใช้เป็นวัสดุเสริมเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้างต่างๆ ที่ใช้สร้างอาคารประหยัดพลังงาน (Green building) เป็นการใช้อย่างชาญฉลาดของเสียมที่ได้รับความนิยมและนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม เพราะช่วยลดปริมาณของเสียมที่ต้องกำจัด ลดต้นทุนการผลิต และของเสียบางชนิดยังช่วยปรับปรุงสมบัติในด้านต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น [1,2]

คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Non-load bearing concrete block) หมายถึง คอนกรีตบล็อกใช้สำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนักบรรทุกใดๆ มีลักษณะเป็นบล็อกรูกลวง ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของการเป็นฉนวน แต่วัสดุของคอนกรีตบล็อกนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลให้การนำความร้อนมีค่าสูง ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตบล็อกโดยใช้วัสดุเสริมที่มีค่าการนำความร้อนต่ำหรือวัสดุเสริมที่มีโครงสร้างรูพรุนจะสามารถช่วยลดการนำความร้อนให้กับคอนกรีตบล็อกได้ [3]

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นวัชพืชรุกรานที่หาได้ง่ายและมีอยู่ทั่วไปตามแม่น้ำลำคลอง อีกทั้งขยายพันธุ์ได้ง่ายจนทำให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และกลายเป็นขยะวัชพืชน้ำ ที่เป็นอุปสรรคกีดขวางการระบายน้ำ ดังนั้นนักวิจัยบางกลุ่ม [4-6] จึงได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของ

ผักตบชวาเพื่อหาแนวทางการใช้ประโยชน์พบว่าผักตบชวามีปริมาณเยื่อใยสูง (28.38 %wt) และค่าการนำความร้อนต่ำ (0.047 W/m.k) นอกจากนี้ถ้าผักตบชวามีความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีต นักวิจัยส่วนใหญ่จึงใช้ผักตบชวาแห้งและถ้าผักตบชวาเป็นวัสดุเสริมในคอนกรีตบล็อกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ โดยโดยงานวิจัยของ Subpa-Asa และคณะ [7] และตฤณ และอารัญ [8] พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของผักตบชวาในคอนกรีตบล็อกทำให้ค่าความต้านทานกำลังอัดลดลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Philip และคณะ [9] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาในคอนกรีตบล็อกทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Neelu และ Shashikant [6] Balassundaram และ Muruges [10] และ Shyam และ Muruges [11] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ้าผักตบชวาในคอนกรีตบล็อกทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6-11] สรุปได้ว่าการเสริมเส้นใยและถ้าผักตบชวาในคอนกรีตบล็อกส่งผลให้คอนกรีตบล็อกมีค่าการดูดซึมน้ำ และค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเสริมคอนกรีตบล็อกด้วยเส้นใยผักตบชวาส่งผลให้คอนกรีตบล็อกมีค่าความต้านทานกำลังอัดลดลง ดังนั้นการเสริมคอนกรีตบล็อกด้วยวัสดุผสมของเส้นใยและถ้าผักตบชวาจึงมีความเป็นไปได้ที่

จะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อก โดยวัตถุดิบของงานวิจัยนี้คือประเมินศักยภาพของเส้นใยและเถ้าฝักตบชาสำหรับเป็นวัสดุผสมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักผลิตคอนกรีตบล็อกที่เสริมด้วยเส้นใยฝักตบชา ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเถ้าฝักตบชา ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ รวมทั้งเสริมด้วยวัสดุผสมของเส้นใยและเถ้าฝักตบชา นอกจากนี้ศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติกายภาพ เชิงกล และความร้อนของคอนกรีตบล็อก ได้แก่ น้ำหนัก ความหนาแน่น ค่าความต้านทานกำลังอัด ค่าการนำความร้อน และค่าการดูดซึมน้ำ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 [12]

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมและวิเคราะห์วัตถุดิบ

เตรียมเส้นใยฝักตบชา (WHF) จากอ่างเก็บน้ำบางพระ จังหวัดชลบุรี ด้วยการบด และอบโดยใช้ตู้อบลมร้อน (Memmert) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [6] ดังรูปที่ 1(ก)

เตรียมเถ้าฝักตบชา (WHA) โดยการเผาฝักตบชาที่ผ่านการอบแล้วด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช [13] ดังรูปที่ 1(ข) นอกจากนี้เตรียมวัตถุดิบอื่นๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น และทรายหยาบตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 [12]



รูปที่ 1 ฝักตบชา; (ก) เส้นใยฝักตบชา และ (ข) เถ้าฝักตบชา

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ WHF ด้วยวิธี proximate analysis ได้แก่ วัตถุแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีนหยาบ (Crude protein, CP) ไขมัน (Ether extract,

EE) เยื่อใย (Crude fiber) (CF) เถ้า (Ash) และคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ง่าย (Nitrogen free extract, NFE) นอกจากนี้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ WHA ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีของ WHA [14,15] ด้วยค่าโมดูลัสไฮเดรชัน (Hydration Modulus, HM) โมดูลัสซิลิกา (Silica Modulus, SM) โมดูลัสเหล็ก (Iron Modulus, IM) และตัวประกอบการอิ่มตัวของปูนขาว (Lime Saturation Factor, LSF) โดยคำนวณจากสมการ (1)-(4)

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

$$LSF = \frac{CaO - 0.7SO_3}{2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3} \quad (4)$$

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณการเสริม WHF (0, 2, 4, 6, 8 และ 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) WHA (0, 2, 4, 6, 8 และ 10 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) และวัสดุผสมของ WHF และ WHA ในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักต่อลักษณะทางกายภาพ น้ำหนัก ความหนาแน่น ค่าความต้านทานกำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าการดูดซึมน้ำ โดยผลผลิตได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น ทรายหยาบ ซึ่งเสริมด้วย WHF, WHA และวัสดุผสมของ WHF ร่วมกับ WHA ดังตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องมือผสมปูนซีเมนต์แล้วขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อก ขนาด 0.07 × 0.19 × 0.39 m ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 ดังรูปที่ 2 จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 14 วัน แล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสปริง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

สภาวะ	ส่วนผสม (x 10 <sup>5</sup> g/m <sup>3</sup> )					
	ปูนซีเมนต์	หิน ฝุ่น	ทราย หยาบ	น้ำ	WHF	WHA
ควบคุม	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0
2%WHF	3.0	8.0	4.0	1.0	0.06	0
4%WHF	3.0	8.0	4.0	1.0	0.12	0
6%WHF	3.0	8.0	4.0	1.0	0.18	0
8%WHF	3.0	8.0	4.0	1.0	0.24	0
10%WHF	3.0	8.0	4.0	1.0	0.30	0
2%WHA	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0.06
4%WHA	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0.12
6%WHA	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0.18
8%WHA	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0.24
10%WHA	3.0	8.0	4.0	1.0	0	0.30



รูปที่ 2 การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อก

### 2.3 การทดสอบหาค่าความหนาแน่น

ทดสอบหาค่าความหนาแน่น [16] ของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักด้วยการแช่ตัวอย่างในน้ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างในน้ำ ( $m_i$ ) และนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ( $m_s$ ) แล้วปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก ( $m_d$ ) คำนวณค่าความหนาแน่น จากสมการ (5)

$$\rho = \frac{m_d \times 1000}{m_s \times m_i} \quad (5)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )  $m_s$ ,  $m_d$  และ  $m_i$  คือ มวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ มวลชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง และมวลชิ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ ในหน่วย kg ตามลำดับ

### 2.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานกำลังอัด

ทดสอบหาค่าความต้านทานกำลังอัด (Compressive strength) [16] ของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก สภาวะละ 5 ก้อน โดยทดสอบตัวอย่างเพื่อหาค่าแรงอัดสูงสุด ( $F$ ) ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Baldwin S/N: 200HVL-1034) จากนั้นนำค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้คำนวณหาค่าความต้านทานกำลังอัด ( $P$ ) จากสมการ (6)

$$P = \frac{F}{A_n} \quad (6)$$

โดย  $P$ ,  $F$  และ  $A_n$  คือ ความต้านทานแรงอัดสุทธิ (MPa) แรงอัดสูงสุด (N) และพื้นที่หน้าตัดสุทธิ ( $\text{mm}^2$ ) ตามลำดับ

### 2.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) [17] ของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างขนาด  $0.05 \times 0.05 \text{ m}$  ( $A$ ) หนา  $0.0254 \text{ m}$  ( $x$ ) วางบน hot plate (US150, Stuart) ที่อุณหภูมิ  $673.15 \text{ K}$  เป็นเวลา 20 นาที แล้วใช้เครื่องวัดอุณหภูมิวัดอุณหภูมิตรงกลางของตัวอย่างคอนกรีต โดยคำนวณค่าการนำความร้อน จากสมการ (7)

$$Q = k \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

โดย  $Q$  คือ ฟลักซ์ความร้อน ( $\text{kW/m}^2$ )  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $\text{W/m.K}$ )  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ( $\text{m}^2$ )  $dT$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K) และ  $dx$  คือ ระยะของชิ้นงาน (m) นอกจากนี้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imager IR Thermometer, EXTECH IRC130) ถ่ายภาพอินฟราเรดของตัวอย่างชิ้นงานที่ทดสอบทั้งด้านข้างและด้านบนของชิ้นงานในขณะที่ตัวอย่างชิ้นงานอยู่บน hot plate ที่อุณหภูมิ  $673.15 \text{ K}$  เป็นเวลา 20 นาที

## 2.6 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ

ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) [16] ของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยแช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ให้ระดับน้ำสูงกว่าผิวตัวอย่าง จากนั้นยกตัวอย่างขึ้น โดยให้น้ำสามารถไหลออกจากตัวอย่างได้ แล้วเช็ดผิวให้แห้ง และนำไปชั่งน้ำหนัก ( $m_s$ ) นำตัวอย่างปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ( $m_d$ ) เพื่อคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำจากสมการ (8)

$$WA = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (8)$$

โดย  $WA$ ,  $m_s$  และ  $m_d$  คือ ค่าการดูดซึมน้ำ (%) มวลขึ้นทดสอบเมื่ออิมิตัวด้วยน้ำ (kg) และมวลขึ้นทดสอบเมื่อแห้ง (kg) ตามลำดับ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA) แบบ Duncan ด้วยโปรแกรม Statistical Package for the Social Science (SPSS)

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 3.1 การประเมินศักยภาพของ WHF และ WHA สำหรับใช้เป็นวัสดุผสมของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ WHF ด้วยวิธี proximate analysis พบว่าเยื่อใยของผักตบชวามีปริมาณสูงเท่ากับ  $41.22 \pm 0.51$  %wt ดังนั้นรุกรุนซึ่งเกิดจากเยื่อใยของผักตบชวาจึงมีปริมาณมากด้วย ส่งผลให้ WHF มีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำสูง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ และน้ำหนักเบา [4,18-20] นอกจากนี้ผักตบชวายังมีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง เท่ากับ  $13.47 \pm 0.73$  %wt ซึ่งเถ้ามีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักสำหรับการผลิตคอนกรีต [15,16,21-23]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของ WHF

องค์ประกอบทางเคมี	WHF
CP (%wt)	$4.50 \pm 0.19$
CF (%wt)	$41.22 \pm 0.51$
EE (%wt)	$0.51 \pm 0.04$
DM (%wt)	$10.93 \pm 0.99$
Ash (%wt)	$13.47 \pm 0.73$
NFE (%wt)	$60.06 \pm 0.58$

งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ WHA ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ WHA แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีหลัก ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ของ WHA กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ( $\text{SiO}_2$  17.0-25.0 %wt,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3.0-8.0 %wt,  $\text{CaO}$  60.0-67.0 %wt และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.5-0.6 %wt) พบว่า WHA มีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีหลักน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีหลักรวมกันไม่ถึง 90 %wt [16,21,22] ซึ่งการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ WHA ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Neelu และ Shashikant [6] Balassundaram และ Muruges [10] และ Shyam และ Muruges [11] อย่างไรก็ตาม WHA มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ใกล้เคียงกับหินปูน (6.14 และ 2.27 %wt ตามลำดับ) [14] และมีปริมาณ  $\text{CaO}$  ใกล้เคียงกับตะกรันเหล็ก (25.00 %wt) [24] เนื่องจาก WHA จัดเป็นเถ้าลอยซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  [25] จึงมักใช้เป็นวัสดุเสริมในการผลิตคอนกรีตบล็อก นอกจากนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีของ WHA พบว่าค่าโมดูลัสไฮเดรชัน (HM) โมดูลัสซิลิกา (SM) โมดูลัสเหล็ก (IM) และค่าตัวประกอบการอิมิตัวของปูนขาว (LSF) ของ WHA อยู่ในช่วงที่เหมาะสม [14,15] โดยปกติแล้วค่า HM ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.1-2.4 ซึ่งเป็นค่ากำหนดสมบัติความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ค่า SM ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 2.0-3.0 สำหรับการเกิดเม็ดปูน (clinker) เนื่องจากยังมีอัตราส่วน  $\text{SiO}_2$  มาก จะยังเกิดแคลเซียมซิลิกเกตมาก ค่า IM ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-4 ซึ่งค่า IM เป็นค่าที่บอกสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และค่า LSF เป็นค่าควบคุมการเกิดปูนเม็ด ซึ่งพบว่าค่า

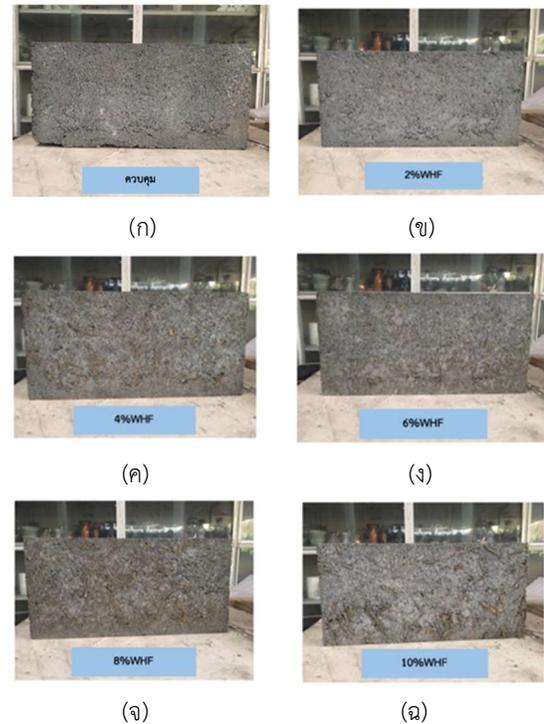
LSF ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.92-0.98 เนื่องจากการเกิดปูนเม็ดเป็นการเกิดสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ ดังนั้น WHA จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เพราะ WHA มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ค่อนข้างสูง โดย  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของปูนซีเมนต์ โดยจะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติให้ค่ากำลังอัดแก่คอนกรีตตามอายุการบ่ม [23]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ของ WHA

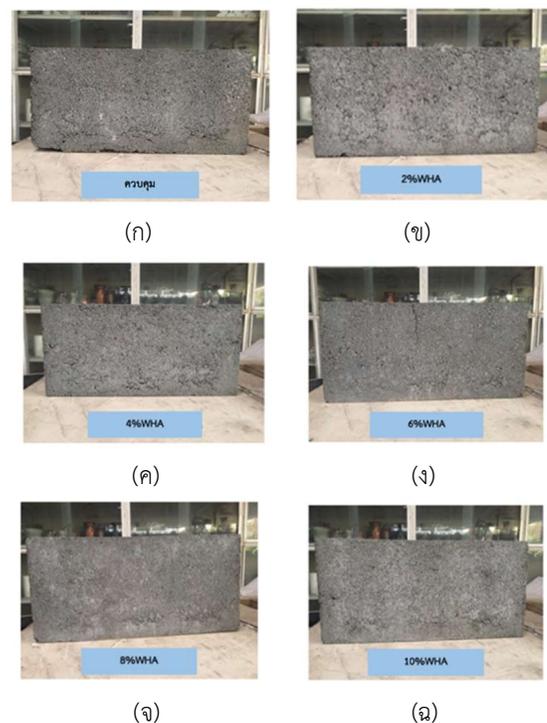
องค์ประกอบทางเคมี	WHA
$\text{SiO}_2$ (%wt)	6.58±0.59
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%wt)	2.50±0.32
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%wt)	1.09±0.04
CaO (%wt)	24.28±0.62
MgO (%wt)	14.75±1.01
$\text{SO}_3$ (%wt)	4.98±0.46
$\text{Na}_2\text{O}$ (%wt)	0.24±0.06
$\text{K}_2\text{O}$ (%wt)	14.18±0.15
HM	2.39±0.12
SM	1.85±0.32
IM	2.29±0.26
LSF	0.96±0.12

### 3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

รูปที่ 3 แสดงลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF พบว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF สามารถขึ้นรูปได้ ผิวเรียบ และเหลี่ยมมุมชัดเจน โดย WHF ปริมาณ 2-6 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่เสริมในคอนกรีตบล็อกสามารถกระจายตัวได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ WHF ตั้งแต่ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ กลับพบว่า WHF เกาะกลุ่มและกระจายตัวได้ไม่ดี ส่งผลให้มีรอยแตกบริเวณขอบของคอนกรีตบล็อก



รูปที่ 3 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF; (ก) ควบคุม, (ข) 2 %wt WHF, (ค) 4 %wt WHF, (ง) 6 %wt WHF, (จ) 8 %wt WHF และ (ฉ) 10 %wt WHF



รูปที่ 4 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHA; (ก) ควบคุม, (ข) 2 %wt WHA, (ค) 4 %wt WHA, (ง) 6 %wt WHA, (จ) 8 %wt WHA และ (ฉ) 10 %wt WHA

รูปที่ 4 แสดงลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHA พบว่าคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองมีผิวเรียบ และเหลี่ยมมุมชัดเจน นอกจากนี้สีของคอนกรีตบล็อกชุดควบคุมและคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA ทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกัน แสดงว่า WHA สามารถกระจายตัวได้ดีในคอนกรีตบล็อก

ตารางที่ 4 น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (kg)
ควบคุม	0%wt	7.0±0.6
WHF	2%wt	7.0±0.2
	4%wt	6.9±0.2
	6%wt	6.8±0.2
	8%wt	6.6±0.6
	10%wt	6.4±0.9
WHA	2%wt	7.0±0.3
	4%wt	7.0±0.4
	6%wt	6.9±0.3
	8%wt	6.8±0.1
	10%wt	6.8±0.3

### 3.3 ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตารางที่ 4 แสดงน้ำหนัก (weight) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณต่างๆ พบว่าน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตบล็อกมีการเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกลดลง ซึ่งน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่เสริมด้วย WHF ลดลงมากกว่าน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA เนื่องจาก WHF มีลักษณะเป็นเส้นใย มีรูพรุนขนาดใหญ่ และน้ำหนักเบา [7,26] แต่อนุภาคของ WHA มีขนาดเล็กกว่า ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก โดยขนาดของรูพรุนและปริมาณรูพรุนแปรผกผันกับน้ำหนักของคอนกรีต [15,26] จึงส่งผลให้น้ำหนักคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA มากกว่าน้ำหนักคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF โดยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF และ WHA ในงานวิจัยนี้

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Subpa-Asa และคณะ [7] Kiptum และคณะ [26] และภูมิพันธ์ [27] ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาในคอนกรีตบล็อกทำให้น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกลดลง

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตัวอย่าง		ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	
ควบคุม	0%wt	2.19±1.67 <sup>a</sup>	
	WHF	2%wt	2.19±0.61 <sup>a</sup>
		4%wt	2.16±2.30 <sup>b</sup>
		6%wt	2.12±1.11 <sup>c</sup>
		8%wt	2.09±0.28 <sup>d</sup>
		10%wt	2.06±4.21 <sup>e</sup>
WHA	2%wt	2.19±0.73 <sup>a</sup>	
	4%wt	2.19±0.72 <sup>a</sup>	
	6%wt	2.19±6.77 <sup>a</sup>	
	8%wt	2.19±1.22 <sup>a</sup>	
	10%wt	2.19±0.79 <sup>a</sup>	

หมายเหตุ <sup>a, b, c, d และ e</sup> = Means for groups in homogeneous subsets

ความหนาแน่น (density) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 5 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกชุดควบคุมกับคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และทุกชุดการทดลองของการเสริมด้วย WHA ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) และเมื่อเพิ่มปริมาณ WHF ในคอนกรีตบล็อกมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจาก WHF มีลักษณะเป็นเส้นใย มีรูพรุนขนาดใหญ่ [5,9,17] แต่ WHA มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า WHF ทำให้ WHA แทรกตัวในคอนกรีตบล็อกและสามารถปิดโพรงคอนกรีตบล็อกได้ จึงเกิดการแน่นตัว [10,15] ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF น้อยกว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA โดยความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF และ WHA นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Salas-Ruiz และคณะ [5] Philip และคณะ [9] เพ็ญชาย และคณะ [17] และสุชาติและคณะ [28] ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงเมื่อปริมาณการเสริมด้วยผักตบชวาที่มาก

ขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นตามมาตรฐานอุตสาหกรรม [12] พบว่าทุกชุดการทดลองจัดอยู่ในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักที่มีน้ำหนักทั่วไป

**ตารางที่ 6** ค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานกำลังอัด (MPa)
ควบคุม	0%wt 9.93±0.54 <sup>a</sup>
WHF	2%wt 7.38±0.16 <sup>c</sup>
	4%wt 7.28±0.22 <sup>c</sup>
	6%wt 5.51±0.47 <sup>d</sup>
	8%wt 3.83±0.17 <sup>e</sup>
	10%wt 2.84±0.05 <sup>f</sup>
WHA	2%wt 8.69±1.19 <sup>b</sup>
	4%wt 8.55±0.12 <sup>b</sup>
	6%wt 7.02±0.40 <sup>c</sup>
	8%wt 6.63±0.13 <sup>c</sup>
	10%wt 5.83±0.18 <sup>d</sup>

หมายเหตุ a, b, c, d, e และ f = Means for groups in homogeneous subsets

ค่าความต้านทานกำลังอัด (compressive strength) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 6 พบว่าค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF และ WHA ลดลงตามปริมาณ WHF และ WHA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก WHF มีลักษณะเป็นเส้นใย ประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่ คอนกรีตบล็อกจึงมีลักษณะเป็นโพรง [7,8,16,17,26,29] นอกจากนี้อนุภาคของ WHA มีขนาดเล็กกว่า WHF จึงมีปริมาณรูพรุนมากกว่า แต่อนุภาคของ WHA สามารถแทรกตัวในคอนกรีตบล็อกและสามารถปิดโพรงคอนกรีตบล็อกได้ จึงเกิดการแน่นตัวขึ้น [6,11,15,27] ส่งผลให้ค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF น้อยกว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA โดยค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF และ WHA ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Neelu และ Shashikant [6] Subpa-Asa และคณะ [7] ตฤณ และอารัญ [8] Shyam และ Muruges [11] สุวัฒน์ชัย [16] เพ็ญชาย และคณะ [17] Kiptum และคณะ [26] ภูมิพันธ์ [27] และ Boban และคณะ [29] ซึ่งพบว่าปริมาณและขนาดอนุภาค

ของเส้นใยและเส้นใยที่เสริมในคอนกรีตบล็อกแปรผกผันกับค่าความต้านทานกำลังอัด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานกำลังอัดเฉลี่ยจากคอนกรีตบล็อก 5 ก้อนตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ( $\geq 2.5$  MPa) [12] พบว่ามีเพียงคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 8 และ 10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เท่านั้นที่มีค่าต่ำที่สุด

**ตารางที่ 7** ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตัวอย่าง	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)
ควบคุม	0%wt 0.691±0.114
WHF	2%wt 0.678±0.004
	4%wt 0.673±0.059
	6%wt 0.670±0.031
	8%wt 0.669±0.061
	10%wt 0.669±0.005
WHA	2%wt 0.691±0.054
	4%wt 0.670±0.027
	6%wt 0.633±0.061
	8%wt 0.628±0.043
	10%wt 0.622±0.061

ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) เมื่อคอนกรีตบล็อกมีการเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกลดลง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF เนื่องจากขนาดอนุภาคของ WHA เล็กกว่า WHF โดยยิ่ง WHA มีขนาดอนุภาคเล็กจะส่งผลให้ขนาดรูพรุนเล็กและจำนวนรูพรุนมากขึ้นตามไปด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแปรผกผันตามขนาดของรูพรุน ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง [15,30,31] นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อก

เสริมด้วย WHF และ WHA ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Salas-Ruiz และคณะ [5] ตฤณ และอารัญ [8] Philip และคณะ [9] สุวัฒน์ชัย [16] เพ็ญชาย และคณะ [17] Boban และคณะ [29] และ Chen และคณะ [30] ซึ่งพบว่าขนาดรูพรุนเล็กส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง และการเพิ่มปริมาณฝักตบชวาในคอนกรีตบล็อกทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง

**ตารางที่ 8** ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA

ตัวอย่าง	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	
ควบคุม	0%wt	0.9±0.1 <sup>a</sup>
WHF	2%wt	1.4±0.3 <sup>b</sup>
	4%wt	3.0±0.7 <sup>c</sup>
	6%wt	4.4±1.2 <sup>c</sup>
	8%wt	4.6±0.7 <sup>c</sup>
	10%wt	4.7±0.5 <sup>c</sup>
WHA	2%wt	0.9±0.1 <sup>a</sup>
	4%wt	0.9±0.3 <sup>a</sup>
	6%wt	1.4±0.7 <sup>b</sup>
	8%wt	1.5±0.2 <sup>b</sup>
	10%wt	1.5±0.6 <sup>b</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b and c</sup> = Means for groups in homogeneous subsets

ตารางที่ 8 แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ในปริมาณต่างๆ พบว่าคอนกรีตบล็อกชุดควบคุมและคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA ปริมาณ 2 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ WHF และ WHA ในคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นโดยคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 6-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA ปริมาณ 6-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตบล็อกชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) อีกทั้งคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เนื่องจาก WHF มีลักษณะเป็นเส้นใย และรูพรุนขนาดใหญ่ จึงดูดซึมน้ำได้ดีกว่า WHA [31] โดยค่า

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF และ WHA ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Salas-Ruiz และคณะ [5] Neelu และ Shashikant [6] Subpa-Asa และคณะ [7] สุวัฒน์ชัย [16] เพ็ญชาย และคณะ [17] ภูมิพันธ์ [27] และ Boban และคณะ [29] ซึ่งพบว่าการเสริมคอนกรีตบล็อกด้วยฝักตบชวาและเถ้าฝักตบชวาหรือเถ้าแกลบส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้นจาก 14 เป็น 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกลดลง

จากการเปรียบเทียบสมบัติกายภาพเชิงกล และความชื้นของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA กับค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 พบว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าความต้านทานกำลังอัดต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA มีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการปรับปรุงคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยการเสริมคอนกรีตบล็อกดังกล่าวด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานกำลังอัดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมต่อไป

### 3.4 ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ค่าความต้านทานกำลังอัด (compressive strength) ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ WHA ในวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA เพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมของคอนกรีตบล็อกส่งผลให้ค่าความต้านทานกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เนื่องจากอนุภาคของ WHA มีขนาดเล็กกว่า WHF ทำให้ WHA แทรกตัวในโพรงของคอนกรีตบล็อกที่เกิดจากการเสริมด้วย WHF และสามารถปิดโพรงภายในคอนกรีตบล็อกได้

ทำให้เกิดการแน่นตัว จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานกำลังอัดเพิ่มขึ้น [10,15]

**ตารางที่ 9** ค่าความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ตัวอย่าง	ปริมาณ WHA	ค่าความต้านทานกำลังอัด (MPa)
8%WHF	0%wt	3.83±0.17 <sup>a</sup>
	4%wt	4.22±0.26 <sup>b</sup>
	6%wt	4.78±0.09 <sup>c</sup>
	8%wt	5.14±0.16 <sup>d</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b, c และ d</sup> = Means for groups in homogeneous subsets

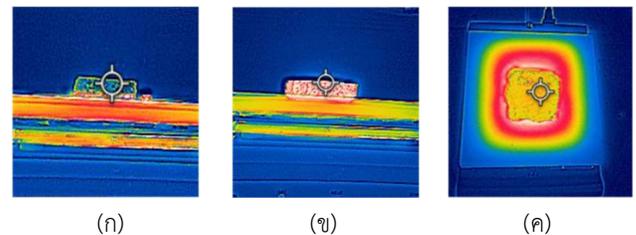
นอกจากนี้วิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน น้ำหนักความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 โดยตารางที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ )

**ตารางที่ 10** ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ตัวอย่าง	ปริมาณ WHA	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.k)
8%WHF	0%wt	0.669±0.061
	4%wt	0.646±0.015
	6%wt	0.625±0.032
	8%wt	0.605±0.165

ภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF

ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย hot plate ที่อุณหภูมิ 673.15 K เป็นเวลา 20 นาที แสดงในรูปที่ 5 โดยรูปที่ 5(ก) เป็นภาพถ่ายความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกพบว่าตัวอย่างเป็นสีเขียว แต่บริเวณ hot plate เป็นสีแดง แสดงว่าอุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกต่ำกว่าอุณหภูมิของ hot plate และรูปที่ 5(ข) แสดงภาพถ่ายความร้อนของด้านข้างตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 673.15 K เป็นเวลา 20 นาที พบว่าด้านข้างตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเป็นสีแดง แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสุดท้ายตัวอย่างคอนกรีตบล็อกมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณโดยรอบ อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 5(ค) แสดงภาพถ่ายความร้อนของด้านบนตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลา 20 นาที พบว่าด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตเป็นสีเหลืองและบริเวณขอบเป็นสีเขียว แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF ร่วมกับ WHA สามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้



**รูปที่ 5** ภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA ปริมาณ 8 %wt; (ก) ด้านข้างของตัวอย่างที่อุณหภูมิเริ่มต้น, (ข) ด้านข้างของตัวอย่างที่อุณหภูมิสุดท้าย เป็นเวลา 20 นาที และ (ค) ด้านบนของตัวอย่างที่อุณหภูมิสุดท้าย เป็นเวลา 20 นาที

ตารางที่ 11 แสดงน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ )

**ตารางที่ 11** น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ตัวอย่าง	ปริมาณ WHA	น้ำหนัก (kg)
8%WHF	0%wt	6.6±0.6
	4%wt	6.7±1.2
	6%wt	6.7±0.2
	8%wt	6.8±0.4

ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อปริมาณ WHA เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกทุกชุดการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เนื่องจากอนุภาคของ WHA มีขนาดเล็ก จึงสามารถแทรกเข้าไปในโพรงของคอนกรีตบล็อกที่เกิดจากการเสริมด้วย WHF ทำให้เกิดการแน่นตัว [10,15]

**ตารางที่ 12** ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ตัวอย่าง	ปริมาณ WHA	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
8%WHF	0%wt	2.09±0.28 <sup>a</sup>
	4%wt	2.10±0.23 <sup>b</sup>
	6%wt	2.13±1.57 <sup>c</sup>
	8%wt	2.15±5.42 <sup>d</sup>

หมายเหตุ <sup>a, b, c และ d</sup> = Means for groups in homogeneous subsets

ตารางที่ 13 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อปริมาณการเสริมด้วย WHA ในคอนกรีตบล็อกแปรผันตรงกับค่าการดูดซึมน้ำ โดยคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย 8%WHF และคอนกรีตบล็อกเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ร่วมกับ WHA ปริมาณ 8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

**ตารางที่ 13** ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วยวัสดุผสมของ WHF ปริมาณ 8 %wt ร่วมกับ WHA

ตัวอย่าง	ปริมาณ WHA	น้ำหนัก (kg)
8%WHF	0%wt	4.6±0.70 <sup>a</sup>
	4%wt	4.6±0.10 <sup>a</sup>
	6%wt	4.6±0.15 <sup>a</sup>
	8%wt	4.8±0.42 <sup>b</sup>

หมายเหตุ <sup>a และ b</sup> = Means for groups in homogeneous subsets

## 6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาสมบัติกายภาพ เชิงกล และความร้อนของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเสริมด้วย WHF และ WHA ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าปริมาณ WHF และ WHA ในคอนกรีตบล็อกแปรผกผันกับน้ำหนัก ค่าความต้านทานกำลังอัด และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แต่แปรผันตรงกับค่าการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณการเสริมด้วย WHF เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF มีค่าลดลง แต่ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเสริมด้วย WHA เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.58-2560 พบว่าคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 6 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHA ปริมาณ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีสมบัติตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังนั้นสรุปได้ว่า WHF และ WHA เป็นวัสดุผสมที่ดีสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก อย่างไรก็ตามคอนกรีตบล็อกเสริมด้วย WHF ปริมาณ 8-10 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีค่าความต้านทานกำลังอัดต่ำที่สุด จึงปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตบล็อกดังกล่าวด้วยการเสริมด้วย WHA ปริมาณ 4-8 %โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อปริมาณ WHA ในคอนกรีตบล็อกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานกำลังอัดเพิ่มขึ้นจนถึงค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากการเสริมวัตถุดิบด้วย WHF และ WHA ดังนั้นงานวิจัยต่อไปจึงเน้นศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ด้วยการทดแทนวัตถุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น และทรายหยาบ ด้วย WHF และ WHA เพื่อลด

ต้นทุนด้านวัตถุดิบ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตวัตถุดิบ

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสมาชิกวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก รวมทั้งภาควิชาเคมี อุตสาหกรรม และศูนย์วิจัยวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับทุนดำเนินการวิจัย อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lim MBB, Abadilla KAV, Consuegra CC, Lim HR. Pulverized blue swimming crab shell utilized as partial replacement for sand in concrete mixture. *The Palawan Scientist*. 2021; 13(1): 31-43.
- [2] ทวีช กล้าแท้. คุณสมบัติด้านกำลังอัดและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเปลือกหอยนางรมบดไม่ผ่านกระบวนการเผา. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*. 2562; 13(1): 25-38.
- [3] พันธุ์ศักดิ์ ภักดี, ฐิตินันท์ รัตนพรหม. การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของแผ่นวัสดุที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยมีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน. *วารสารวิจัยและสารสนเทศสถาปัตยกรรม/การผังเมือง*. 2561; 15(1): 135-145.
- [4] จักรพงษ์ พัวพัน, กฤษภวัฒน์ ภูมิผล, ธนายุทธ อินแพง, รสวิภา ทองดี, ณรงค์มล เล่าห์รอดพันธ์. ผลของการใช้ผักตบชวาทดแทนแหล่งอาหารหยาบต่ออัตราการย่อยได้ในลูกโคนมเพศผู้. *การประชุมวิชาการระดับชาติ “พิบูลสงครามวิจัย 2558” ประจำปี 2558*. พิษณุโลก; 2558.
- [5] Salas-Ruiz A, Barbero-Barrera MDM, Ruiz-Tellez T. Microstructural and thermos-physical characterization of a water hyacinth petiole for thermal insulation particle board manufacture. *Materials*. 2019; 12(4): 1-16.
- [6] Neelu D, Shashikant S. Evaluation of water hyacinth stem ash as pozzolanic material for use in blended cement. *Journal of civil engineering*. 2016; 7(1): 1-8.
- [7] Subra-Asa P, Laokongthavorn L, Date S. The study of effect of lightweight concrete block by water hyacinth adding. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 811: 1-6.
- [8] ตฤณ ดิษฐล่ำภู, อารัญญ วรรณะอาณนท. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เส้นใยผักตบชวา สำหรับทำแผ่นใยอัดซีเมนต์. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*. 2563; 12(3): 262-276.
- [9] Philip S, Ajin A, Vijay A, Satheesh SR, Fasil F. Comparative study of water hyacinth cement composite thermal insulation materials with agro-waste based materials: a review. *The International Journal of Analytical and Experimental Model Analysis*. 2019; 11(10): 1134-1140.
- [10] Balasundaram N, Muruges V. Experimental investigation on properties of concrete by replacing cement with water hyacinth ash. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 7(6S5): 1724-1726.
- [11] Shyam KS, Muruges V. Experimental study on strength of water hyacinth ash as partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Science & Engineering Research*. 2018; 9(3): 93-96.
- [12] กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มาตรฐานเลขที่ มอก.58-2560. *ประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*. กรุงเทพมหานคร; 2563.
- [13] จิวราภรณ์ อินทร์เกลี้ยง, ธัญญา เสาวภาคย์. การนำเถ้าแกลบข้าวมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 ประจำปี 2558*. นครปฐม. 2558; 1636-1642.
- [14] Rao DS, Vijayakumar TV, Prabhakar S, Bhaskar-Raju G. Geochemical assessment of a siliceous limestone sample for cement making. *Chinese Journal of Geochemistry*. 2011; 30: 33-39.
- [15] Taylor HFW. *Cement Chemistry 2<sup>nd</sup> ed*. London: Thomas Telford; 1997.

- [16] สุวัฒน์ชัย ปลื้มฤทัย. การพัฒนาคอนกรีตบล็อกจากผักตบชวา. *วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตบัณฑิตวิทยา ลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร*. กรุงเทพมหานคร. 2555.
- [17] เพ็ญชาย เวียงใต้, ปิยะพล สีหาบุตร, เจษฎ์ศิริ เกื้อนมูลละ, ภคพล ช่างยนต์. การใช้ผักตบชวาผลิตอิฐบล็อกประสานเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร. *รายงานการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*. มหาสารคาม. 2562.
- [18] ขวัญชัย เนตรน้อย, ญาณิศา รัชดาภรณ์วานิช, ศักดา ประจักษ์บุญเจษฎา, สดุดี พงษ์เพ็ญจันทร์, จูรีรัตน์ เงินแดง, และคณะ. การวิเคราะห์ศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารหยาด สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องในจังหวัดเพชรบุรี. *รายงานการวิจัย ส่วนส่งเสริมและพัฒนาการปศุสัตว์ สำนักงานปศุสัตว์เขต 7*. เพชรบุรี. 2560.
- [19] วิทวัส สิงห์สังข์, วิษณุ เจริญถนอม, ณิชกฤตา ประเสริฐโสภา, นवलละออง สระแก้ว, อนิวรรณ ทาสุข, และคณะ. การเตรียมเส้นใยคาร์บอนจากเส้นใยผักตบชวาและการประยุกต์ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะผง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*. 2563; 8(2): 145-158.
- [20] ปิยนุช ใจแก้ว, ชาญชัย คหาปนะ, ฌภัทร โพธิ์วัน. ประสิทธิภาพของผักตบชวาต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากระบบการผลิตปลาร้า. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*. 2565; 10(1): 52-61.
- [22] อธิกานต์ ธิววงศ์คำ. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*. ปทุมธานี. 2558.
- [23] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. ศักยภาพของเถ้าในการเป็นสารปอซโซลาน. *วารสารคอนกรีต*. 2557; 23: 1-26.
- [24] ณรงค์ชัย ปักษา, ทศพล ปิ่นแก้ว. การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสำหรับโครงสร้างแข่งเกร็งพิเศษ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 ประจำปี 2563*. ชลบุรี. 2563.
- [25] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ. อิทธิพลของความละเอียดเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟสดี. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2556; 36(4): 399-408.
- [26] Kiptum CK, Rosasi L, Joseph O, Odhiambo E. Some mechanical characteristics of concrete reinforced with dried water hyacinth and quarry dust as fine aggregates. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*. 2019; 10(2): 94-100.
- [27] ภูมิพันธ์ บุญมาตุ่น. กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก ขนาดโพรง และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*. นครราชสีมา. 2557.
- [28] สุชาติ จันทร์มณี, วาสนา แก่นทองแดง, ภัทรพาน ไอสุวรรณ, ดนุพล ต้นนโยภาส. คุณสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2561; 25(3): 113-121.
- [29] Boban JM, Nair PV, Shiji ST, Cherian SE. Incorporation of water hyacinth in concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2017; 6(5): 540-544.
- [30] Chen G, Li F, Jing P, Geng J, Si Z. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Materials*. 2021; 14: 1-27.
- [31] สนธยา ทองอรุณศรี, วิไลพร นุ่นภักดี, ศรายุทธิ์ หลีแก้วสาย, อรรวรรณ ปัญญาภาค. การพัฒนาคอนกรีตบล็อกพรุนสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2554; 7(2): 22-30.