

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Cellular Lightweight Concrete with Oil Palm Fiber and Biochar



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลล์ลู่ค่าผสมเส้นใยปาล์ม น้ำมันและถ่านชีวภาพ
โดย	น.ส.ปาณิสดา แสงแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม)	
.....	กรรมการ
(ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ)	

ปาณิศา แสงแก้ว : การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและ
 ถ่านชีวภาพ. (Development of Cellular Lightweight Concrete
 with Oil Palm Fiber and Biochar) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข, อ.ที่
 ปรึกษาร่วม : ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete; CLC) โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ กลุ่มตัวอย่างทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ คอนกรีต CLC แบบปกติ, คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม, คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ, คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ จากผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนเส้นใยปาล์มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดึง การถ่ายเทความร้อนของคอนกรีต CLC สูงขึ้น แต่อัตราส่วนการดูดซึมน้ำลดลง สัดส่วนของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย กำลังอัด กำลังดึง สูงขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำและการถ่ายเทความร้อนลดลง งานวิจัยนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานด้านคุณสมบัติและเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมี 2 กลุ่ม ได้แก่ คอนกรีต CLC (โฟมร้อยละ 50) ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 และคอนกรีต CLC (โฟมร้อยละ 60) ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพร้อยละ 1.5 และ 10 กลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มีความสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ซึ่งช่วยประหยัดการใช้พลังงานเครื่องปรับอากาศภายในอาคารได้ ในด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้และมีประโยชน์ในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียต่อปี ดังนั้นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต CLC นั้น จึงช่วยพัฒนาคุณสมบัติบางประการหากใส่ในปริมาณที่เหมาะสม เป็นแนวทางในการกำจัดของเสียและสามารถพัฒนาต่อยอดการผลิตคอนกรีต CLC ได้ในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970446021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD:

Panisa Sangkeaw : Development of Cellular Lightweight Concrete with Oil Palm Fiber and Biochar. Advisor: Assoc. Prof. Withit Pansuk, Ph.D., Rungrawee Wattanapornprom, Ph.D.

This research aims to develop Cellular Lightweight Concrete (CLC) by using Oil Palm Fiber (Fi) and Biochar (Bi). Fi and Bi are the wastes from Agro-Industry. In this study, the specimens are divided into four groups. The first group is the normal CLC. The second is CLC combined with Fi. The third is the CLC mixed with Bi. The fourth is CLC combined Fi and Bi by weight of sand. The experimental results showed that adding Fi in the proportions, the specimens tended to have higher dry density, compressive strength, splitting tensile strength and heat transfer. Fi specimens have less water absorption. In parts of Bi, the specimens tended to have lower dry density, higher compressive strength, splitting tensile strength. Bi specimens have less water absorption and heat transfer. This research study emphasizes on practical usage and elementary economic of CLC. The two groups is the CLC (foam 50%) with Bi 15% and CLC (foam 60%) combined with Fi 1.5% and Bi 10% which are in line with the standard , contain better quality of thermal insulation and save the energy from the usage of the air- conditioner. In part of elementary economic, this study can help reduce cost and expenses in removing waste per year. Therefore CLC with the wastes from Agro-Industry can be utilized in improving the properties of normal CLC if added with a proper amount and it is a way to get rid of waste and can be developed to produce CLC in the future.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิฑิต ปานสุข และ ดร.รุ่งรวี วัฒนพรพรหม ที่ได้ให้คำปรึกษา ทั้งคำแนะนำและความรู้ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ผศ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ และ ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงให้ วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สำหรับการดูแลเรื่องการทดสอบและเครื่องมือทดสอบต่างๆ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้า ตลอดมา



ปาณิสสา แสงแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	4
2.1.1 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber).....	4
2.1.2 ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	5
2.2 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete).....	6
2.2.1 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา	7
2.2.1.1 คอนกรีตมวลเบาที่จำแนกตามหน่วยน้ำหนัก	7
2.2.1.2 คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามกรรมวิธีผลิต	7
2.2.1.3 คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต.....	8
2.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา.....	8

2.3 คอนกรีตมวลเบาโฟม (Foam concrete).....	8
2.3.1 การผลิต Foam concrete.....	9
2.4 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete; CLC).....	9
2.4.1 กระบวนการผลิตโฟมในคอนกรีต CLC.....	10
2.4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส.....	11
2.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบา CLC (มอก.2601-2556).....	15
2.6 การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในงานคอนกรีต	17
2.6.1 เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural Fiber).....	17
2.6.2 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Natural Fiber).....	18
2.6.3 ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	23
3.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น.....	24
3.1.1 การทดสอบเครื่องผสมคอนกรีต (Mixer).....	24
3.1.2 การทดสอบโฟม.....	26
3.2 การทดลองหาส่วนผสมคอนกรีต CLC ด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error).....	27
3.2.1 การจัดเตรียมส่วนผสม.....	27
3.2.2 การออกแบบส่วนผสม.....	28
3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	31
3.4 การทดสอบ.....	32
3.4.1 การทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง.....	32
3.4.2 การทดสอบกำลังอัด	33
3.4.3 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ.....	34
3.4.4 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength).....	35
3.4.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อน.....	36

3.4.5.1 การถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน	36
3.4.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)	39
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (Dry Density).....	41
4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	41
4.1.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน	42
4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ.....	43
4.1.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่าน ชีวภาพ	44
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength).....	46
4.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	46
4.2.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน	48
4.2.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ.....	50
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ	52
4.3 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	54
4.3.1 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน.....	54
4.3.2 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ.....	55
4.3.3 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่าน ชีวภาพ.....	55
4.4 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ด้วยวิธี Splitting Tensile Test.....	57
4.4.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน.....	57
4.4.2 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ.....	58
4.4.3 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ.....	59

4.5 ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของผนังคอนกรีต CLC.....	61
4.5.1 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนัง คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน	62
4.5.2 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนัง คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	65
4.5.3 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนัง คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ	68
4.6 ผลการทดสอบการคายความร้อนของผนังคอนกรีต CLC	73
4.7 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC.....	75
4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM).....	79
4.8.1 คอนกรีต CLC แบบปกติ	79
4.8.2 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน.....	80
4.8.3 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ.....	81
4.8.4 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ.....	82
4.9 ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานของคอนกรีต CLC	84
4.9.1 การประเมินด้านคุณสมบัติคอนกรีต CLC	84
4.9.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม.....	95
ภาคผนวก ก	97
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	5
ตารางที่ 2.2 การผลิตคอนกรีตโฟม [9].....	9
ตารางที่ 2.3 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามความหนาแน่น [15].....	16
ตารางที่ 2.4 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามอัตราการดูดซึมน้ำ [15]	16
ตารางที่ 2.5 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามกำลังอัด [15].....	17
ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้เส้นใยจากธรรมชาติในงานคอนกรีต	17
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางความร้อนของกระเบื้องซีเมนต์ [5].....	18
ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพที่สัดส่วนต่างๆ [5].....	20
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC แบบปกติต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร	29
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร	30
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร	30
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร	31
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงกลุ่มตัวอย่างทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน	37
ตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ	61
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิผิวของผนังคอนกรีต CLC ที่ลดลง ณ เวลา ใดๆ	73
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิผิวของผนังคอนกรีต CLC ที่ลดลง ณ เวลา ใดๆ	74
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC แต่ละประเภท	85
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC แต่ละประเภท (ต่อ).....	86
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเบื้องต้น (บาทต่อก้อน).....	87
ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเบื้องต้น (บาทต่อก้อน).....	88
ตารางที่ 4.8 ต้นทุนด้านเทคโนโลยี	89
ตารางที่ 4.9 ตารางค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ.....	90

ตารางที่ 4.10 รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาระบบเซลลูล่าต่อปี	91
-----------------------------------------------------------------------------------	----



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของต้นปาล์มน้ำมัน [6].....	4
รูปที่ 2.2 ขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพ [7].....	6
รูปที่ 2.3 พื้นผิวและช่องว่างอากาศของคอนกรีต CLC [11]	10
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำไฟฟ้า [12]	11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โฟมกับความหนาแน่น [3]	12
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โฟมกับอัตราการดูดซึมน้ำ [3].....	13
รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนเมื่อวัสดุได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์	15
รูปที่ 2.8 กำลัังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยปาล์มในสัดส่วนต่างๆ [6].....	19
รูปที่ 2.9 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยต่างๆ [22]	19
รูปที่ 2.10 ค่ากำลัังอัดที่ความหนาแน่น 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [2].....	20
รูปที่ 2.11 โครงสร้างถ่านชีวภาพภายในมอร์ต้าโดยกล้อง SEM กำลัังขยายที่ 200x และ 850x [23]	21
รูปที่ 2.12 อาคารตัวอย่างในสวิสเซอร์แลนด์ที่ก่อสร้างด้วยวัสดุที่ทำจากถ่านชีวภาพ [25]	22
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
รูปที่ 3.2 คอนกรีต CLC ที่เกิดการแตกตัวของโฟมและยุบตัวผสมด้วย mixer แบบทั่วไป	24
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องผสมคอนกรีต	25
รูปที่ 3.4 เครื่องผสมคอนกรีต.....	25
รูปที่ 3.5 การทดสอบโฟม	26
รูปที่ 3.6 น้ำยาโฟมชนิดสังเคราะห์ (Synthetic Foam).....	27
รูปที่ 3.7 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber)	28
รูปที่ 3.8 ถ่านชีวภาพ (Biochar)	28
รูปที่ 3.9 (ก) ตัวอย่างทดสอบหลังเทลงแบบหล่อ (ข)ตัวอย่างทดสอบก่อนนำไปบ่มน้ำ	32

รูปที่ 3.10 (ก) ตัวอย่างทดสอบในตู้อบ (ข) ตู้อบตัวอย่างทดสอบ	33
รูปที่ 3.11 (ก) การวัดค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อตัวอย่างเกิด (ข) การกวดกำลังรับแรงอัดบนตัวอย่างทดสอบ การเสียหาย.....	34
รูปที่ 3.12 การบ่มคอนกรีตในน้ำเพื่อใช้เป็นมวลของตัวอย่างทดสอบในสภาพเปียก	35
รูปที่ 3.13 การทดสอบกำลังดึง Splitting Tensile Strength.....	36
รูปที่ 3.14 รายละเอียดการทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน.....	37
รูปที่ 3.15 ผนังตัวอย่างทดสอบ.....	38
รูปที่ 3.16 การทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อนด้วยสปอร์ตไลท์.....	38
รูปที่ 3.17 Infrared Thermometer.....	39
รูปที่ 3.18 รายละเอียดการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM).....	40
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	42
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน	43
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	44
รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและ.....	45
รูปที่ 4.5 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	47
รูปที่ 4.6 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	47
รูปที่ 4.7 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน	49
รูปที่ 4.8 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน	49
รูปที่ 4.9 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ.....	51
รูปที่ 4.10 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	51
รูปที่ 4.11 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ.....	52
รูปที่ 4.12 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ.....	53
รูปที่ 4.13 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน.....	54
รูปที่ 4.14 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	55

รูปที่ 4.15 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ.....	56
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน.....	58
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ.....	59
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ.....	60
รูปที่ 4.19 การทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือ.....	61
รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน (s/c=1)	63
รูปที่ 4.21 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน (s/c=1.5)	63
รูปที่ 4.22 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันของผิวภายนอกผนัง (s/c=1).....	64
รูปที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน (s/c=1.5)	65
รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ (s/c=1).....	66
รูปที่ 4.25 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ (s/c=1.5).....	66
รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ (s/c=1)	67
รูปที่ 4.27 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ (s/c=1.5).....	68
รูปที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1).....	69
รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1.5).....	70

รูปที่ 4.30 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1).....	71
รูปที่ 4.31 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1.5).....	72
รูปที่ 4.32 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC แบบปกติ.....	76
รูปที่ 4.33 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน.....	77
รูปที่ 4.34 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ.....	78
รูปที่ 4.35 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ.....	79
รูปที่ 4.36 คอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโพรร้อยละ 30.....	80
รูปที่ 4.37 คอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	80
รูปที่ 4.38 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันร้อยละ 6 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	81
รูปที่ 4.39 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันร้อยละ 6 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	81
รูปที่ 4.40 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	82
รูปที่ 4.41 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	82
รูปที่ 4.42 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพร้อยละ 4 และ 10 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	83
รูปที่ 4.43 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพร้อยละ 4 และ 10 สัดส่วนโพรร้อยละ 50.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาเรื่องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากเกินไป โดยจากผลสำรวจการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ภายในอาคารถูกใช้ไปกับระบบทำความเย็นปรับอากาศ ซึ่งอัตราการใช้พลังงานดังกล่าวมีแนวโน้มมากขึ้นทุกปี [1] หนึ่งในทางแก้ปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากเกินไปที่มีการใช้งานในปัจจุบัน คือการเลือกวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสม จะส่งผลให้ผูู้้งานอาคารสามารถลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศได้ โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง

คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่ถูกพัฒนาขึ้นและเริ่มมีการใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลาย คุณสมบัติเด่นของคอนกรีตมวลเบา คือ มีน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป มีค่าความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักประมาณ 300-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นิยมใช้เป็นวัสดุก่อผนังซึ่งสามารถช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ สามารถกันเสียงได้ดี ทนต่อสภาพอากาศ รองรับน้ำหนักได้ดี สะดวกในการติดตั้งและเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งความเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเป็นคุณสมบัติสำคัญในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร

นอกเหนือจากปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทุกปีแล้วประเทศไทยยังมีปัญหาเรื่อง การจัดการขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปีเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะหรือวัสดุเหลือใช้ที่มาจาก การเกษตร ประเทศไทยจัดเป็นหนึ่งในประเทศที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก แต่มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ค่อนข้างน้อย ซึ่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้มักถูกกำจัดทิ้งแบบไม่ถูกวิธี เช่น ทิ้งไว้ในไร่ นา สวน หรือนำไปเผาทิ้ง ซึ่งการกำจัดด้วยวิธีเหล่านี้จะส่งผลเสียให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการแก้ปัญหาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีมากจนเกินไป จึงได้มีการพยายามนำวัสดุเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ เช่น มีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาเป็นส่วนประกอบในวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเส้นใยธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ดี มีความเหนียว จึงสามารถช่วยในการกระจายแรงและเสริมกำลังให้กับคอนกรีตได้

ในประเทศไทยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากเป็นอันดับต้น ๆ คือ ทะลายปาล์ม โดยปริมาณขยะจากทะลายปาล์ม มีปริมาณมากถึง 400,000 ตันต่อปี โดยทะลายปาล์มสามารถนำมา

แปรรูปให้เป็นเส้นใยปาล์มเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเส้นใยปาล์มมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตโพรเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตโพร โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยปาล์มที่ร้อยละ 0.5 - 1.5 พบว่าเส้นใยปาล์มมีส่วนช่วยให้กำลังอัด (Compressive Strength) ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.6 - 43.2 และกำลังดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.8 - 45.6 [2] นอกจากนี้ความยาวของเส้นใยปาล์มยังมีผลกระทบต่อ การพัฒนา กำลังอัด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่เส้นใยปาล์มขนาด 1 - 5 เซนติเมตร ในสัดส่วนร้อยละ 0.25 - 0.5 แทนที่ปูนซีเมนต์ คอนกรีตสามารถรับกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดัดได้ดีขึ้นที่สุดเมื่อขนาดเส้นใยปาล์มเท่ากับ 3 และ 5 เซนติเมตร โดยสามารถกำลังพัฒนาขึ้นประมาณร้อยละ 39 [3]

ไม่เพียงแต่คุณสมบัติด้านการพัฒนา กำลังเท่านั้น เส้นใยธรรมชาติยังมีคุณสมบัติสำคัญคือการเป็นฉนวนกันความร้อน จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำเส้นใยปาล์มมาผสมรวมกับพลาสติกคอนกรีต (plaster concrete) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน จากการศึกษาพบว่า พลาสติกคอนกรีตมีค่าการนำความร้อนที่ลดลง [4] และเมื่อนำเส้นใยปาล์มมาเป็นส่วนผสมในการทำกระเบื้องซีเมนต์พบว่ากระเบื้องที่ได้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่ากระเบื้องซีเมนต์ปกติประมาณสองเท่า [5] วัสดุเหลือใช้อีกหนึ่งชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมากในประเทศไทยคือ ถ่านชีวภาพ ที่ผลิตมาจากขยะทางการเกษตร เช่น เศษไม้ ซังข้าวโพด นำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจนกลายเป็นถ่านชีวภาพ ในส่วนของถ่านชีวภาพ งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ เช่น ถ่านชีวภาพจากขยะมูลฝอย ถ่านชีวภาพจากกากตะกอนกระดาษ มาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากขยะมูลฝอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0.1 ให้ค่าสมบัติทางกลใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่สุด โดยชิ้นงานตัวอย่างมีค่ากำลังดัดและกำลังดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 20

เพื่อให้สามารถลดการใช้พลังงานในอาคาร และ ลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากการเกษตรในประเทศไทย งานวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสัดส่วนที่เป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลส โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสไปใช้ในการก่อสร้างและต่อยอดในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) หาสัดส่วนที่เป็นไปได้ของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสที่ผสมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านชีวภาพ และเส้นใยปาล์มน้ำมัน
- 2) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพและเส้นใยปาล์มน้ำมัน
- 3) แนะนำวิธีการผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพเพื่อใช้เป็นแนวทางในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสได้ในอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสร่วมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ โดยออกแบบส่วนผสมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีการศึกษาคุณสมบัติด้านความหนาแน่น กำลังอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน มอก . 2601-2556 กำลังดึงตามมาตรฐาน BS1881- Part117 และคุณสมบัติด้านความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้สัดส่วนที่เหมาะสมของถ่านชีวภาพและเส้นใยปาล์มน้ำมันในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสได้ในอนาคต
- 2) ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพและเส้นใยปาล์มน้ำมัน รวมถึงสามารถระบุความแตกต่างระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสแบบปกติกับผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพได้
- 3) นำวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาและสามารถนำผลการทดลองที่ได้มาพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

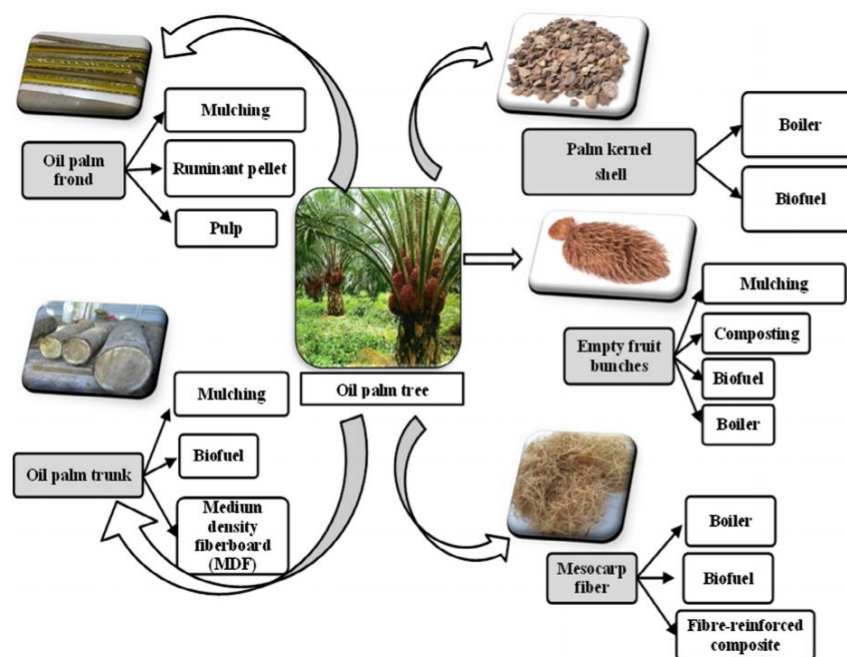
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

2.1.1 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber)

ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย นิยมปลูกในหลายจังหวัดทางภาคใต้ ได้แก่ ชุมพร กระบี่ สุราษฎร์ธานี สตูล และ ตรัง สามารถผลิตน้ำมันดิบจากปาล์มน้ำมันได้ประมาณปีละ 700,000 - 800,000 ตัน โดยการบริโภคส่วนใหญ่เป็นน้ำมันพืชที่เหลือใช้สำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง การบริโภคภายในประเทศจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 ต่อปี และมีแนวโน้มความต้องการใช้น้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากราคาถูกกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มมีเส้นใยจากหลายปาล์ม โดยปริมาณที่เหลือใช้ของทะลายปาล์มประมาณ 400,000 ตันต่อปี ที่ผ่านการสกัดน้ำมันปาล์มเหลือใช้เป็นจำนวนมาก เส้นใยเหล่านี้ถูกนำไปกำจัดทิ้งหรือใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของต้นปาล์มน้ำมัน [6]

เส้นใยปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติคือมีน้ำหนักเบา ความยาวประมาณ 20-100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2-0.8 มิลลิเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยประมาณ 1300-1450 กิโลกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร เส้นใยปาล์มมีลักษณะพิเศษคือเป็นฉนวนความร้อน มีความยืดหยุ่นที่ดีและผนังเซลล์ที่หุ้มเส้นใยหนาส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

2.1.2 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ คือ ถ่านที่ผลิตจากมวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลาย ได้จากธรรมชาติเช่น เศษไม้ใบไม้หรือ เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ต้นซัง ชังข้าวโพด เปลือกถั่ว เปลือกผลไม้ แม้กระทั่งมูลสัตว์นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธีคือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลา เป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350 - 600 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งเตาเผาที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมนำมาพัฒนา ร่วมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพสังคมในปัจจุบันส่วนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็วจะใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาทีในกระบวนการเผาไหม้มีเครื่องมือและอุปกรณ์ควบคุมการทำงานทุกขั้นตอน ใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500 - 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้จะได้ผลผลิตแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นน้ำมัน Bio-Oil ส่วนที่เป็นแก๊ส Bio Gas และ ส่วนที่เป็นถ่านชีวภาพ Biochar ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้นี้จะแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการผลิต

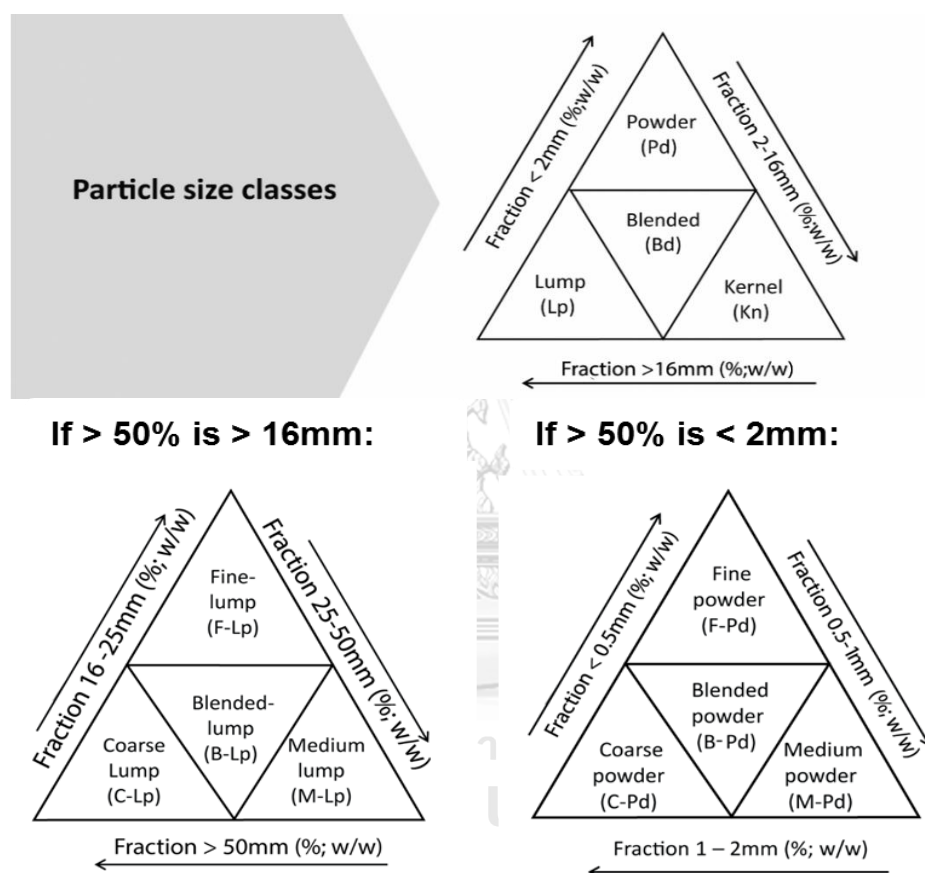
ตารางที่ 2.1 ผลผลิตจากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน	ถ่าน (Char)	ของเหลว (Liquid)	แก๊ส (Gas)
แบบช้า (Slow Pyrolysis) ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส	35%	30%	35%
แบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ใช้อุณหภูมิปานกลาง 500-600 องศาเซลเซียส	12%	75%	13%

โดยถ่านชีวภาพจะถูกใช้งานหลักๆคือใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน กักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน ประโยชน์ของถ่านชีวภาพได้แก่ ใช้ปรับปรุงดินและผลผลิตทางการเกษตร ปรับสมดุลอากาศเนื่องจาก ถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ช่วยจัดการของเสียอินทรีย์วัตถุได้และสามารถผลิต

พลังงานทดแทนได้เนื่องจากกระบวนการสลายด้วยความร้อนสามารถให้พลังงานทดแทนในระบบขนส่งและอุตสาหกรรม

ถ่านชีวภาพสามารถจำแนกประเภทตามขนาดอนุภาคได้ 3 ระดับ 4 ชั้น ตามรูปที่ 2.2 โดยขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพต่อการใช้งานในรูปแบบแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.2 ขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพ [7]

2.2 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

คอนกรีตมวลเบา คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลผสมละเอียด มวลผสมหยาบ น้ำและอาจมีสารผสมเพิ่มอื่น ๆ คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากวัสดุผสมต่าง ๆ กัน จะมีน้ำหนักที่ต่างกันมาก ซึ่งอาจมีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 – 1850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดตั้งแต่ 3 ถึง 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีตที่ได้ ถ้ามีความหนาแน่นสูงกำลังอัดจะสูงตามไปด้วย ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็มีส่วนต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเช่นกัน

2.2.1 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา

การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา มีหลายวิธีขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพหรือกระบวนการผลิต โดยทั่วไปมีการจำแนกดังต่อไปนี้

2.2.1.1 คอนกรีตมวลเบาที่จำแนกตามหน่วยน้ำหนัก

คอนกรีตมวลเบาที่จำแนกตามหน่วยน้ำหนัก สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

- 1) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำฉนวน (Insulating Lightweight Concrete) คือคอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 315 – 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีกำลังอัดที่ 28 วัน ระหว่าง 7 – 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- 2) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) คือคอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1400 - 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีกำลังอัดที่ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- 3) คอนกรีตมวลเบาชนิดกึ่งเบา (Semi Lightweight Concrete) คือคอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1800 - 2050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีกำลังอัดที่ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นิยมนำมาทำคอนกรีตบล็อกสำหรับกำแพงหรือรั้วและใช้เป็นวัสดุทนไฟ

2.2.1.2 คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามกรรมวิธีผลิต

คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามกรรมวิธีการผลิต สามารถ แบ่งได้ 2 วิธีได้แก่

- 1) วัสดุผสมที่ใช้ทำคอนกรีตเบา มีลักษณะที่สำคัญคือฟรูน ซึ่งทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าต่ำวัสดุผสมนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือวัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ
- 2) วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Aggregates) ได้แก่ หินพูน (Pumice) และหินละลายชนิดเบา (Scoria) ได้จากวัสดุที่บดผงภูเขาไฟ นำมาบดให้ได้ขนาดและจัดขนาดหินพูนมีโพรงยาวจำนวนมากและมีสีขาวเทาแกมน้ำเงิน โดยมีสารเจือปนเป็นรอยต่างสีน้ำตาลไม่เปรอะง่าย ดูดซึมน้ำได้มากและมีการหดตัวมาก มีความหนาแน่น 470 – 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากหินพูนแต่เป็นลาวาที่มีเซลล์ใหญ่กว่าและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมากกว่า เมื่อนำมาทำเป็นคอนกรีตมวลเบาจะมีคุณสมบัติเหมือนกับหินพูน [8]
- 3) วัสดุผสมที่สร้างขึ้น เป็นวัสดุที่ได้จากปฏิกิริยาทางความร้อนของวัสดุต่างๆต่อไปนี้คือ ดิน ดินดานและหินฉนวนเผา มีชื่อเรียกทางการค้าว่า เฮย์ไดท์ (Haydite) เลไลท์ (Lelite) โซไลท์ (Solite) เพอร์ไลท์ (Perlite) [8]

- 4) วัสดุทางเคมี จะใช้ผงต่างโลหะชนิดหนึ่ง (Alkaline Metal) ผสมซึ่งเมื่อถูกกับน้ำจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นคือน้ำประกอบด้วยธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจน ออกซิเจนจะเข้าไปผสมกับโลหะนั้นและไฮโดรเจนจะกลายเป็นฟองเล็กๆอยู่ในคอนกรีต

2.2.1.3 คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต

คอนกรีตมวลเบาจำแนกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตได้ 3 ประเภทใหญ่ๆคือ

- 1) คอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีส่วนละเอียด (Non-Fines Concrete) คือคอนกรีตที่ได้จากการผสมมวลรวมหยาบ มีช่องว่างหรือโพรงอากาศอยู่ภายในค่อนข้างมาก
- 2) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) คือคอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติหรือกระบวนการผลิตความหนาแน่นต่ำ
- 3) คอนกรีตมวลเบาโฟม (Foam Concrete) คือคอนกรีตที่มีโพรงอากาศเป็นส่วนประกอบแทนที่การใช้มวลรวมหยาบส่งผลให้คอนกรีตประเภทนี้มีน้ำหนักเบา

2.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

- 1) คอนกรีตมวลเบาคูดัดขึ้นน้ำได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดาเพราะมีรูพรุนมากกว่า
- 2) คอนกรีตมวลเบาจะหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณร้อยละ 5 ถึง 40 แต่ถ้าคอนกรีตมวลเบาทำมาจากวัสดุผสม เช่น ดินเผา ดินดาน ตะกรัน จะมีการหดตัวน้อยกว่า
- 3) คอนกรีตมวลเบาจะล้ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา
- 4) ค่าอัตราส่วนปิวของของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับคอนกรีตธรรมดาแต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าประมาณ 0.5 ถึง 0.75 เมื่อมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน
- 5) คอนกรีตมวลเบาเก็บเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา
- 6) สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบามีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

2.3 คอนกรีตมวลเบาโฟม (Foam concrete)

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามกรรมวิธีการผลิต ได้แก่ คอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete; ACC) คือคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ปูนขาว น้ำ ทราย และสารกักกระจายฟองอากาศ โดยคอนกรีตประเภทนี้จะผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC) คอนกรีตประเภทนี้จะมีส่วนประกอบคือปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และโฟมเหลวที่เป็นตัวเพิ่มฟองอากาศให้กับเนื้อคอนกรีต

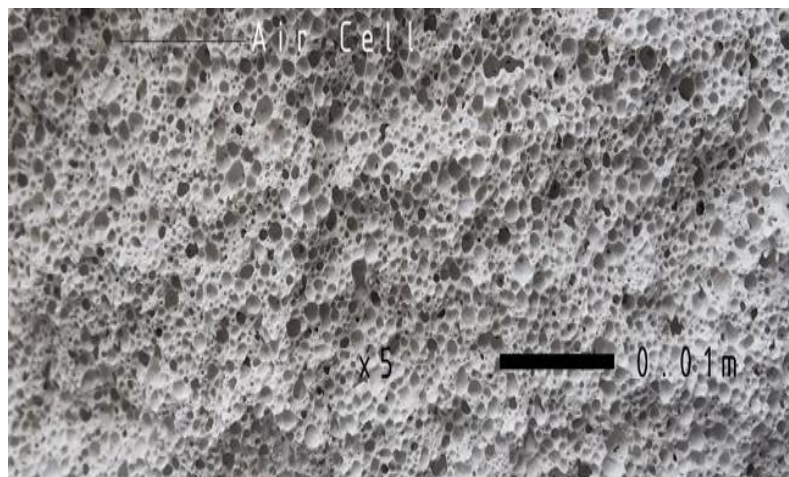
2.3.1 การผลิต Foam concrete

แบ่งเป็น 2 วิธีคือ วิธีทางเคมี (Chemical method) และวิธีทางกล(Mechanical Method) ตารางที่ 2.2 การผลิตคอนกรีตโฟม [9]

Chemical Method	Mechanical Method
1. Pre formed method วิธีนี้จะได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ 2. Air entraining เหมาะกับคอนกรีตที่ต้องการความหนาแน่นสูง	1. Aluminum powder method วิธีนี้จะได้ คอนกรีตที่มีความทนทานต่อสารซัลเฟตหรือสารเคมีอื่นๆได้มากขึ้น 2. Hydrogen peroxide method เป็นวิธีที่ทำให้คอนกรีต เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก

2.4 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC)

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีกระบวนการผลิตที่คล้ายกับการผลิตคอนกรีตทั่วไป โดยคอนกรีต CLC มีคุณสมบัติทั่วไปคือมีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ประมาณ 25 -180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 400 - 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นฉนวนความร้อนป้องกันเสียงได้ดี และมีค่าการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างต่ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ศึกษาคอนกรีตที่ได้จากเทคโนโลยี CLC นี้จะเกิดฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตซึ่งก่อให้เกิดข้อดีคือทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาและสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้างที่รับกำลังไม่สูงเกินไป ฟองอากาศภายในคอนกรีตมวลเบาพบว่าเมื่อฟองอากาศภายในคอนกรีตมากขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่ลดลง ฟองอากาศจึงถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในคอนกรีต CLC [10]



รูปที่ 2.3 พื้นผิวและช่องว่างอากาศของคอนกรีต CLC [11]

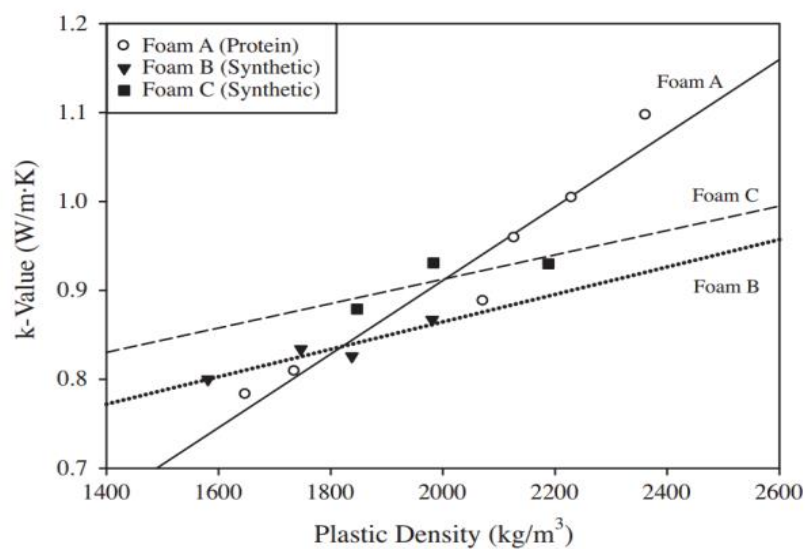
2.4.1 กระบวนการผลิตโฟมในคอนกรีต CLC

ในกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลู่ว่างการผสมสารเพิ่มฟองอากาศลงในซีเมนต์เพสต์ถ้าคอนกรีตแข็งตัวแล้วฟองอากาศเหล่านี้จะกลายเป็นช่องว่างอากาศ (Air Void) ที่มีขนาดเล็ก รวมตัวกันมีลักษณะคล้ายเนื้อครีมเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูพรุนและมีความแข็งแรง โดยปกติสารสร้างโฟมในคอนกรีต CLC ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่

- 1) โฟมโปรตีน (Protein Foam) คือโฟมที่ผลิตจากโปรตีนจากพืชและจากสัตว์
 - โฟมโปรตีนจากสัตว์ มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม กลิ่นแรง ผลิตขึ้นจากการหมักโปรตีนจากส่วนแข็งของสัตว์ เช่น กีบ เขาสัตว์ ขนไก่ เป็นต้น ซึ่งเมื่อย่อยสลายจะให้เนื้อโฟมที่มีคุณภาพสูง แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถเก็บไว้นานได้เพราะจะเน่าเสีย
 - โฟมโปรตีนจากพืช มีลักษณะใส มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว ไม่มีกลิ่น เนื้อโฟมมีคุณภาพสูง มีความต้านทานด้านการกักความร้อนและการสลายตัวของแบคทีเรีย
- 2) โฟมสังเคราะห์ (Synthetic Foam) คือโฟมที่ผลิตขึ้นจากการสังเคราะห์ จะมีลักษณะคล้ายโฟมโปรตีนแต่ไม่มีกลิ่นมีสีที่ใสกว่า เนื้อโฟมที่ได้จะมีความละเอียดและอัตราการขยายตัวสูง นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกโฟมได้ตามอัตราการขยายตัว (Expansion Rate)
 - โฟมอัตราการขยายตัวต่ำ (Low Expansion Foam) ขยายตัวประมาณ 20 เท่า
 - โฟมอัตราการขยายตัวปานกลาง (Medium Expansion Foam) มีการขยายตัวจาก 20-200 เท่า

- โฟมอัตราการขยายตัวสูง (High Expansion Foam) มีการขยายตัวจาก 200-1000 เท่า โดยคุณภาพของโฟมสามารถตรวจสอบได้จากอัตราการขยายตัวและความหนาแน่นของโฟมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 40-60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากโฟมมีความหนาแน่นที่มากเกินไปจะมีแนวโน้มที่เกิดการแยกชั้นขึ้นและจะแตกตัวเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ในเนื้อคอนกรีต

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทดสอบคุณสมบัติของโฟมแบบสังเคราะห์และแบบโปรตีนที่ใช้ผลิตคอนกรีต CLC ได้กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 2.4



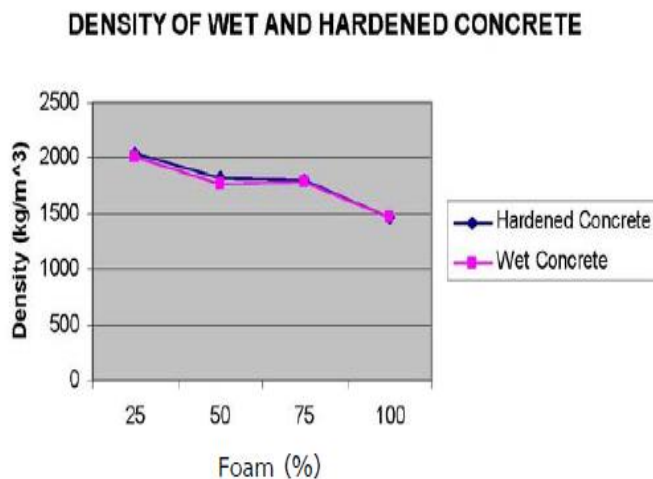
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าการนำไฟฟ้า [12]

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลาสติกและค่าการนำความร้อนของ CLC ที่ทำจากโฟม A B และ C พบว่าโฟมคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตมีความเกี่ยวข้องกับค่าการนำความร้อนของคอนกรีต CLC โดยคอนกรีตที่ผลิตจากโฟมสังเคราะห์คือโฟม B และ C จะสามารถควบคุมค่าความหนาแน่นได้คงที่กว่าโฟมแบบโปรตีน A และคอนกรีตที่ใช้โฟมสังเคราะห์ในการผลิตจะมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำกว่าโฟมแบบโปรตีน นั่นหมายถึงโฟมสังเคราะห์มีค่าความต้านทานความร้อนที่สูงกว่าโฟมแบบโปรตีน [12]

2.4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

- 1) ความหนาแน่น (Density) เป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีต CLC เป็นตัวบ่งชี้ถึงกำลังรับแรงอัดและความแข็งแรงของคอนกรีต คอนกรีต CLC คุณสมบัติของ CLC จะ

เปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่น เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงตามไปด้วย

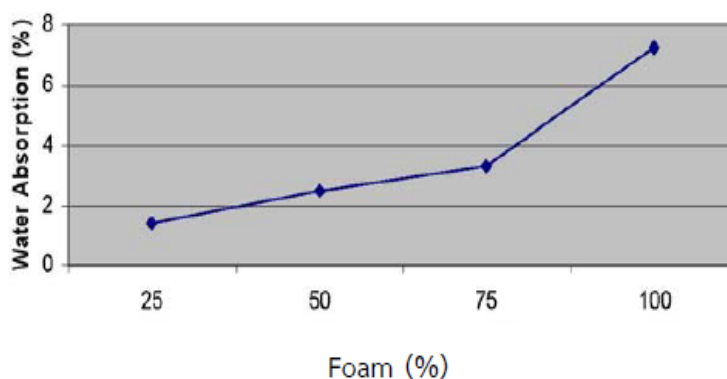


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โฟมกับความหนาแน่น [3]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแล้วพบว่าความหนาแน่นกับปริมาณโฟมในเนื้อคอนกรีตมีความสัมพันธ์แบบผกผันกัน เมื่อปริมาณโฟมมากความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเพราะเกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 2.5 [3]

- 2) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) คอนกรีต CLC มีสามารถดูดซึมน้ำได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป การดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ที่ความหนาแน่นตั้งแต่ 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตแปรผกผันกับความหนาแน่น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง

WATER ABSORPTION AT DIFFERENT PERCENTAGE OF FOAM



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โฟมกับอัตราการดูดซึมน้ำ [3]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแล้วพบว่าเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง อัตราการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเพราะเนื้อคอนกรีตมีฟองอากาศมากขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนของน้ำกับน้ำยาโฟมยังส่งผลกับอัตราดูดซึมน้ำของคอนกรีตโดยถ้าอัตราส่วนของน้ำกับน้ำยาโฟมมีค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราดูดซึมน้ำมากขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.6 [3]

- 3) กำลังรับแรงอัด (Strength) คอนกรีต CLC จะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตมวลเบา CLC โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ ทรายละเอียด น้ำและสารที่ทำให้เกิดฟอง ซึ่งผลลัพธ์คือได้คอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังรับแรงอัด 48 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คำภี จิตชัยภูมิ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง FA ซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ และนาโนซิลิกา NS พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ส่วนผสม NS จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม FA ไม่มาก โดยเมื่อเมื่อทำการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ร้อยละ 1 จะให้กำลังรับแรงอัดที่มากที่สุด [9]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผสมด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าชานอ้อยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนร้อยละต่างๆพบว่า เถ้าชานอ้อยและเถ้าถ่านหินสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้บางส่วนโดยจะให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ ซึ่งนอกจากนั้นยังพบอีกว่าเถ้าชานอ้อยและเถ้าถ่านหินยังสามารถใช้เป็นวัสดุ

ประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสได้อีกด้วย โดยการใช้สารเหล่านี้เป็นวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดไปในทิศทางที่ดี [13]

- 4) คุณสมบัติด้านความร้อน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต CLC การที่คอนกรีตโฟมมีโครงสร้างแบบ Cellular Structure ทำให้มีความเป็นฉนวนความร้อนคือมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตโฟมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึง 10 เท่า ทำให้คอนกรีตโฟมมีความเป็นฉนวนความร้อนที่สูงมาก คุณสมบัติฉนวนความร้อนคือวัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งได้ [9] ฉนวนความร้อนที่ดีจะทำหน้าป้องกันไม่ให้พลังงานความร้อนส่งผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่ายๆ การทดสอบว่าวัสดุนั้นมีความเป็นฉนวนความร้อนหรือไม่พิจารณาได้จากคุณสมบัติ 3 ประการดังต่อไปนี้

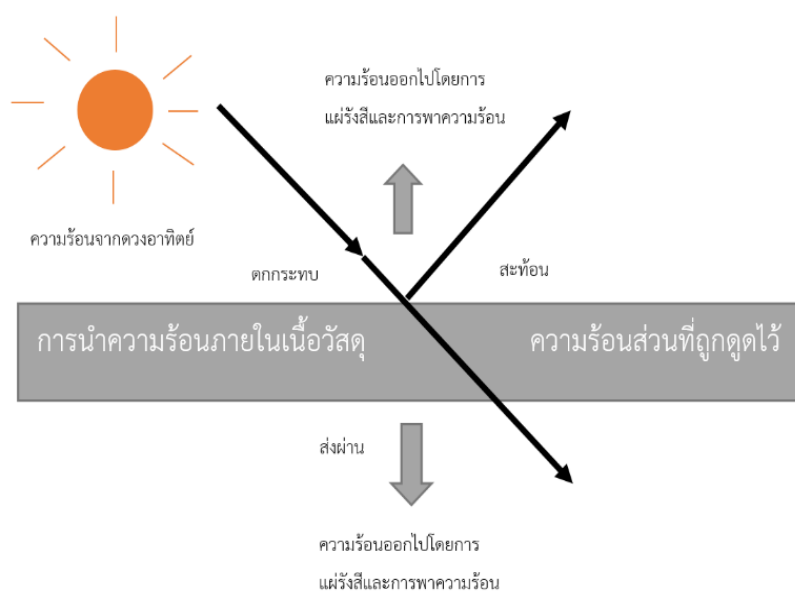
a) การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 3 วิธี ได้แก่

i) การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยโครงสร้างของโมเลกุลจะเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเพื่อนำความร้อน ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำความร้อน ได้แก่ ตัวกลาง โดยตัวกลางที่นำความร้อนได้ดี ได้แก่ หิน คอนกรีต เป็นต้น และตัวกลางที่นำความร้อนได้ไม่ดี ได้แก่ ไม้ เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น ความหนาแน่นโครงสร้างของโมเลกุลที่มีความหนาแน่นมากจะนำความร้อนได้มาก เช่น เหล็ก ทองแดง เป็นต้น แต่สำหรับฉนวนจะมีค่าความหนาแน่นน้อย ฉนวนแต่ละประเภทจะมีค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมแตกต่างกัน

ii) การพาความร้อน (Heat Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนตัวของอากาศ หรือของไหลเป็นศูนย์กลางปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการพาความร้อน ได้แก่ ขนาดพื้นที่ผิวของวัสดุ ตัวกลางจะต้องอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ความเข้มข้นของตัวกลางที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน

iii) การแผ่รังสีความร้อน (Solar Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการสั่นอิเล็กตรอนหรือโมเลกุล การถ่ายเทความร้อนประเภทนี้จะแตกต่างจากอีกสองวิธี เนื่องจากไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางใดๆในการถ่ายเทความร้อน เมื่อรังสีความร้อนกระทบวัสดุต่างๆ จะเกิดการส่งผ่านรังสี (Transmission) บางส่วนถูกดูดกลืน เรียกว่า การดูดซับรังสี (Absorption)

และบางส่วนสะท้อนออกมา เรียกว่า การสะท้อนรังสี (Reflection) ส่วนที่ถูกดูดกลืนจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุ จะเกิดการคายรังสี (Emission)



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนเมื่อวัสดุได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์

b) การคายความร้อน เป็นการวัดความสามารถของผิววัสดุที่จะคายรังสีความร้อนออกมาในอุณหภูมิที่กำหนด ค่าการคายความร้อนจะเทียบเท่าค่าการดูดซับความร้อน วัสดุผิวที่ไม่เป็นโลหะ (Non metallic) จะมีความสามารถคายความร้อนได้มากกว่าวัสดุโลหะ การคายความร้อนจะเกี่ยวข้องกับการดูดซึ่มและการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time lag) [14]

2.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบา CLC (มอก.2601-2556)

มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ สามารถแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งได้ 5 ชนิด ดังนี้

- 1) ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (Dry Density) ที่ระบุตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 แบ่งชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามความหนาแน่น [15]

ชนิด	Dry Density (Kg/m ³)
C9	801-900
C10	901-1000
C12	1001-1200
C14	1201-1400
C16	1401-1600

- 2) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ค่าอัตราการดูดซึมน้ำต้องผ่านการทดสอบโดยระบุตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 แบ่งชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามอัตราการดูดซึมน้ำ [15]

ชนิด	Water Absorption ไม่มากกว่า (%เศษส่วนโดยมวล)
C9	23
C10	
C12	
C14	20
C16	

- 3) กำลังรับแรงอัด (Strength) ค่าความสามารถในการรับแรงอัดต้องผ่านการทดสอบโดยระบุตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 แบ่งชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ชนิดของคอนกรีตมวลเบา CLC แบ่งตามกำลังอัด [15]

ชนิด	กำลังอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)
C9 C10 C12	2.5 (25.5)
C14 C16	5 (51)

2.6 การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในงานคอนกรีต

2.6.1 เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural Fiber)

เส้นใยธรรมชาติจัดเป็นส่วนผสมคอนกรีตแบบน้ำหนักเบาสามารถใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตได้โดยไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ เพิ่มกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ให้กับคอนกรีตได้ เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นได้ดี เป็นฉนวนกันเสียงได้

ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้เส้นใยจากธรรมชาติในงานคอนกรีต

งานวิจัย	เส้นใย	รูปแบบ	คุณสมบัติ
Joseph Khedari [16]	เส้นใยมะพร้าว	มอร์ต้า	กันความร้อนได้ดี
A.Kriker [17]	เส้นใยปาล์ม	คอนกรีต	ขึ้น
บวร อิศรางกูร [18]	เส้นใยผักตบชวา	AAC	ทนทานในอากาศ
นิรุช สุขสมเขตร [19]	เส้นใยมะพร้าว	คอนกรีต	ร้อนขึ้น
ศักดิ์สิทธิ์ ศรีแสง [20]	เส้นใยมะพร้าว	คอนกรีตบล็อก ซีเมนต์เพสต์	วัสดุอาคารสีเขียว เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว ในเนื้อคอนกรีต
นันทชัย ชูศิลป์ [21]	เส้นใยตาลโตนด		ความเป็นฉนวน ความร้อนใกล้เคียง กับบล็อกทั่วไป เสริมกำลังอัดและ ความหนาแน่น

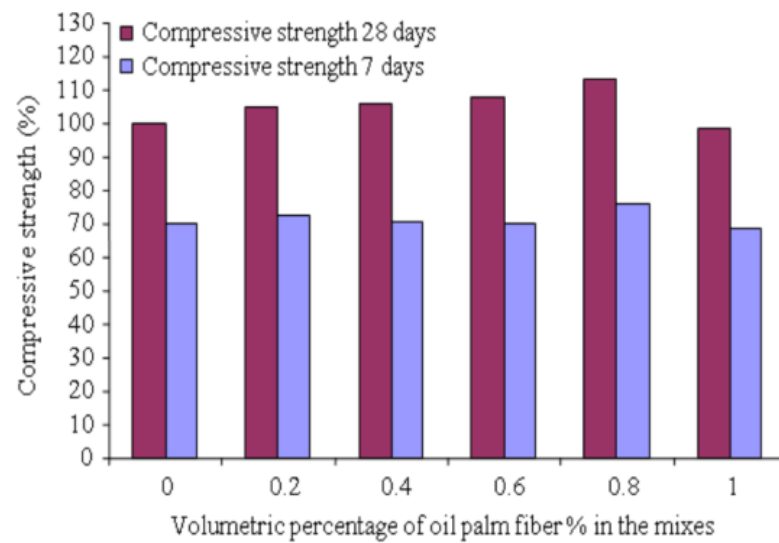
2.6.2 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Natural Fiber)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความร้อน ของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบในเขตร้อนชื้น โดยได้ทำการทดสอบเส้นใยหลาย ชนิดหนึ่งในนั้นคือเส้นใยปาล์มน้ำมันพบว่ากระเบื้องที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีค่าความต้านทานความร้อนที่สูงกว่ากระเบื้องแบบปกติซึ่งเป็นผลดีเนื่องจากช่วยป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้ ในส่วนของกำลังรับแรงอัดกระเบื้องที่ผสมเส้นใยปาล์มจะมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงจากกระเบื้องแบบปกติแต่ก็ยิ่งเกินเกณฑ์ [5]

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางความร้อนของกระเบื้องซีเมนต์ [5]

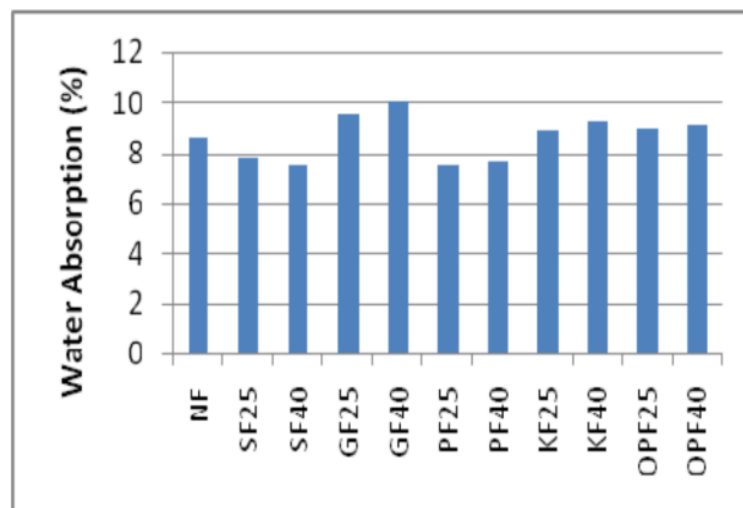
วัสดุผนังหลังคา	ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	ค่าความต้านทานความร้อน (ตารางเมตรเคลวินต่อวัตต์)
กระเบื้องปกติ	0.942	0.04
กระเบื้องผสมเส้นใย ปาล์มน้ำมัน	0.687	0.06

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมด้วยเส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้เส้นใยปาล์มผสมในคอนกรีตมวลเบาร้อยละ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 แล้วพบว่าเมื่อใช้เส้นใยปาล์มผสมในคอนกรีตมวลเบาร้อยละ 0.8 ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดโดยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดัด คิดเป็นร้อยละ 13.4 และ 16.1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการใส่เส้นใยปาล์มผสมกับคอนกรีตมวลเบาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกลให้ดีขึ้นอีกด้วย ดังรูปที่ 2.4 [6]



รูปที่ 2.8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยปาล์มในสัดส่วนต่างๆ [6]

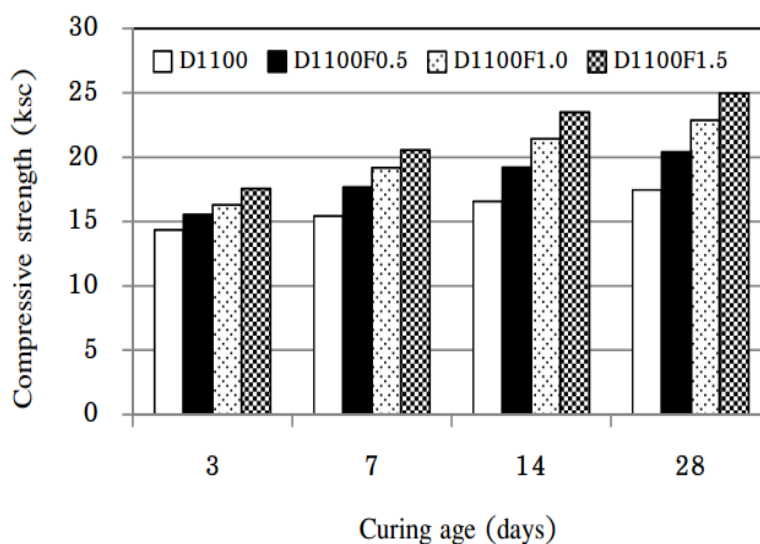
งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยปาล์ม เส้นใยแก้ว และพบว่าเส้นใยแก้วให้ค่าการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุด รองลงมาคือเส้นใยปาล์ม ดังรูปที่ 2.5 [22]



รูปที่ 2.9 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยต่างๆ [22]

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมด้วยเส้นใยปาล์มในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 0.5-1.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์แล้วพบว่าเมื่อใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนร้อยละ 1.5 ที่ความ

หนาแน่น 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วันสูงที่สุดเนื่องจากเส้นใยปาล์มที่ผสมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความหนาแน่นทำให้คอนกรีตมวลเบาแข็งแรงขึ้น ดังรูปที่ 2.6 [2]



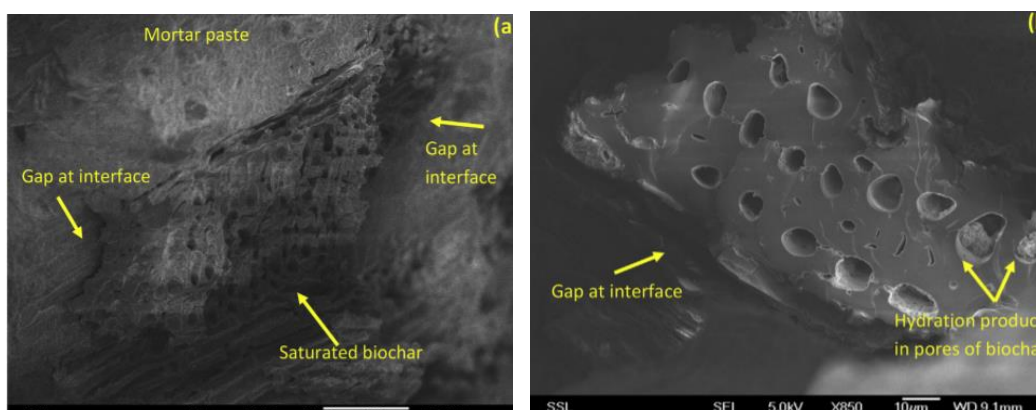
รูปที่ 2.10 ค่ากำลังอัดที่ความหนาแน่น 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [2]

2.6.3 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการทดลองโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้มาผสมในซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้แทนที่ซีเมนต์ที่ร้อยละ 1-5 โดยพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้ามีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ แต่ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยามีน้ำบางส่วนที่ระเหยไปส่งผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสม แต่ถ่านชีวภาพทำหน้าที่ self curing สามารถช่วยดูดซึมน้ำและปล่อยออกมาในระหว่างการผสมส่งผลให้น้ำที่ระเหยไปลดลงทำให้คอนกรีตแข็งแรงขึ้น [23]

ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพที่สัดส่วนต่างๆ [5]

Sample	Biochar wt% of cement	Compressive Strength (Mpa)
Control	0	48.82
MWBC1	1	58.08
MWBC2	2	54.09
MWBC3	5	49.25



รูปที่ 2.11 โครงสร้างถ่านชีวภาพภายใน-mortar โดยกล้อง SEM กำลังขยายที่ 200x และ 850x [23]

งานวิจัยจาก Japanese Biochar Association ในปี 2000 ได้มีกฎหมายเกี่ยวกับการจัดตั้งสมาคมรีไซเคิลขึ้นในญี่ปุ่นมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำของเสียกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะมูลฝอยที่เกิดจากการก่อสร้างมีปริมาณมากถึง 4.6 ล้านตันต่อปี ดังนั้นบริษัทรับเหมาก่อสร้างจึงเปลี่ยนขยะให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อนำมาใช้ในรูปแบบต่างๆ คุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักคือสามารถควบคุมความชื้นภายในบ้านและอาคารได้เนื่องจากอาคารเหล่านี้จำเป็นต้องลดปริมาณความชื้นให้ลดลง นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังสามารถช่วยลดโรครากเน่าแอมโมเนียได้ ซึ่งเรา ได้ศึกษาด้วย ดังนั้นถ่านชีวภาพจึงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในงานก่อสร้างและอุตสาหกรรม [24]

งานวิจัยจาก The Ithaka Institute ได้นำถ่านชีวภาพมาเป็นวัสดุก่อสร้างโดยได้ก่อสร้างอาคารหลังแรกที่ใช้วัสดุที่ทำจากถ่านชีวภาพที่สถาบัน Ithaka ในปี 2013 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ การทดสอบประสิทธิภาพของอาคารหลังนี้พบว่าอาคารที่สร้างจากวัสดุที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพจะมีความเป็นฉนวนกันความร้อน สามารถควบคุมความชื้นและอุณหภูมิได้ดี จากการศึกษาวิจัยพบว่าถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเด่นคือการนำความร้อนที่ต่ำและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ถึง 5 เท่า จากข้อมูลข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับใช้เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนของอาคาร นอกเหนือจากนั้นในการวิจัยครั้งนี้ยังพบข้อมูลเพิ่มเติมคือการใช้ถ่านชีวภาพมาเป็นวัสดุก่อสร้างอาคารมีผลดีต่อระบบทางเดินหายใจเนื่องจากถ่านชีวภาพจะช่วยปรับสมดุลของอากาศและรักษาความชื้นภายในอาคารได้ร้อยละ 45-70 ทำให้อากาศภายในอาคารไม่แห้งจนเกินไป สถาบัน Ithaka ร่วมมือกับพันธมิตรจากหลายที่ เช่น Swiss Federal Laboratories of Material Science เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่ทำจากถ่านชีวภาพให้ดีขึ้น โดยเฉพาะอิฐมวลเบาที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [25]

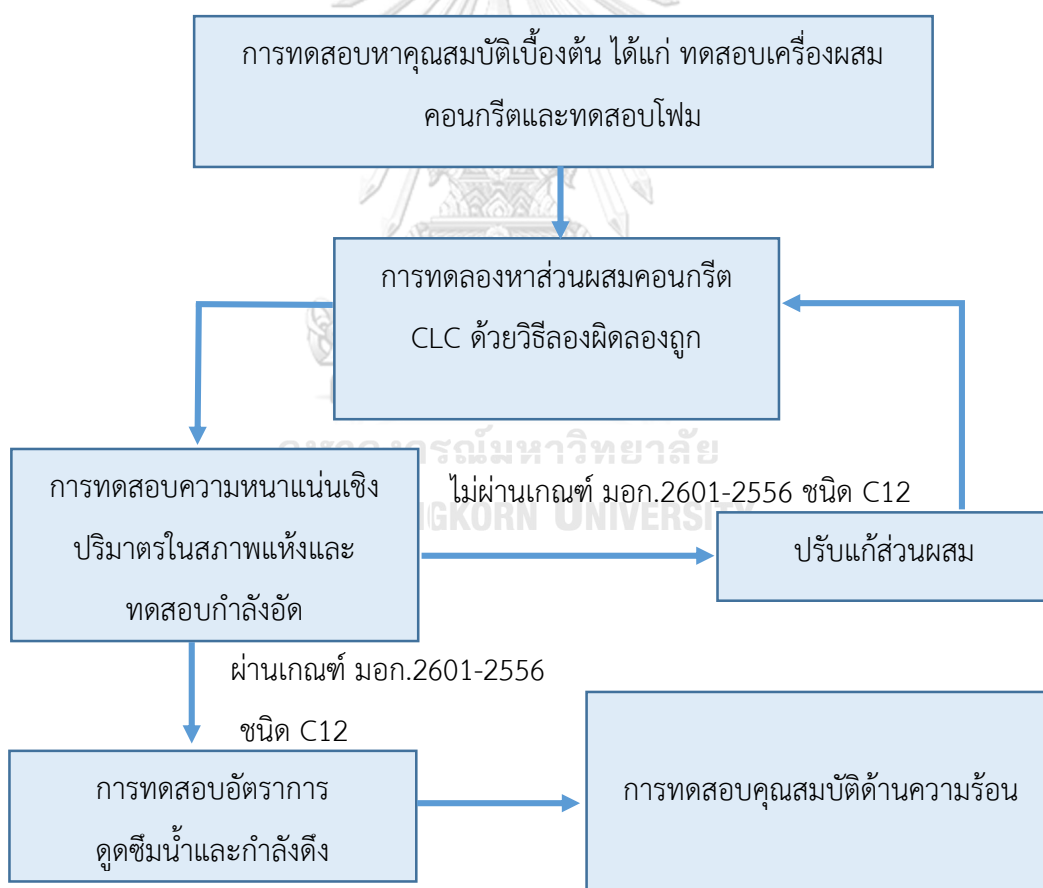


รูปที่ 2.12 อาคารตัวอย่างในสวิสเซอร์แลนด์ที่ก่อสร้างด้วยวัสดุที่ทำจากถ่านชีวภาพ [25]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังนั้นจึงทดลองนำเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพมาเป็นวัสดุผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสแทนที่ทรายละเอียด จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบา ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง อัตราการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน มอก .2601-2556 ชนิด C12 กำลังดึง ตามมาตรฐาน BS1881 และทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อน งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

3.1.1 การทดสอบเครื่องผสมคอนกรีต (Mixer)

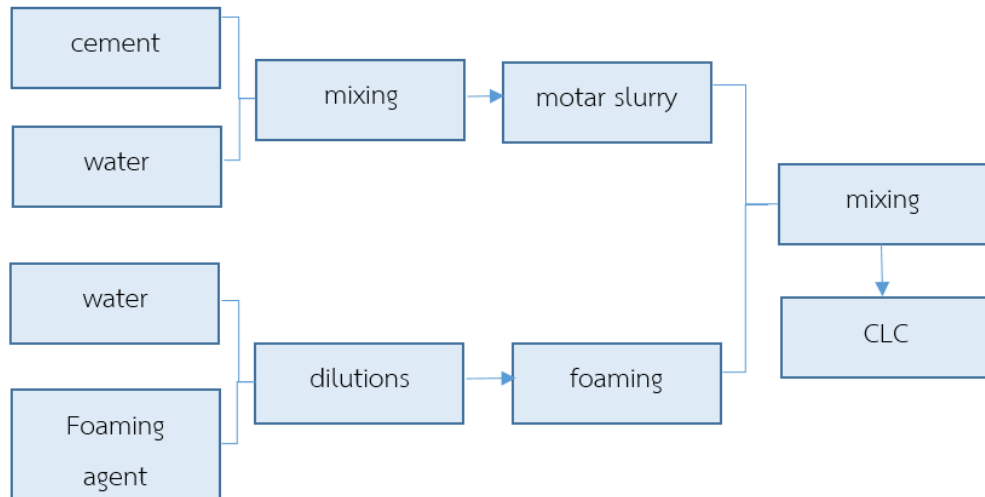
เครื่องผสมคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาในระบบเซลลูล่า เพราะคอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีส่วนผสมที่สำคัญคือโฟม เมื่อเนื้อโฟมเข้าไปผสมกับมอร์ต้าจะเปลี่ยนเป็นฟองอากาศและเมื่อคอนกรีตมวลเบาแข็งตัวลงฟองอากาศจะเกิดเป็นรูโพรงภายในคอนกรีตซึ่งโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตมีผลโดยตรงต่อกำลังอัด จากงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการลองใช้ เครื่องผสมคอนกรีต 2 แบบ คือ เครื่องผสมคอนกรีตทั่วไปและเครื่องผสมคอนกรีตแบบใบพัดแบนวนอนได้ผลการทดลองคือเมื่อใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบทั่วไปกับเครื่องผสมใบพัดแบบเกลียวให้คอนกรีตมวลเบาที่เกิดการยุบตัวเนื่องจากใบพัดและการผสมที่ปั่นเร็วจนเกินไปทำให้โฟมเกิดการแตกตัวได้



รูปที่ 3.2 คอนกรีต CLC ที่เกิดการแตกตัวของโฟมและยุบตัวผสมด้วย mixer แบบทั่วไป

ในส่วน of เครื่องผสมคอนกรีตใบพัดแบบแบนวนอนให้ผลการทดลองที่ดีกว่าเครื่องแรกคือได้คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ยุบตัวและมีเนื้อคอนกรีตที่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางและข้อแนะนำเบื้องต้นในการเลือกเครื่องผสมคอนกรีตมวลเบาในระบบเซลลูล่าโดยมีหลักเกณฑ์ในการเลือกเครื่องผสมคอนกรีต (Mixer) คือ ควรเลือกเครื่องผสมคอนกรีตที่มีใบพัดเป็นระบบแบนวนอน (Horizontal Mixer) เนื่องจากใบพัดในลักษณะนี้จะสามารถผสมมอร์ต้าและเนื้อโฟมให้เข้ากันได้โดยใช้ระยะเวลาที่สั้นทำให้พลังงาน (Mixing Energy) ที่เกิดขึ้นขณะผสมคอนกรีตไม่มากเกินไปเพราะเมื่อใช้ระยะเวลาผสมนานทำให้พลังงานในการผสมมากเกินไปจะส่งผลให้เนื้อโฟมแตกตัวและควรเลือกเครื่องผสมคอนกรีตที่มีรอบการหมุนของใบพัดไม่ควรเกิน 40 - 60 รอบต่อนาทีหากใบพัดหมุนเร็วเกินไปจะทำให้เนื้อโฟมแตกตัว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องผสมคอนกรีตที่มีระบบใบพัดแบบแนวนอนเพื่อใช้ผสมมอร์ต้ากับโฟมให้เข้ากัน มีระบบแรงดันอากาศ 1.5 เมกะปาสคาล มีกำลังในการผสม 0.75 กิโลวัตต์ โดยเครื่องผสมคอนกรีตนี้มีกระบวนการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.4 เครื่องผสมคอนกรีต

3.1.2 การทดสอบโฟม

ในกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC โฟมจัดเป็นส่วนผสมที่สำคัญมาก เนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้มีฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับโฟมที่เป็นส่วนผสม งานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกโฟมชนิดสังเคราะห์ (Synthetic foam) มาใช้ในงานวิจัย โดยมีการทดสอบโฟมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C796-04 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบความเข้มข้นของโฟม โดยเริ่มจากการผสมน้ำยาโฟมกับน้ำประปาในอัตราส่วนระหว่างน้ำยาโฟมต่อน้ำคือ 1:20 ตรวจสอบความเข้มข้นโฟมด้วยการทดลองฉีดโฟมและสังเกตเนื้อโฟมว่ามีความข้นเกินไปหรือไม่
- 2) ทดสอบอัตราการไหลของโฟม โดยการผสมน้ำยาโฟมตามอัตราส่วน 1:20 ฉีดโฟมใส่ถังที่มีปริมาตรคงที่จับเวลาเมื่อโฟมเต็มถังและบันทึกผล ทำการทดลองซ้ำจนกว่าจะได้อัตราการไหลโฟมประมาณ 1-2 ลิตรต่อวินาที
- 3) ทดสอบการยุบตัวของโฟม โดยการผสมน้ำยาโฟมตามอัตราส่วนในข้อ 1 ฉีดโฟมใส่ถังที่มีปริมาตรคงที่ ปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการยุบตัวของโฟม และทดสอบความหนาแน่นโฟม ผสมน้ำยาโฟมตามอัตราส่วนในข้อ 1 หาความหนาแน่นของโฟมจนกว่าจะได้ความหนาแน่นโฟมที่มีค่าประมาณ 32-64 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

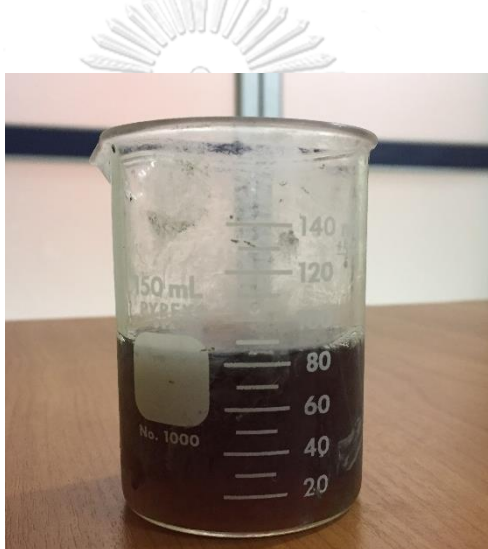


รูปที่ 3.5 การทดสอบโฟม

3.2 การทดลองหาส่วนผสมคอนกรีต CLC ด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error)

3.2.1 การจัดเตรียมส่วนผสม

- 1) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
- 2) น้ำประปาสะอาด
- 3) ทรายละเอียด ผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ตาม ASTM C136 นำทรายมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 4.75, 2.36, 1.18, 0.6, 0.3, 0.15 มิลลิเมตร โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.60 และมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.68
- 4) น้ำยาโฟมชนิดสังเคราะห์ (Synthetic Foam) การเตรียมน้ำยาโฟมเป็นไปตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.1.2 โดยผสมน้ำยาโฟมชนิดสังเคราะห์กับน้ำในอัตราส่วน 1:20



รูปที่ 3.6 น้ำยาโฟมชนิดสังเคราะห์ (Synthetic Foam)

- 5) เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) ขนาดเฉลี่ย 2-3 เซนติเมตร ที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ผ่านการอบแห้งมาทำให้เส้นใยมีความแข็งกระด้างและจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นก่อนการนำเส้นใยมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต ต้องมีการเตรียมเส้นใยก่อน การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำเส้นใยมาแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นใยคลายตัว หลังจากนั้นนำเส้นใยมาซบให้แห้งด้วยผ้าหรือกระดาษซับน้ำและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอีกประมาณ 1-2 วันเพื่อให้เส้นใยไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจนเกินไปก่อนผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันลงในคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 3.7 เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber)

- 6) ถ่านชีวภาพ (Biochar) นำถ่านชีวภาพมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 วัน เพื่อปรับความชื้นของถ่าน การกระจายขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพแสดงตามตารางที่ ก.1.2



รูปที่ 3.8 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

3.2.2 การออกแบบส่วนผสม

ในขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการกำหนดอัตราส่วนผสมขึ้นมาก่อนหลังจากนั้นจึงค่อยไปทดสอบคุณสมบัติภายหลัง วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนักแตกต่างจากวิธีการออกแบบส่วนผสมของ American Concrete Institute (ACI) ที่ออกแบบส่วนผสมด้วยการ

กำหนดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตขึ้นมาก่อน การออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนักนิยมใช้กันมาก ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าเนื่องจากคอนกรีตประเภทนี้มีส่วนผสมที่สำคัญคือโฟมซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมครั้งนี้จึงเลือกกำหนดร้อยละของโฟมโดยน้ำหนักคือร้อยละ 30 40 และ 50 การออกแบบส่วนผสมแบ่งเป็น 4 ตอน ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การออกแบบส่วนผสมตอนที่ 1 เป็นการหาสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีต CLC แบบปกติที่ยังไม่มีส่วนผสมของเส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ การออกแบบส่วนผสมในตอนนี้กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยกลุ่มตัวอย่าง CLC1- CLC3 ใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) เท่ากับ 1 และกลุ่มตัวอย่าง CLC4 – CLC6 ใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) เท่ากับ 1.5 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC แบบปกติต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			ร้อยละของ สัดส่วนโฟม
	ซีเมนต์	ทราย	น้ำ	
CLC1	586	586	293	30
CLC2	503	503	252	40
CLC3	419	419	210	50
CLC4	506	759	253	30
CLC5	434	651	217	40
CLC6	362	543	181	50

จากตารางที่ 3.1 นำส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ได้ทำการออกแบบไว้มาผลิตตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งและทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน นำผลการทดสอบที่ได้มาประเมินและวิเคราะห์เพื่อออกแบบส่วนผสมในตอนที่ 2

ตอนที่ 2 การออกแบบส่วนผสมในตอนที่ 2 เป็นการเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดตามมาตรฐาน มอก.คือกลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 จากตอนที่ 1 นำมาผสมต่อและใส่เส้นใยพาล์มน้ำมันลงในส่วนผสมร้อยละ 2 4 และ 6 แทนที่ปริมาณทราย รายละเอียดของส่วนผสมคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			ร้อยละ ของ สัดส่วน โฟม	ร้อยละสัดส่วน เส้นใยปาล์ม น้ำมัน
	ซีเมนต์	ทราย	น้ำ		
CLC3 Fi2	419	410	210	50	2
CLC3 Fi4	419	402	210	50	4
CLC3 Fi6	419	394	210	50	6
CLC6 Fi2	362	532	181	50	2
CLC6 Fi4	362	521	181	50	4
CLC6 Fi6	362	510	181	50	6

จากตารางที่ 3.2 นำส่วนผสมของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ได้ทำการ
ออกแบบไว้มาผลิตตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพ
แห้ง อัตราการดูดซึมน้ำ ทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน และกำลังดึงที่ 45 วันขึ้นไป จากนั้น
บันทึกผลการทดสอบที่ได้

ตอนที่ 3 การออกแบบส่วนผสมในตอนที่ 3 เป็นการเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดตามมาตรฐาน
มอก. ไว้จากตอนที่ 1 คือกลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 นำมาผสมต่อและใส่ถ่านชีวภาพลงใน
ส่วนผสมร้อยละ 5 10 และ 15 แทนที่ปริมาณทราย ร้อยละเอียดยของส่วนผสมคอนกรีต CLC ผสม
ด้วยถ่านชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			ร้อยละของ สัดส่วนโฟม	ร้อยละ สัดส่วนถ่าน ชีวภาพ
	ซีเมนต์	ทราย	น้ำ		
CLC3 Bi5	419	398	210	50	5
CLC3 Bi10	419	377	210	50	10
CLC3 Bi15	419	356	210	50	15
CLC6 Bi5	362	516	181	50	5
CLC6 Bi10	362	489	181	50	10
CLC6 Bi15	362	462	181	50	15

จากตารางที่ 3.2 นำส่วนผสมของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพที่ได้ทำการออกแบบไว้มาผลิตตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง อัตราการดูดซึมน้ำ ทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน และกำลังดึงที่ 45 วันขึ้นไป จากนั้นบันทึกผลการทดสอบที่ได้

ตอนที่ 4 การออกแบบส่วนผสมในตอนที่ 4 เป็นการเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดตามมาตรฐาน มอก. ไว้จากตอนที่ 2 และ 3 นำมาผสมต่อในตอนที่ 4 นำเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC ร่วมกัน โดยมีการปรับสัดส่วนของเส้นใยปาล์มน้ำมันเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งที่ดีที่สุดขึ้น ในส่วนของถ่านชีวภาพได้เลือกร้อยละสัดส่วนเท่ากับ 10 มาใช้ในการทดลองตอนที่ 4 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			ร้อยละของ สัดส่วนโฟม	ร้อยละ สัดส่วนเส้นใยปาล์ม น้ำมัน	ร้อยละ สัดส่วน ถ่านชีวภาพ
	ซีเมนต์	ทราย	น้ำ			
CLC3 Fi1.5 Bi10	419	371	210	50	1.5	10
CLC3 Fi1.5 Bi10	335	297	168	60	1.5	10
CLC6 Fi1.5 Bi10	362	481	181	50	1.5	10
CLC6 Fi1.5 Bi10	290	385	145	60	1.5	10

3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การผลิตตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบใบพัดแนวนอนมีกระบวนการผลิตตัวอย่างทดสอบ ดังนี้

- 1) นำปูนซีเมนต์และทรายละเอียดที่ซึ่งเตรียมไว้เทใส่ เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Foaming Machine) หลังจากนั้นเปิดเครื่องและผสมส่วนผสมให้เข้ากัน

- 2) ใส่เส้นใยปาล์ม น้ำมัน และถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่ออกแบบไว้โดยค่อยๆใส่ทีละส่วน เนื่องจากหากใส่พร้อมกันจะทำให้เส้นใยติดบริเวณใบพัดทำให้เครื่องผสมคอนกรีตไม่สามารถทำงานได้และจะส่งผลให้ได้เนื้อคอนกรีตที่ไม่มีคุณภาพ
- 3) ใส่น้ำลงไปเครื่องผสมคอนกรีต โดยระหว่างที่เติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีตไว้ เพื่อให้ น้ำที่เติมลงไปเข้ากันและผสมจนกว่าส่วนผสมจะเข้ากันทั้งหมด ในส่วนขั้นตอนการเติมน้ำให้สังเกตเนื้อของมอร์ต้าและใช้ระยะเวลาในการผสมให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ หากใช้ระยะเวลาในการผสมนานเกินไปจะส่งผลต่อเนื้อคอนกรีต CLC
- 4) เมื่อส่วนผสมของมอร์ต้าเข้ากันดีแล้วฉีดโฟมที่เตรียมไว้ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.1.2 ในปริมาณที่ได้ออกแบบส่วนผสมใส่เนื้อคอนกรีตและผสมให้เข้ากันโดยระยะเวลาในการผสมโฟมกับมอร์ต้าต้องไม่เกิน 5 นาที เนื่องจากถ้าปล่อยให้เครื่องผสมนานเกินไปโฟมอาจแตกตัวได้และส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่เกิดการยุบตัว นำคอนกรีตเทลงแบบหล่อที่เตรียมไว้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 (ก) ตัวอย่างทดสอบหลังเทลงแบบหล่อ (ข) ตัวอย่างทดสอบก่อนนำไปบ่มน้ำ

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง

การทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2601 - 2556 เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบ หล่อตัวอย่างทดสอบให้มีขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างทดสอบออกจากตู้อบและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง บันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้หลังจากการอบและหาปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

ρ = ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m = มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ (กิโลกรัม)

v = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (ลูกบาศก์เมตร)



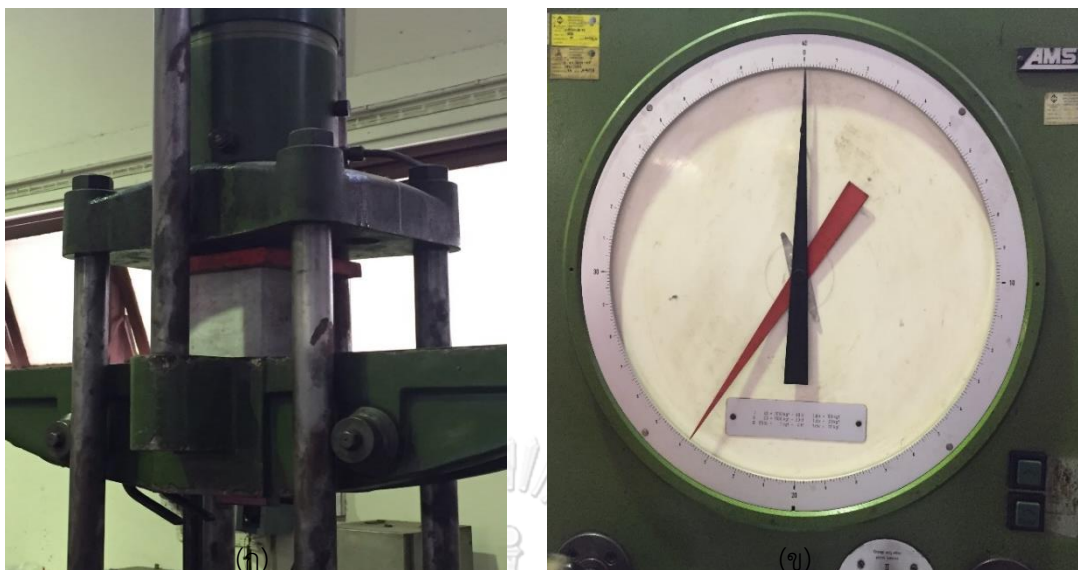
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.10 (ก) ตัวอย่างทดสอบภายในตู้อบ (ข) ตู้สำหรับอบตัวอย่างทดสอบ

3.4.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2601 - 2556 เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบหล่อตัวอย่างให้มีขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างไม่เกิน 1 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่หล่อเสร็จแล้วไปบ่มในน้ำสะอาดให้น้ำท่วมตัวอย่าง หลังจากนั้นเมื่อครบ 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 วัน เพื่อให้ตัวอย่างเริ่มแห้งก่อนนำตัวอย่างทดสอบไปกดกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องกดกำลัง Amster 40 ตัน ทำการกดตัวอย่างทดสอบจนได้ค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อตัวอย่างเกิดการเสียหาย



รูปที่ 3.11 (ก) การกดกำลังรับแรงอัดบนตัวอย่างทดสอบ (ข) การวัดค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อตัวอย่างเกิดการเสียหาย

3.4.3 การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน มอก .2601-2556 เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบ หล่อตัวอย่างทดสอบให้มีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร โดยมีวิธีการทดสอบคืออบตัวอย่างในตู้อบให้แห้งจนได้มวลที่คงที่เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อตัวอย่างทดสอบแห้งนำมาชั่งมวลและจดบันทึกค่า แช่ตัวอย่างทดสอบในน้ำสะอาดให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วยกออก ใช้ผ้าชุมน้ำเช็ดที่ผิวที่ละก้อนแล้วชั่งใหม่ภายใน 3 นาที มวลที่ชั่งได้ถือเป็นมวลขึ้นทดสอบขณะเปียกน้ำ

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

A = อัตราการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)

m_1 = มวลของตัวอย่างทดสอบเมื่อแห้ง (กิโลกรัม)

m_2 = มวลของตัวอย่างทดสอบเมื่อเปียก (กิโลกรัม)



รูปที่ 3.12 การบ่มคอนกรีตในน้ำเพื่อใช้เป็นมวลของตัวอย่างทดสอบในสภาพเปียก

3.4.4 การทดสอบกำลังดึง (Splitting Tensile Strength)

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบเพื่อหากล้างตั้งบนระนาบแตกร้าของคอนกรีต การทดสอบกำลังดึงเป็นไปตามมาตรฐาน BS1881 Part117 :1983 ทำได้โดยการเตรียมตัวอย่างขนาด 15x15x15 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการกดตัวอย่างทดสอบจนตัวอย่างแตกในแนวตั้งตามเส้นผ่านศูนย์กลาง บันทึกผลและคำนวณหาค่ากำลังดึงได้จากสูตร

$$\sigma_{ct} = \frac{2F}{\pi ld}$$

σ_{ct} = Splitting Tensile Strength (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

F = น้ำหนักกดสูงสุด (นิวตัน)

l = ความยาวของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)



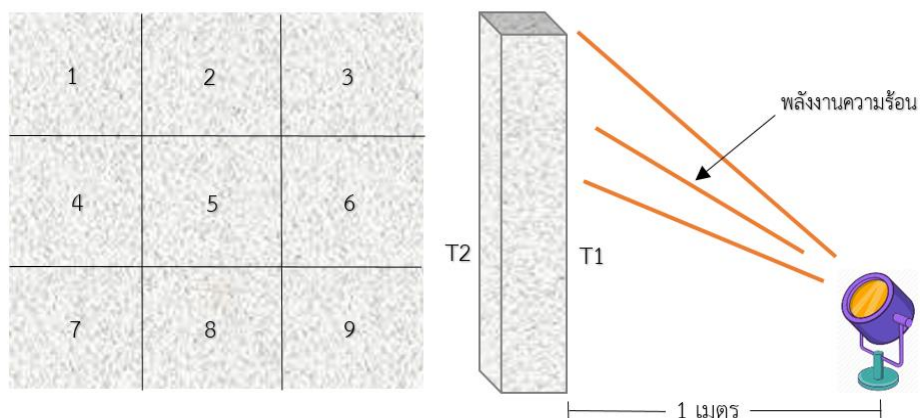
รูปที่ 3.13 การทดสอบกำลังดึง Splitting Tensile Strength

3.4.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อน

การทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสเป็นการทดสอบเพื่อประเมินว่าเมื่อใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพในส่วนผสมของคอนกรีตประเภทนี้ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ในการทดสอบคุณสมบัติด้านความร้อนในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกพิจารณาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

3.4.5.1 การถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน

การทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อนของผนังคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยพิจารณาจากอุณหภูมิผิวภายนอกผนัง T1 คือด้านที่สัมผัสกับพลังความร้อนโดยตรงและอุณหภูมิผิวภายใน การทดสอบมีกระบวนการ ดังนี้ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ เริ่มจากหล่อตัวอย่างทดสอบให้มีขนาด 30 x 30 x 8 เซนติเมตร โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบตามตารางที่ 3.5 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบที่หล่อเสร็จแล้วมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิทั่วทั้งแผ่นที่ใกล้เคียงกัน นำตัวอย่างแต่ละแผ่นมาติดตารางทั้งหมด 9 ช่องให้มีขนาดเท่ากันทุกช่อง ขั้นตอนการทดสอบ เริ่มจากวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบทั้งด้านหน้าและด้านหลังด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) นำตัวอย่างมาติดตั้งให้มีระยะห่างจากสปอร์ตไลท์ 1 เมตร เริ่มเปิดสปอร์ตไลท์ (ทำการทดสอบโดยให้สปอร์ตไลท์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน) จับเวลาและวัดอุณหภูมิด้านหน้าแผ่นผนังและด้านหลังแผ่นผนัง ทุก 2 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง บันทึกผลเป็นเป็นค่าอุณหภูมิ T1 และ T2



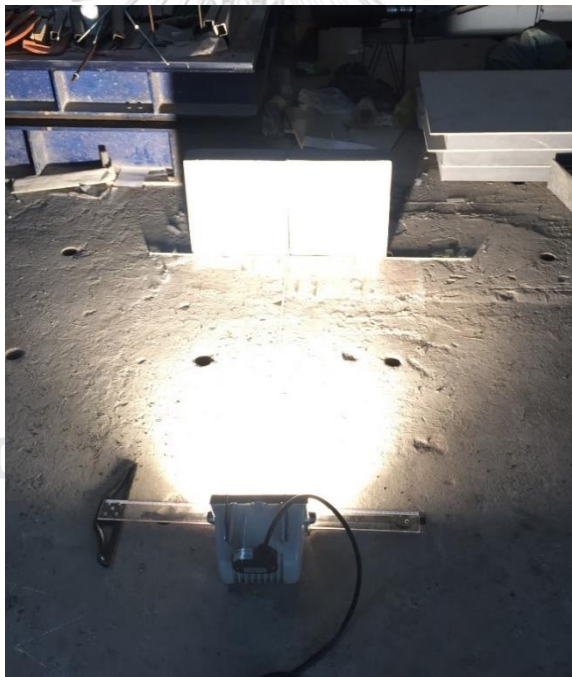
รูปที่ 3.14 รายละเอียดการทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงกลุ่มตัวอย่างทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อน

กลุ่มที่	ชนิดตัวอย่างทดสอบการถ่ายเทความร้อน
1	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC แบบปกติ
2	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 15%
3	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม 6%
4	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 10% + เส้นใยปาล์ม 4 %
5	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC แบบปกติ
6	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 15%
7	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม 6%
8	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 10% + เส้นใยปาล์ม 4 %
9	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม 2%
10	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม 2%
11	CLC3 s/c=1 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 10% + เส้นใยปาล์ม 1.5 % + %foam = 60
12	CLC6 s/c=1.5 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ 10% + เส้นใยปาล์ม 1.5 % + %foam = 60



รูปที่ 3.15 ผนังตัวอย่างทดสอบ



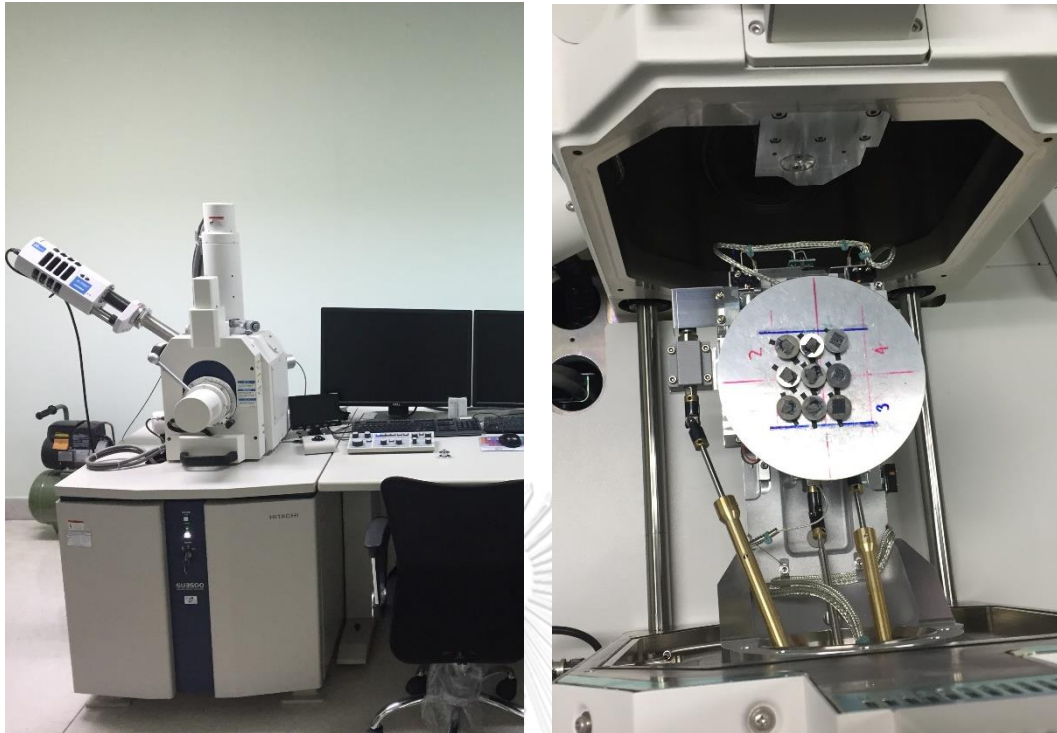
รูปที่ 3.16 การทดสอบการถ่ายเทความร้อนและการคายความร้อนด้วยสปอร์ตไลท์



รูปที่ 3.17 Infrared Thermometer

3.4.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต CLC เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของโพรงอากาศ เส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM ทำได้โดยเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดไม่เกิน 10 x 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อหาตำแหน่งของเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาขัดด้วยกระดาษทรายและนำไปอบให้แห้งด้วยวิธีอบสูญญากาศ (Freeze dryer) อบตัวอย่างในสูญญากาศจนกว่าความชื้นในตัวอย่างจะลดลงขั้นต่อไปนำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองคำและนำเข้าเครื่อง SEM



รูปที่ 3.18 รายละเอียดการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (Dry Density)

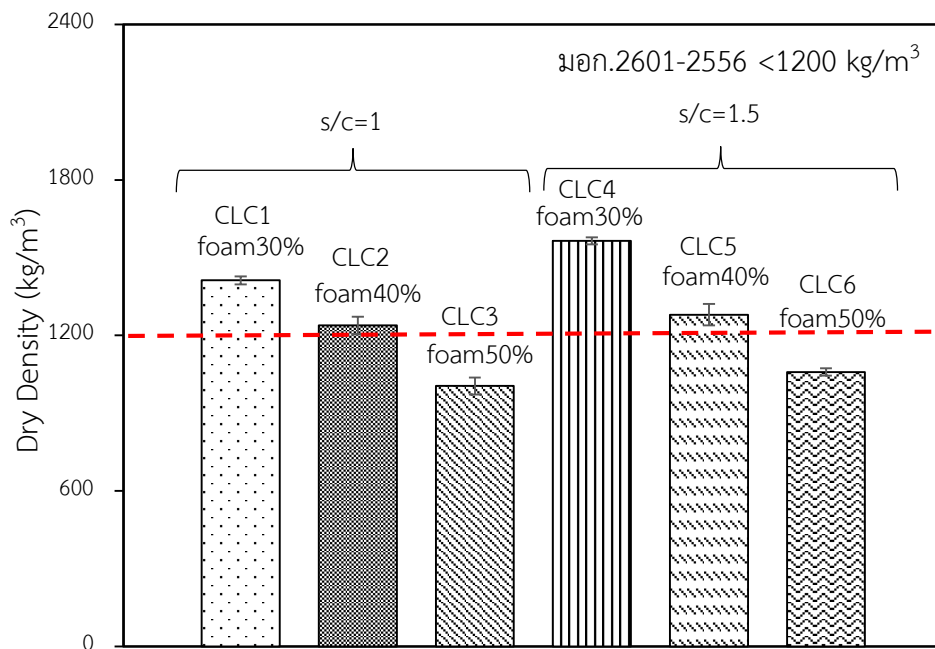
4.1.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC แบบปกติ

การทดสอบได้ออกแบบโดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 6 กลุ่มและใช้ส่วนผสมตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 ตลอดการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของคอนกรีต CLC มี 2 ปัจจัยในการทดสอบครั้งนี้คืออัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) และ ร้อยละของสัดส่วนโพลีเมอร์ ในปัจจัยแรกค่า s/c จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่า s/c เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นคอนกรีต CLC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่น ในกลุ่มตัวอย่าง CLC 1 (s/c = 1, โพลีเมอร์ ร้อยละ 30) เมื่อนำมาทดสอบความหนาแน่น มีค่าเท่ากับ 1412.82 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ กลุ่มตัวอย่าง CLC4 (s/c = 1.5 , โพลีเมอร์เท่ากับร้อยละ 30) มีค่าความหนาแน่นมากกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 1565.23 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สาเหตุเนื่องจากในกระบวนการผสมคอนกรีต CLC มีส่วนผสมหลักคือโพลีเมอร์ซีเมนต์สามารถผสมและเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับโพลีเมอร์ได้ดีกว่าทรายทำให้เมื่อซีเมนต์ผสมกับโพลีเมอร์เกิดเป็นเนื้อคอนกรีตที่มีลักษณะฟูและเบากว่าจึงส่งผลให้คอนกรีต CLC ที่ได้มีน้ำหนักค่อนข้างเบา

ปัจจัยที่สองที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีต CLC คือสัดส่วนโพลีเมอร์ เมื่อสัดส่วนโพลีเมอร์ในคอนกรีต CLC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต CLC มีค่าลดลง เนื่องจากโพลีเมอร์ที่ผสมกับเนื้อคอนกรีตจะแทรกตัวไปในเนื้อคอนกรีต เมื่อคอนกรีต CLC แข็งตัว โพลีเมอร์ที่ผสมเข้าไปจะแปรสภาพเป็นโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีต โดยโพรงอากาศที่เกิดขึ้นมีลักษณะของโครงสร้างแบบเซลล์ปิดส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีต CLC จึงลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.1 ตัวอย่างเช่น เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่าง CLC1 และ CLC3 ทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีค่า s/c ที่เท่ากันแต่ CLC1 มีสัดส่วนโพลีเมอร์ร้อยละ 30 ซึ่งน้อยกว่า CLC3 ที่มีสัดส่วนโพลีเมอร์ร้อยละ 50 ส่งผลให้ค่า ความหนาแน่นมีค่าที่ต่างกัน โดยที่กลุ่มตัวอย่าง CLC1 มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า CLC3 เพิ่มขึ้นร้อยละ 40

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ตามรูปที่ 4.1 คอนกรีตมวลเบาแบบเต็มพองอากาศชนิด C12 ควรมีค่าความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 1001 – 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานนี้ ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6



รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC แบบปกติ

4.1.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

จากผลการทดสอบความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.1.1 มีกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 เพียง 2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6

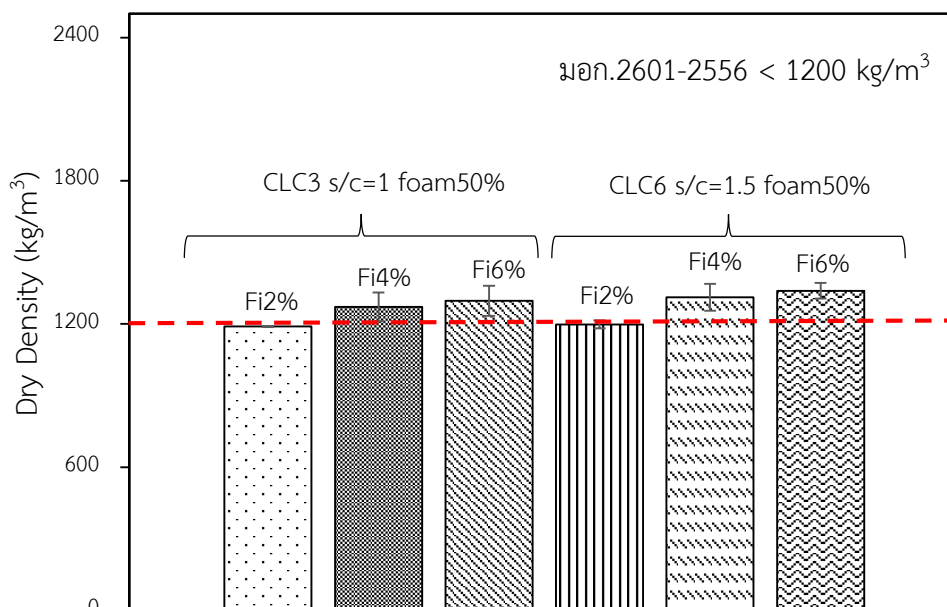
ดังนั้นคอนกรีตผสมเส้นใยจะเลือกเพียง CLC3 และ CLC 6 มาทดสอบเพิ่มเติม โดยการเพิ่มเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 2 4 และ 6 แทนที่ทรายละเอียด

จากผลการทดสอบพบว่า การใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC มีผลต่อคุณสมบัติความหนาแน่น เมื่อเทียบจากกลุ่มตัวอย่างที่มีค่า s/c และสัดส่วนส่วนโพนเท่ากันแล้ว การใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันมากขึ้นจะเพิ่มค่าความหนาแน่นให้มากขึ้นตามไปด้วย เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 เส้นใยปาล์มร้อยละ 2 ให้ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1189.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากเพิ่มสัดส่วนเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นร้อยละ 4 ให้ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1271.37 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเส้นใยปาล์มส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอาจเกิดจากเส้นใยปาล์มมีส่วนทำให้โพนเกิดการยุบตัวจึงทำให้ช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลงส่งผลให้เนื้อคอนกรีตภายในมีความหนาแน่นขึ้น

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ตามรูปที่ 4.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 ควรมีค่า ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1001-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มี

กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐาน 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC 6 ที่ผสมเส้นใยพาล์มร้อยละ 2



รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน

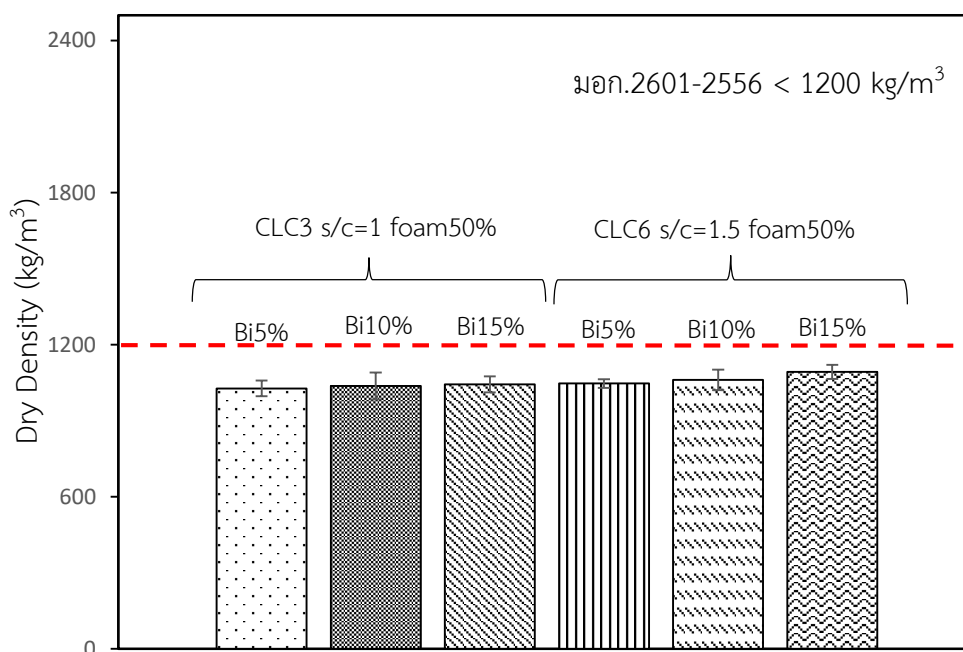
4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ

จากผลการทดสอบค่าความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.1.1 มีกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ได้ถูกนำมาทดสอบต่อโดยการเพิ่มส่วนผสมคือถ่านชีวภาพร้อยละ 5 10 และ 15 แทนที่ทรายละเอียด

จากผลการทดสอบ พบว่าการใส่ถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC เมื่อเทียบจากกลุ่มตัวอย่างที่มีค่า s/c สัดส่วนส่วนโฟมเท่ากัน การใส่ถ่านชีวภาพมากขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 เมื่อใส่ถ่านชีวภาพร้อยละ 5 10 และ 15 ให้ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1027.96 1037.62 และ 1043.85 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ ตามลำดับ ซึ่งการที่ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากถ่านชีวภาพมีขนาดเล็ก โครงสร้างภายในเป็นโพรงอากาศกระจายอยู่ทั่ว สามารถผสมเข้ากับส่วนผสมอื่นๆได้ดีและไม่ทำให้เกิดการยุบตัวของโฟม ความหนาแน่นจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 ตามรูปที่ 4.3 คอนกรีตมวลเบาแบบเต็มพองอากาศชนิด C12 ควรมีค่าความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 1001-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพมีค่าความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ มอก. ทุกกลุ่มตัวอย่าง

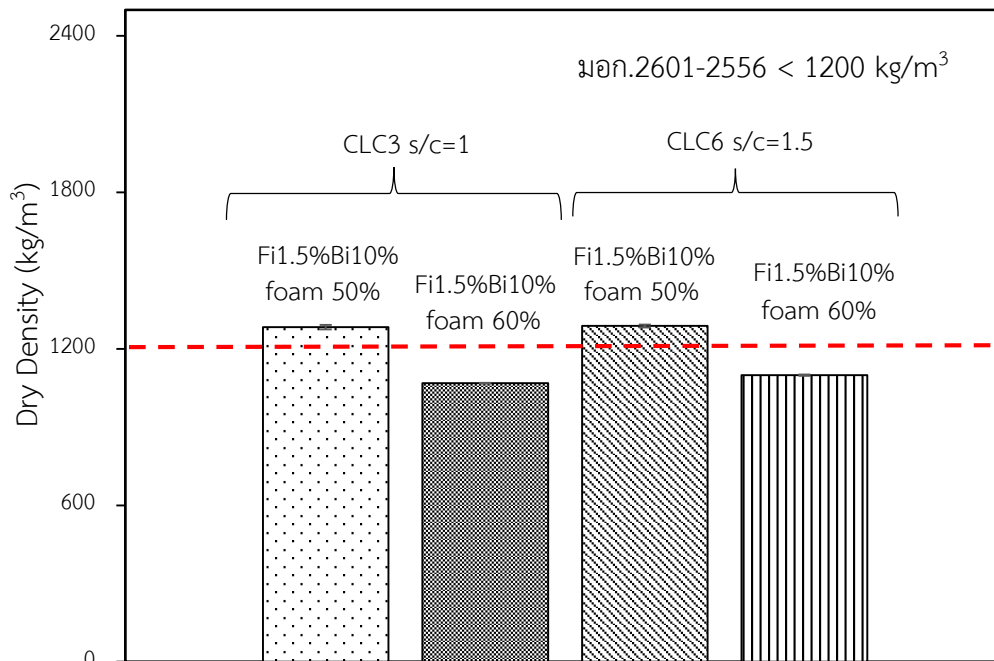


รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

4.1.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันและ ถ่านชีวภาพ

จากผลการทดสอบค่าความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.1.1 มีกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ได้ถูกนำมาทดสอบเพิ่มส่วนผสมคือถ่านชีวภาพและเส้นใยปาล์ม โดยใส่ถ่านชีวภาพและเส้นใยปาล์มร้อยละ 10 และ 1.5 ตามลำดับ แทนที่ทรายละเอียด โดยใช้สัดส่วนโฟมที่ร้อยละ 50 และ 60

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อค่า s/c เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 (s/c = 1, โฟมร้อยละ 50) มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1283.33 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่าง CLC6 (s/c = 1.5, โฟมร้อยละ 50) ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1287.56 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโฟมมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 60 มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1068.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ลดลงจากกลุ่มตัวอย่าง CLC3 ที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 ประมาณร้อยละ 20



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและ ถ่านชีวภาพ

ดังนั้นจากผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่ม ตัวอย่างสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) เมื่ออัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากซีเมนต์สามารถผสมเข้ากับโฟมได้ดีกว่า ทรายทำให้เนื้อคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์สูงกว่ามีลักษณะฟูและมีน้ำหนักเบา
- 2) เมื่อสัดส่วนโฟมในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลง สาเหตุเกิดจากปริมาณโฟมที่มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีช่องว่างอากาศมากขึ้น
- 3) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากเส้นใยปาล์มทำให้โฟมเกิดการยุบตัวและช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลง คอนกรีตจึงมีน้ำหนักมากขึ้น
- 4) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอนกรีต CLC เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สาเหตุเกิดจากถ่านชีวภาพมีอนุภาคขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และโครงสร้างภายในเป็นโพรงจึงไม่ทำให้โฟมของคอนกรีตเกิดการยุบตัว

- 5) กลุ่มตัวอย่างที่มีความหนาแน่นผ่าน มอก. คอนกรีตชนิด C12 ต้องมีความหนาแน่นตั้งแต่ 1001-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ ดังนี้ คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มร้อยละ 2, คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพผ่านเกณฑ์ทุกตัวอย่าง, คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มรวมกับถ่านชีวภาพร้อยละ 1.5 และ 10 (โพลีเมอร์ร้อยละ 60) ตามลำดับ

4.2 ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

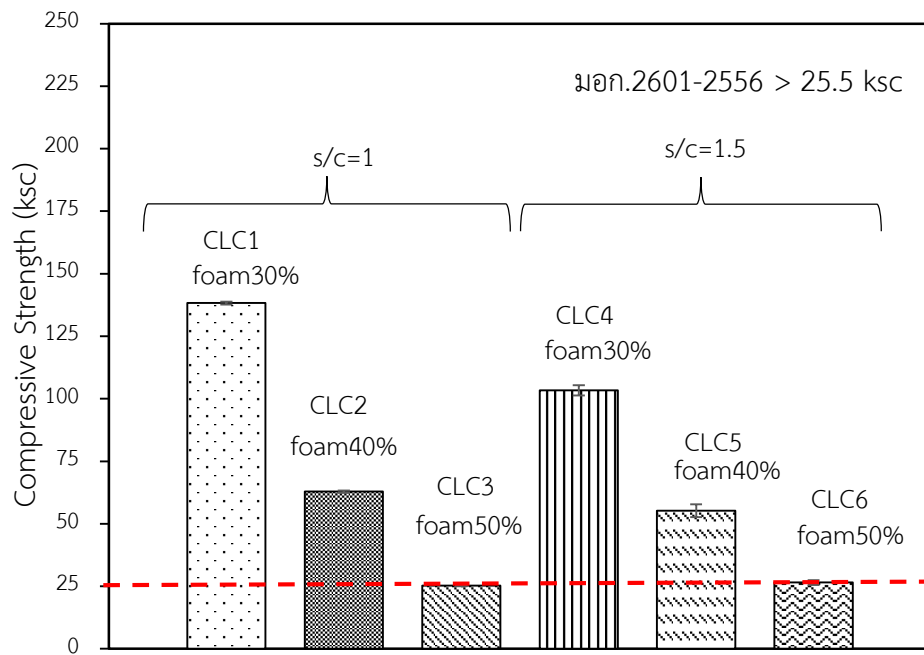
4.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC แบบปกติ

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC แบบปกติได้ออกแบบการทดสอบโดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 6 กลุ่ม โดยใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

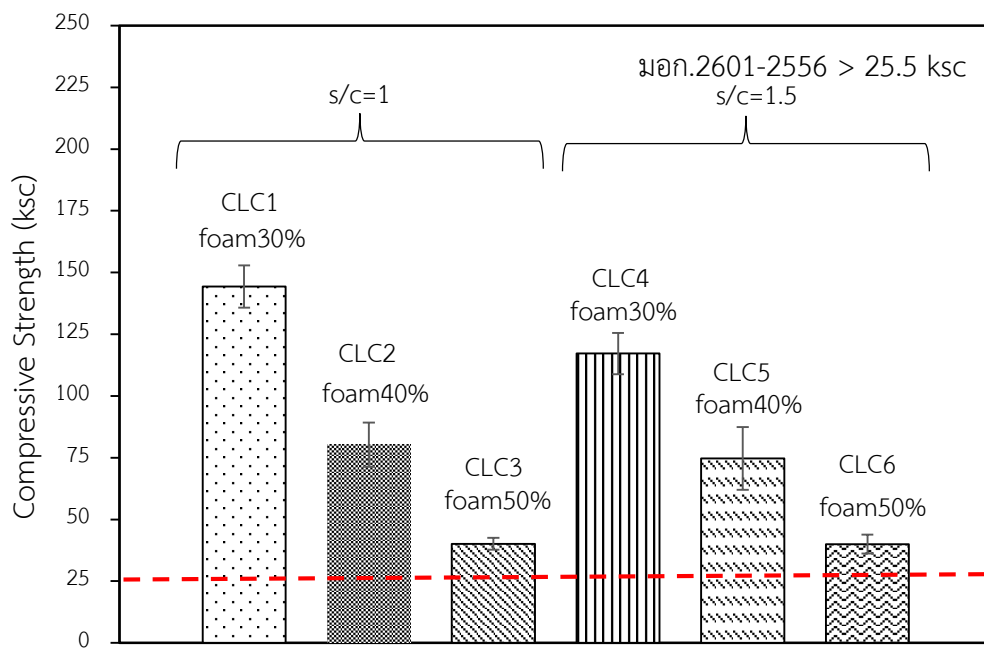
จากผลการทดสอบพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต CLC มี 2 ปัจจัยหลักคือ อัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) และร้อยละของสัดส่วนโพลีเมอร์ เมื่อพิจารณาค่า s/c

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่า s/c เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลง เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC1 (s/c = 1, โพลีเมอร์ร้อยละ 30) ทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน ได้ค่าเท่ากับ 138.30 และ 143.30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่าง CLC4 (s/c = 1, โพลีเมอร์ร้อยละ 30) ให้ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วันเท่ากับ 103.41 และ 117.19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการเปรียบเทียบพบว่ากลุ่มตัวอย่าง CLC4 มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่ากลุ่มตัวอย่าง CLC1 ร้อยละ 33 และ 22.28 กำลังอัดที่ลดลงนั้นเป็นผลมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงในคอนกรีต CLC ปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานภายในเนื้อคอนกรีตและส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต

ปัจจัยที่สองที่ส่งผลต่อกำลังอัดคือสัดส่วนโพลีเมอร์ เมื่อสัดส่วนโพลีเมอร์ในคอนกรีต CLC เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตเกิดช่องว่างอากาศมากขึ้นการยึดกันภายในเนื้อคอนกรีตลดลงและหากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 ควรมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รวมถึงการพิจารณาความหนาแน่นให้มีค่าไม่เกิน 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6



รูปที่ 4.5 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ



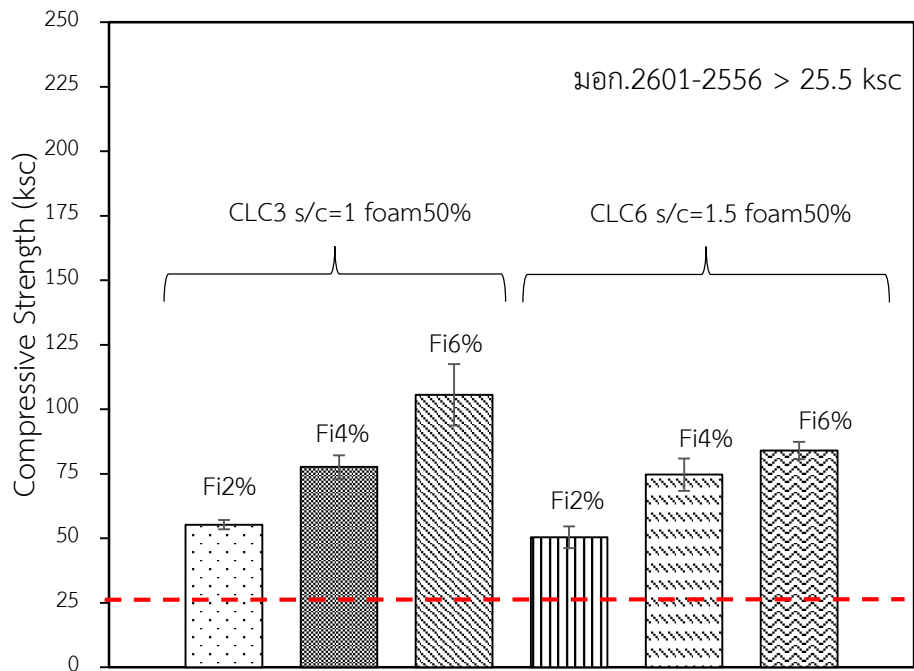
รูปที่ 4.6 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

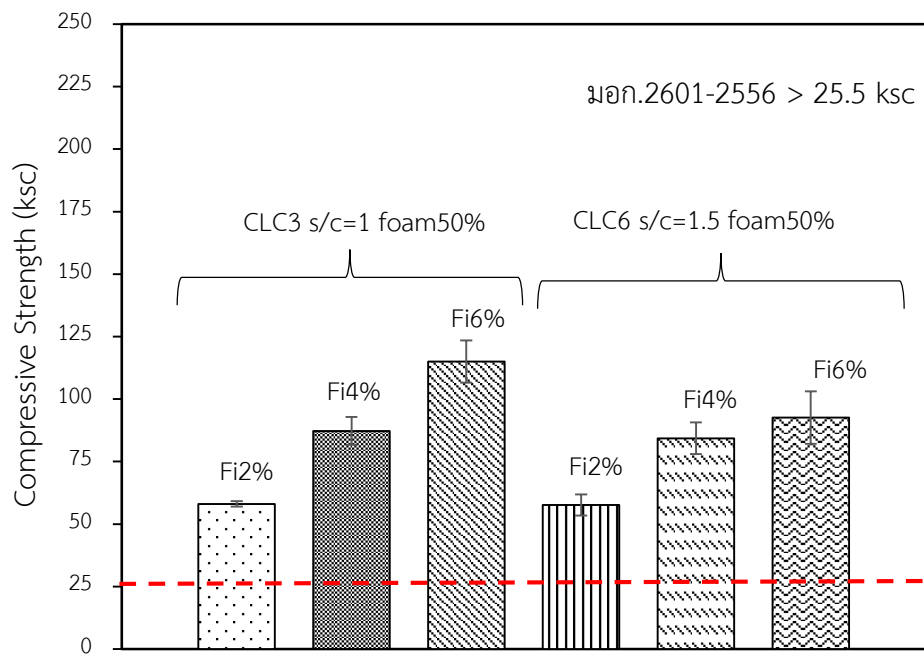
จากหัวข้อ 4.2.1 กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ได้ถูกนำมาทดสอบเพิ่มเติมโดยการเพิ่มส่วนผสมคือเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 2 4 และ 6 แทนที่ทรายละเอียด

จากผลการทดสอบพบว่า การใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC มีผลต่อกำลังอัด เมื่อเทียบจากกลุ่มตัวอย่างที่มีค่า s/c และสัดส่วนส่วนโพนเท่ากันแล้ว การใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันมากขึ้นทำให้คอนกรีต CLC มีแนวโน้มของกำลังอัดที่สูงขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 เมื่อใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 55.26 และ 58.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มเส้นใยปาล์มเป็นร้อยละ 4 ให้ค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน 77.63 และ 87.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 40.48 และ 50.27 ตามลำดับ กลุ่มตัวอย่าง CLC6 ใส่เส้นใยปาล์มร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 50.37 และ 57.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มสัดส่วนเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 ค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 74.67 และ 84.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 48.24 และ 46.28 ตามลำดับ

กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอัดเกิดจากเส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต CLC ลดลงส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นและหากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 ควรมีค่ากำลังอัดมากกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รวมถึงการพิจารณาความหนาแน่นให้มีค่าไม่เกิน 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 2



รูปที่ 4.7 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพอลิเมอร์น้ำมัน



รูปที่ 4.8 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพอลิเมอร์น้ำมัน

4.2.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ

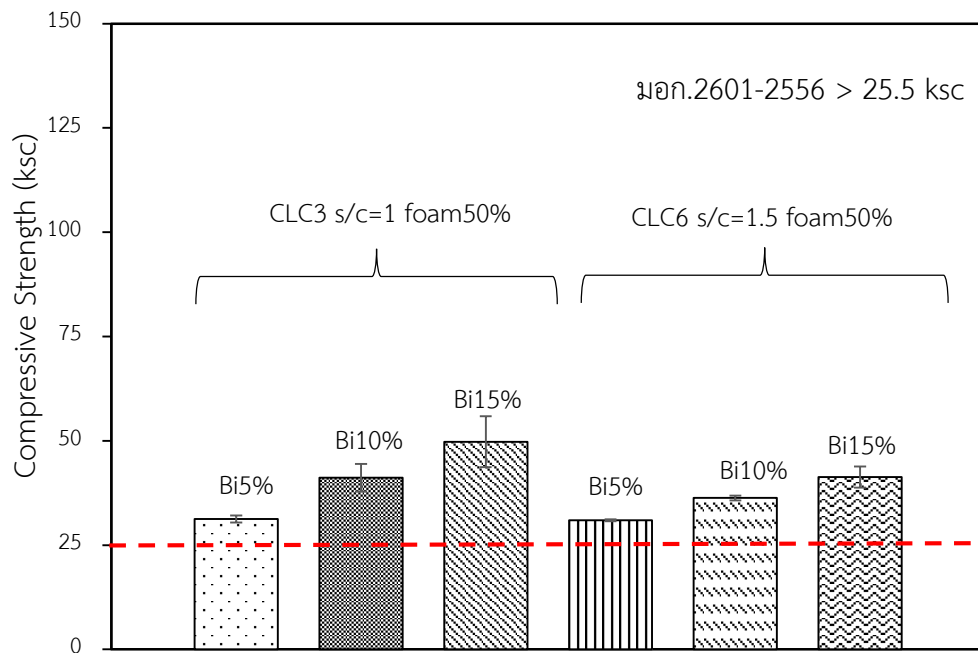
จากหัวข้อ 4.2.1 กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ได้ถูกนำมาทดสอบเพิ่มเติม โดยการเพิ่มส่วนผสมคือถ่านชีวภาพร้อยละ 5 10 และ 15 แทนที่ทรายละเอียดได้ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC มีผลต่อกำลังอัดเมื่อเทียบจากกลุ่มตัวอย่างที่มีค่า s/c และสัดส่วนส่วนโพมเท่ากัน การใส่ถ่านชีวภาพมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 เมื่อใส่ถ่านชีวภาพร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 31.26 และ 46.22 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หากเพิ่มสัดส่วนถ่านชีวภาพเป็นร้อยละ 10 ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.19 และ 52.89 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.77 และ 14.43 ตามลำดับ ในกลุ่มตัวอย่าง CLC6 มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเช่นเดียวกันกับกลุ่มตัวอย่าง CLC3

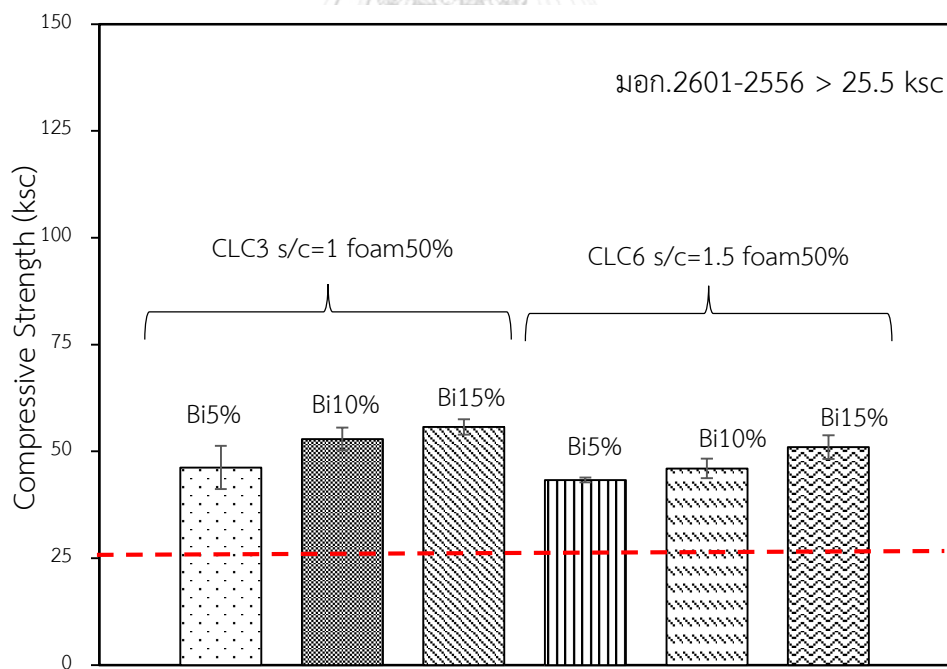
เมื่อเพิ่มสัดส่วนถ่านชีวภาพในส่วนผสมทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นสาเหตุอาจเกิดจากถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมที่มีขนาดเล็ก เมื่อนำถ่านชีวภาพมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต ผงถ่านชีวภาพสามารถช่วยประสานรอยต่อหรือเติมเต็มช่องว่างระหว่างซีเมนต์กับทรายละเอียดได้ในบางส่วน

นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีคุณสมบัติสำคัญคือมีความพรุน น้ำหนักเบา สามารถกักเก็บน้ำไว้ในตัวเองและค่อยๆคายน้ำให้กับคอนกรีต (Internal Curing) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้คอนกรีตมีกระบวนการบ่มที่ดีและช่วยพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต [26]

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 ควรมีค่ากำลังอัดมากกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รวมถึงการพิจารณาความหนาแน่นให้มีค่าไม่เกิน 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการทดสอบคอนกรีต CLC ที่ผสมถ่านชีวภาพมีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ มอก. ทุกกลุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 4.9 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

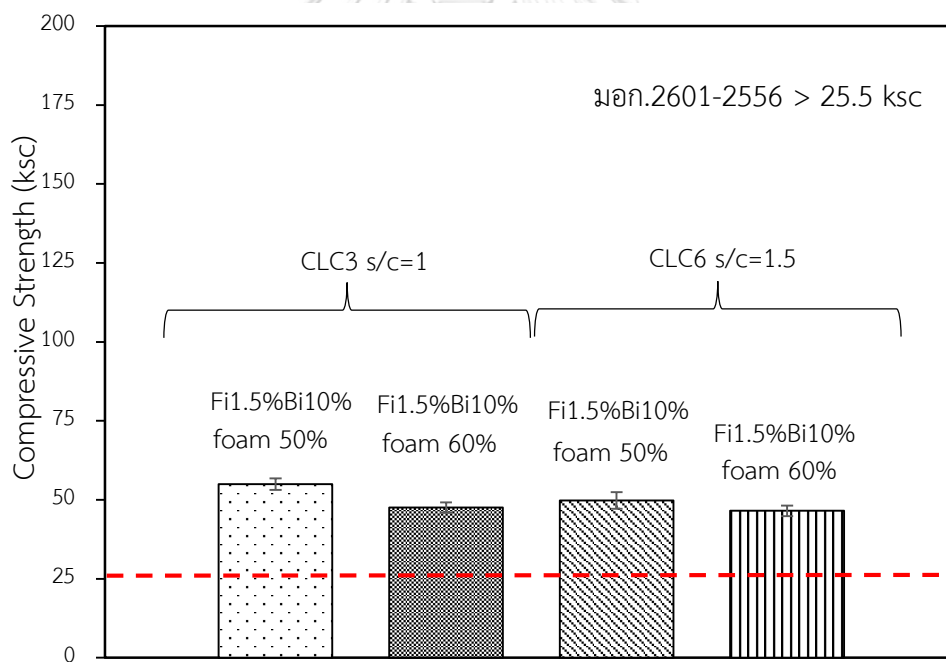


รูปที่ 4.10 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

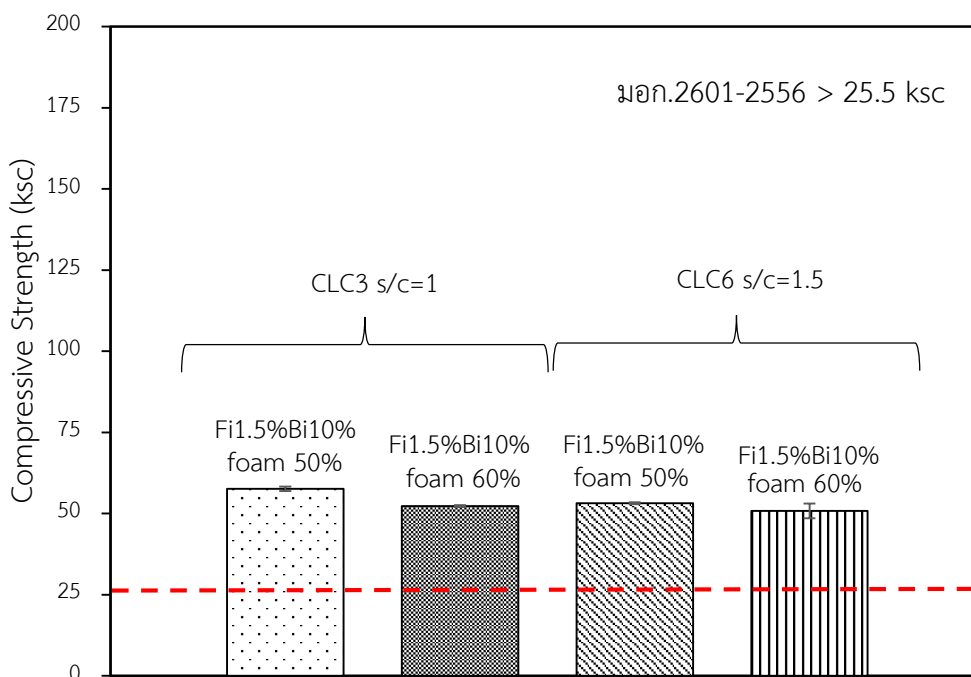
4.2.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

จากหัวข้อ 4.2.1 กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง CLC3 และ CLC6 ได้ถูกนำมาทดสอบเพิ่มเติม โดยใส่ถ่านชีวภาพในสัดส่วนร้อยละ 10 และใส่เส้นใยพาล์มร้อยละ 1.5 แทนที่ทรายละเอียด

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใส่เส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อค่า s/c เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ค่า s/c เท่ากับ 1 ที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 มีค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 54.96 และ 57.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่าง CLC6 ค่า s/c เท่ากับ 1.5 ที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 มีค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน เท่ากับ 49.78 และ 53.19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่ากำลังอัดลดลงร้อยละ 10.41 และ 8.35 นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนโฟมเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CLC ลดลง



รูปที่ 4.11 กำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มและถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.12 กำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

ดังนั้นจากผลการทดสอบกำลังอัดที่ 14 และ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่าง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) เมื่ออัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลง สาเหตุเกิดจากปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานภายในเนื้อคอนกรีต เมื่อปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงส่งผลให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย
- 2) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงมาก สาเหตุเกิดจากเส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลง คอนกรีตจึงสามารถรับกำลังอัดได้ดีขึ้น
- 3) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต CLC เพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากผงถ่านชีวภาพช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างทรายกับซีเมนต์และสามารถกักเก็บน้ำไว้ในตัวเองและค่อยๆคายน้ำให้กับคอนกรีต (Internal Curing)
- 4) กลุ่มตัวอย่างที่มีกำลังอัดผ่าน มอก. คอนกรีตชนิด C12 ต้องมีกำลังอัดมากกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รวมถึงพิจารณาความหนาแน่นประกอบด้วย) มีกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ ดังนี้ คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2, คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพผ่านเกณฑ์ทุกตัวอย่าง, คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร่วมกับถ่านชีวภาพร้อยละ 1.5 และ 10 (โฟมร้อยละ 60) ตามลำดับ

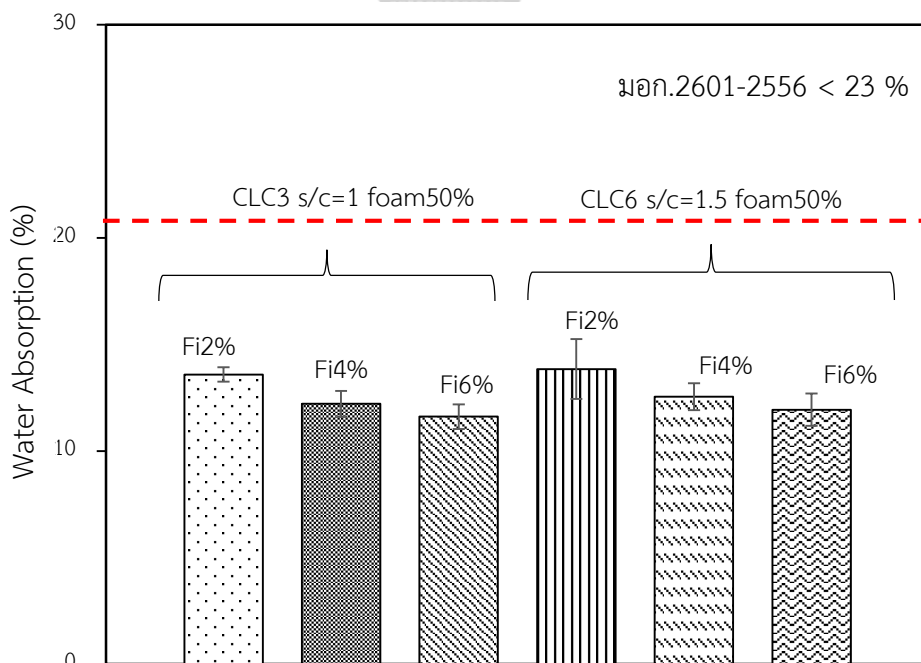
4.3 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

4.3.1 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) และสัดส่วนโฟมเท่ากัน อัตราการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยปาล์มน้ำมันในส่วนผสม เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ที่ s/c เท่ากับ 1 สัดส่วนเส้นใยปาล์มร้อยละ 2 อัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 13.59 เมื่อเพิ่มสัดส่วนเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นร้อยละ 4 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 12.21 โดยค่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 11.30 กลุ่มตัวอย่าง CLC6 ที่ s/c เท่ากับ 1.5 มีสัดส่วนเส้นใยปาล์มร้อยละ 4 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 11.34% เมื่อเพิ่มสัดส่วนเส้นใยปาล์มเป็นร้อยละ 6 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 11.21 โดยค่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 1.16

อัตราการดูดซึมน้ำจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนเส้นใยปาล์มเป็นผลมาจากเส้นใยปาล์มทำให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลงและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตดูดซึมน้ำได้ลดลง

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ชนิด C12 ต้องไม่เกินร้อยละ 23 พบว่าทุกกลุ่มตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อพิจารณากำลั้งอัดและความหนาแน่นด้วยจะพบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. คือกลุ่มตัวอย่างที่มีสัดส่วนเส้นใยปาล์มน้ำมัน 2%

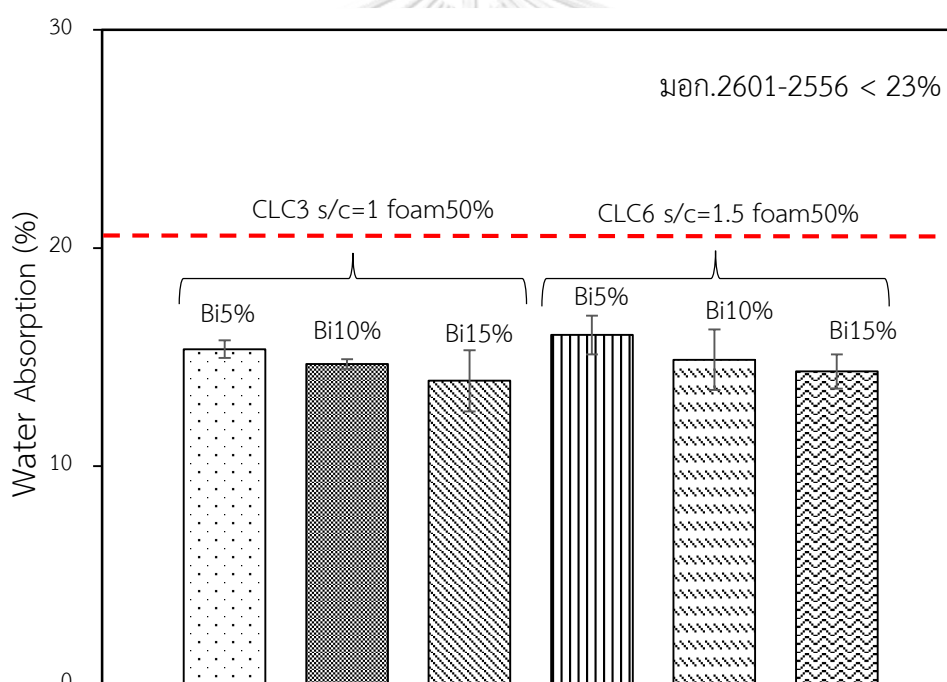


รูปที่ 4.13 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

4.3.2 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมด้วยถ่านชีวภาพ

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ จากผลการทดสอบพบว่าที่ s/c และสัดส่วนโฟมเท่ากัน อัตราการดูดซึมน้ำจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของถ่านชีวภาพในส่วนผสม เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ที่ s/c เท่ากับ 1 สัดส่วนถ่านชีวภาพร้อยละ 5 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 15.36 เมื่อเพิ่มสัดส่วนถ่านชีวภาพเป็นร้อยละ 10 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.68 โดยค่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 4.63 ในกลุ่มตัวอย่าง CLC6 ที่ s/c เท่ากับ 1.5 มีสัดส่วนถ่านชีวภาพร้อยละ 10 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.87 เมื่อเพิ่มสัดส่วนถ่านชีวภาพเป็นร้อยละ 15 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.34 โดยค่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 3.70

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ชนิด C12 ต้องไม่เกิน 23% พบว่าทุกกลุ่มตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.



รูปที่ 4.14 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

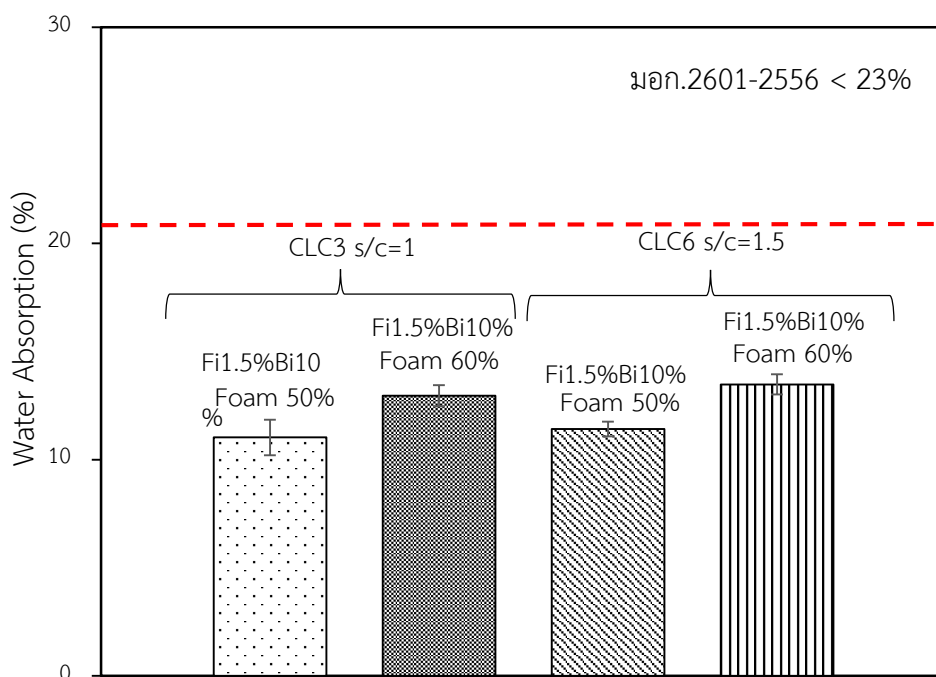
4.3.3 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

จากผลการทดสอบ พบว่าที่ s/c และสัดส่วนเส้นใยปาล์มกับถ่านชีวภาพเท่ากัน อัตราการดูดซึมน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนโฟมในส่วนผสม เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ที่สัดส่วนโฟม

ร้อยละ 50 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.03 ส่วนที่ใส่ส่วนผสมโฟมร้อยละ 60 มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 12.95 อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.41

สาเหตุที่อัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโฟมในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เกิดจากช่องว่างอากาศภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ช่องว่างอากาศที่กระจายตัวอยู่ภายในคอนกรีตจะเป็นตัวดูดซึมน้ำให้กับคอนกรีต

หากพิจารณาตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ชนิด C12 ต้องไม่เกิน 23% พบว่าทุกกลุ่มตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.



รูปที่ 4.15 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

ดังนั้นจากผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) ส่งผลต่ออัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC เพียงเล็กน้อย
- 2) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลง สาเหตุเกิดจากเส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลง เมื่อช่องว่างลดลงน้ำจึงซึมผ่านคอนกรีตได้ลดลง

- 3) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ลดลง ผงถ่านชีวภาพจะเข้าไปประสานช่องว่างระหว่างทรายกับซีเมนต์ภายในคอนกรีตบางส่วน น้ำจึงซึมผ่านคอนกรีตได้ลดลง
- 4) กลุ่มตัวอย่างที่มีกำลังอัดผ่าน มอก. คอนกรีตชนิด C12 ต้องมีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่าร้อยละ 23 (รวมถึงพิจารณาความหนาแน่นและกำลังอัดประกอบด้วย) มีกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ ดังนี้ คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2, คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพผ่านเกณฑ์ทุกตัวอย่าง, คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มรวมกับถ่านชีวภาพร้อยละ 1.5 และ 10 (โพลีเมอร์ร้อยละ 60) ตามลำดับ

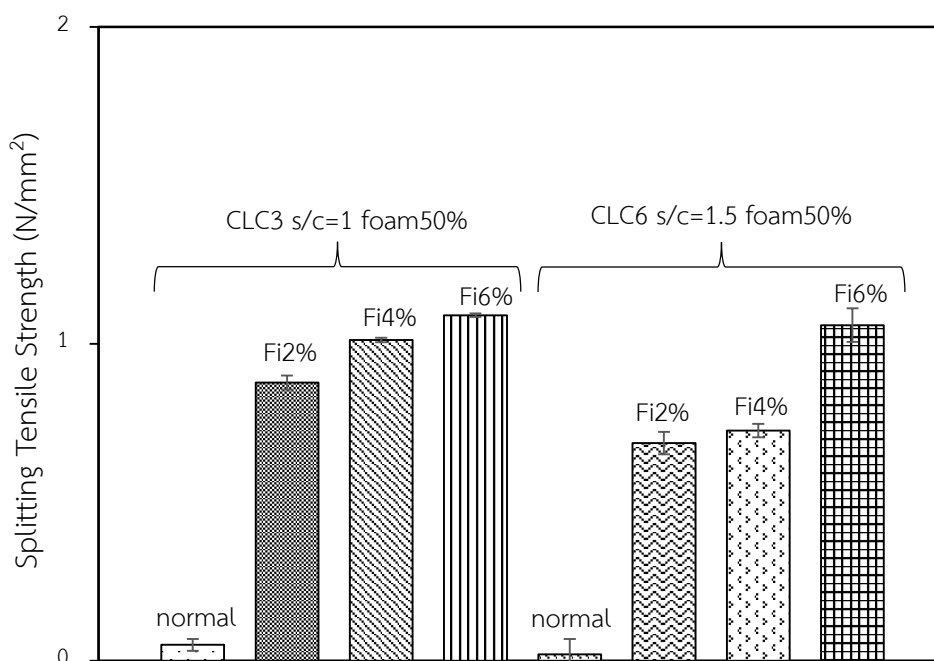
4.4 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ด้วยวิธี Splitting Tensile Test

4.4.1 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ตามมาตรฐาน BS1881- Part117 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังดึงระหว่างคอนกรีต CLC ปกติกับคอนกรีตที่ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน โดยทดสอบกำลังดึงที่อายุตัวอย่างตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป

จากผลการทดสอบพบว่าการใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมคอนกรีต CLC ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ไม่ใส่เส้นใยปาล์มน้ำมันให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.05 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่เส้นใยปาล์มร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.88 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเพิ่มเส้นใยปาล์มเป็นร้อยละ 4 และ 6 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 1.01 และ 1.09 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

นอกจากนี้พิจารณากลุ่มตัวอย่าง CLC6 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกลุ่มตัวอย่าง CLC3 คือเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้กำลังดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC6 คอนกรีตที่ไม่ใส่เส้นใยปาล์มมีค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.22 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่เส้นใยปาล์มร้อยละ 2 และ 4 ค่ากำลังดึงเพิ่มขึ้นเป็น 0.69 และ 0.73 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



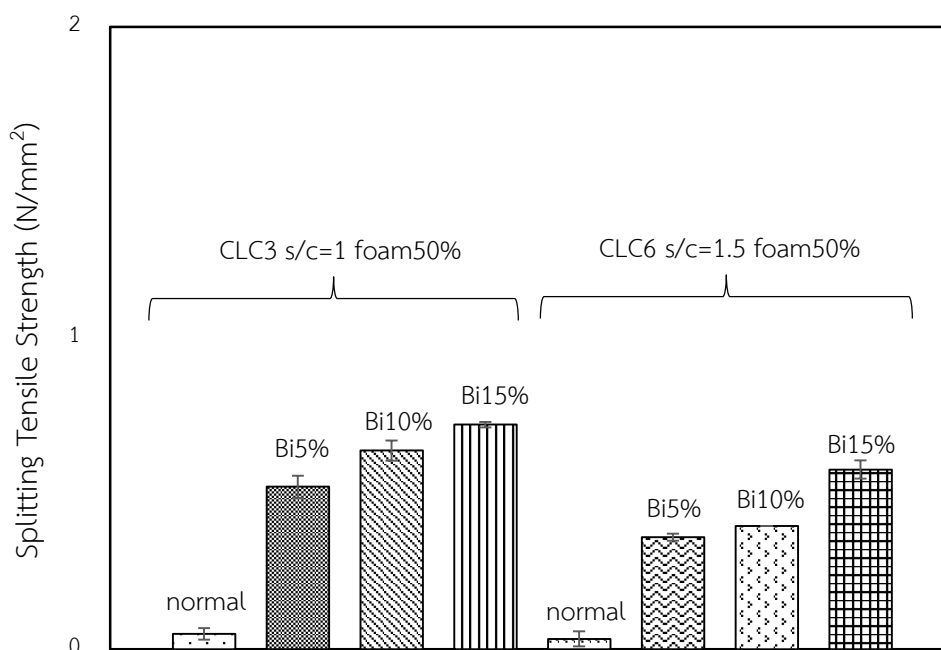
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

4.4.2 ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ตามมาตรฐาน BS1881- Part17 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังดึงระหว่างคอนกรีต CLC ปกติกับคอนกรีตที่ผสมด้วยถ่านชีวภาพ โดยทดสอบกำลังดึงที่อายุตัวอย่างตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป

จากผลการทดสอบ พบว่าการใส่ถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมคอนกรีต CLC ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.05 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่สัดส่วนร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.52 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเพิ่มถ่านชีวภาพเป็นร้อยละ 10 และ 15 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.64 และ 0.72 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

นอกจากนี้พิจารณาจากกลุ่มตัวอย่าง CLC6 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกลุ่มตัวอย่าง CLC3 คือเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้กำลังดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC6 คอนกรีตที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพมีค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.22 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 5 และ 10 ค่ากำลังดึงเพิ่มขึ้นเป็น 0.40 และ 0.58 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



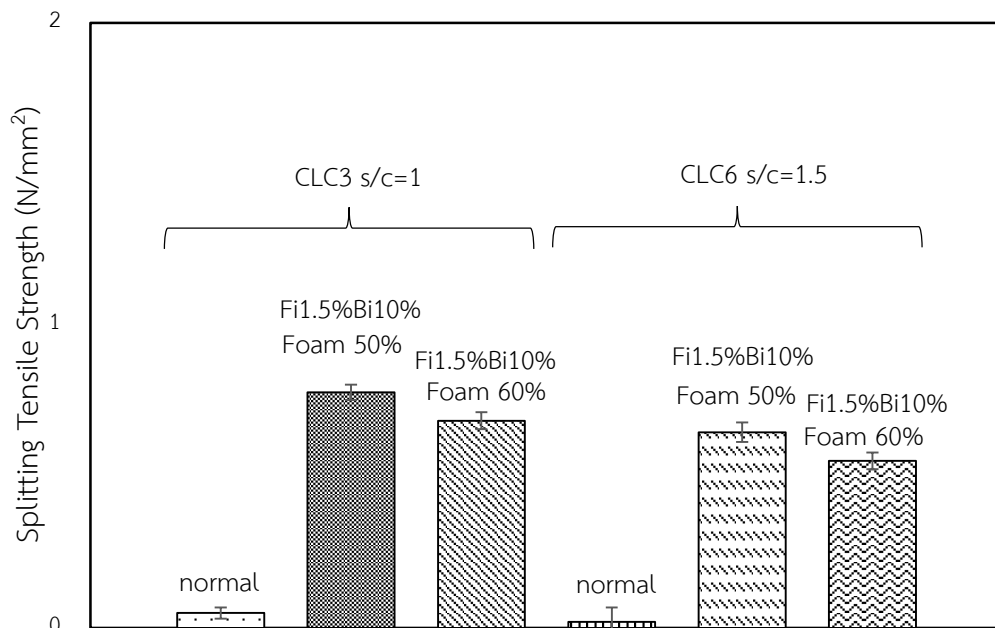
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

4.4.3 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต CLC ตามมาตรฐาน BS1881- Part117 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังดึงระหว่างคอนกรีต CLC ปกติกับคอนกรีตที่ผสมด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ โดยทดสอบกำลังดึงที่อายุตัวอย่างตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป

จากผลการทดสอบ พบว่าการใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมคอนกรีต CLC ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังที่เพิ่มขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC3 คอนกรีตปกติ ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.05 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพที่สัดส่วนร้อยละ 1.5 และ 10 ที่สัดส่วนโพรร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.78 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ที่สัดส่วนโพรร้อยละ 60 ให้ค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.69 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

นอกจากนี้พิจารณาจากตัวอย่าง CLC6 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกลุ่มตัวอย่าง CLC3 คือเมื่อใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสมคอนกรีต CLC ส่งผลให้กำลังดึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เช่น กลุ่มตัวอย่าง CLC6 คอนกรีตแบบปกติมีค่ากำลังดึงเท่ากับ 0.22 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 1.5 และ 10 ที่สัดส่วนโพรร้อยละ 50 ค่ากำลังดึงเพิ่มขึ้นเป็น 0.65 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบกำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

ดังนั้นจากการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์ (s/c) ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลง
- 2) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มสูงขึ้น สาเหตุเกิดจากเส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลงและเป็นช่วยประสานทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและขาดออกจากได้ยากขึ้น
- 3) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น กำลังดึงเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มกำลังอัดที่สูงขึ้น [27] และอาจเกิดจากถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นเส้นตามรูปที่ 4.41 จึงช่วยประสานให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ยากขึ้น
- 4) เนื่องจากคอนกรีต CLC แบบปกติมีลักษณะทั่วไป คือ เปราะและแตกร้าวได้ง่าย การใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสมส่งผลให้กำลังดึงของคอนกรีต CLC สูงขึ้นค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับกำลังดึงของคอนกรีต CLC แบบปกติ

4.5 ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของผนังคอนกรีต CLC

ในการทดสอบการถ่ายเทความร้อนใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิอินฟาเรดเทอร์โมมิเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือโดยการนำอินฟาเรดเทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดระดับความร้อนในห้องทดลองมาวัดอุณหภูมิของน้ำต้มที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของทั้งสองเครื่องมือมาเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือเพื่อใช้ในการปรับแก้อุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่วัดได้ (°C)		ร้อยละความคลาดเคลื่อน
อินฟาเรดเทอร์โมมิเตอร์	เทอร์โมมิเตอร์	
32	32	0
62	62	0
92.2	92	0.22
122.1	122	0.08
ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย		0.075



รูปที่ 4.19 การทดสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือ

การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของผนังคอนกรีต CLC มีหลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์โดยใช้อุณหภูมิผิวของวัสดุเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง 4 ประเภท ได้แก่ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติ ผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน ผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ และผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์ข้อมูลจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุณหภูมิผิวภายนอก T1 และอุณหภูมิผิวภายใน T2 และควบคุมสภาพแวดล้อมเดียวกัน

การทดสอบเริ่มจากการให้พลังงานความร้อนแก่แผ่นผนัง โดยวางแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนห่างจากผนังทดสอบเป็นระยะ 1 เมตร ทดสอบการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่มีการปรับอากาศในเวลากลางวันที่อุณหภูมิห้อง 29.8 ± 1 องศาเซลเซียส ภายในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 18.00 น. และใช้ระยะเวลาในการทดสอบแต่ละผนังที่ 60 นาที ซึ่งถือเป็นระยะเวลาที่พลังงานความร้อนผ่านจากผิวภายนอก T1 มวลสารเข้าสู่ผิวภายใน T2 ของผนังประเภทคอนกรีตมวลเบา

4.5.1 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

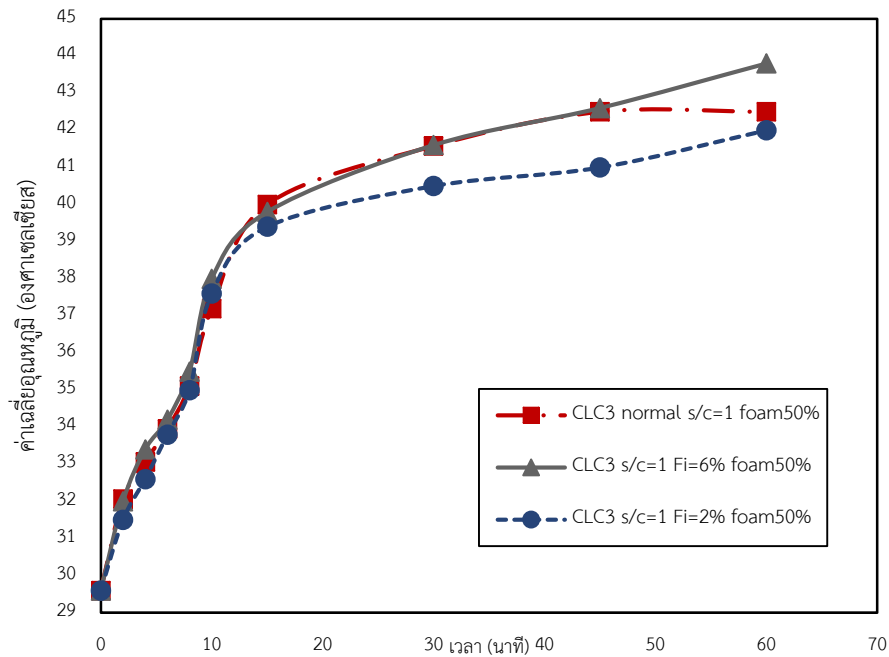
1) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายนอก

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 – 15 นาที อุณหภูมิของผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 6 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มประมาณร้อยละ 3

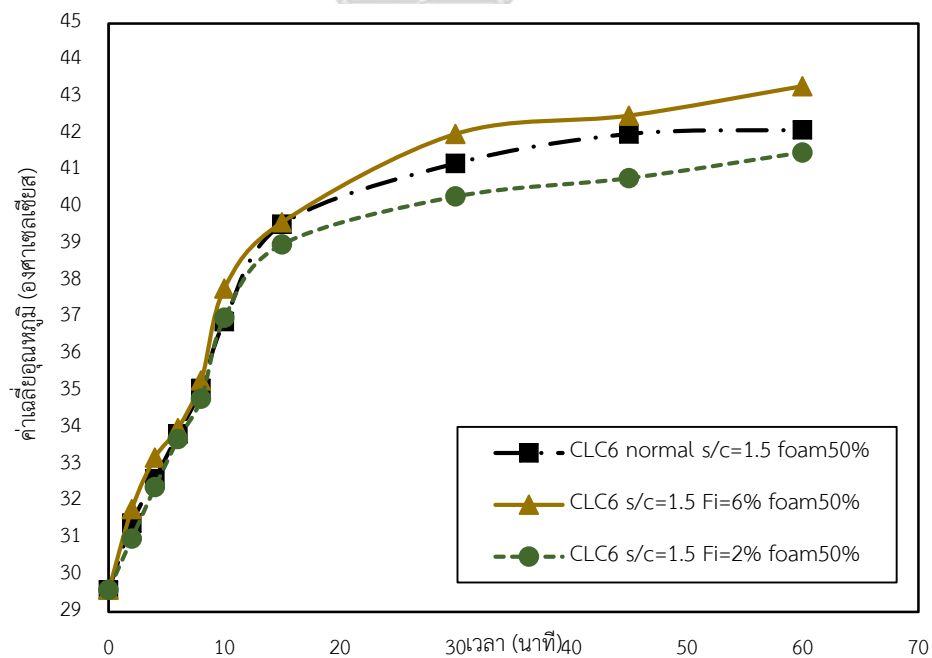
และที่ระยะเวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2 พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าประมาณร้อยละ 1.2

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 6 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มประมาณร้อยละ 2.8

และที่ระยะเวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2 พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำสูงกว่าประมาณร้อยละ 1.4



รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสม
เส้นใยปาล์มน้ำมัน (s/c=1)



รูปที่ 4.21 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสม
เส้นใยปาล์มน้ำมัน (s/c=1.5)

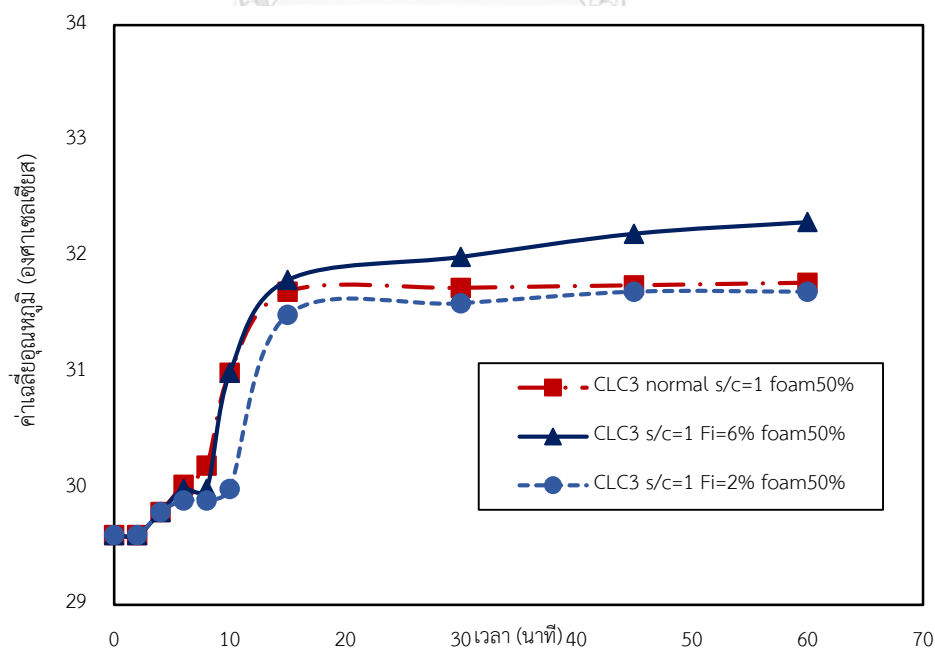
2) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายใน

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 – 15 นาที อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 6 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มประมาณร้อยละ 1.6

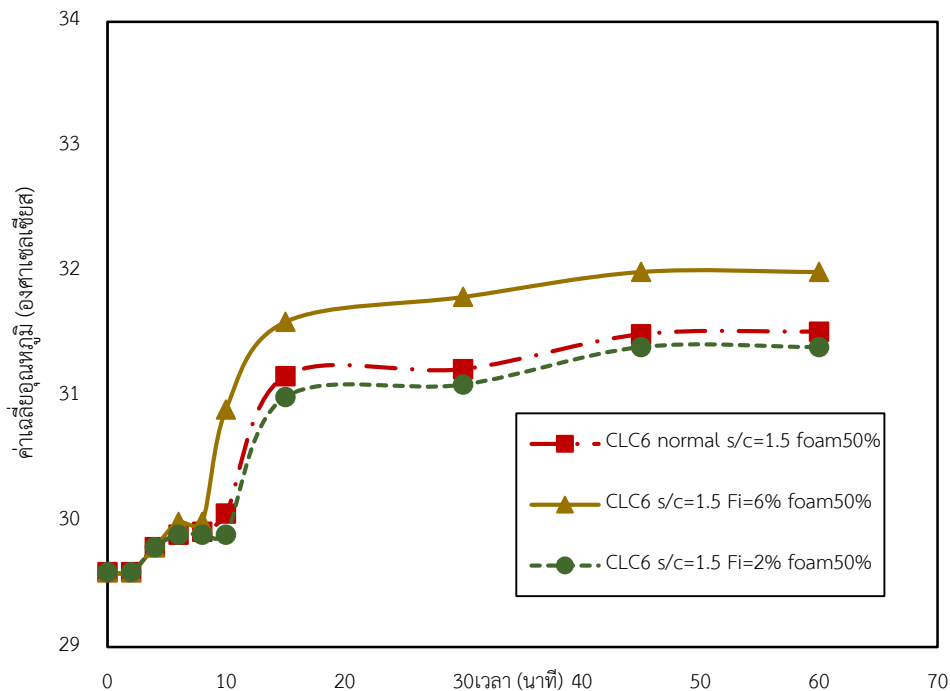
และที่ระยะเวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2 พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าประมาณร้อยละ 0.3

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 6 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มประมาณร้อยละ 2.5

และที่ระยะเวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 2 พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าประมาณร้อยละ 0.3



รูปที่ 4.22 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันของผิวภายนอกผนัง ($s/c=1$)



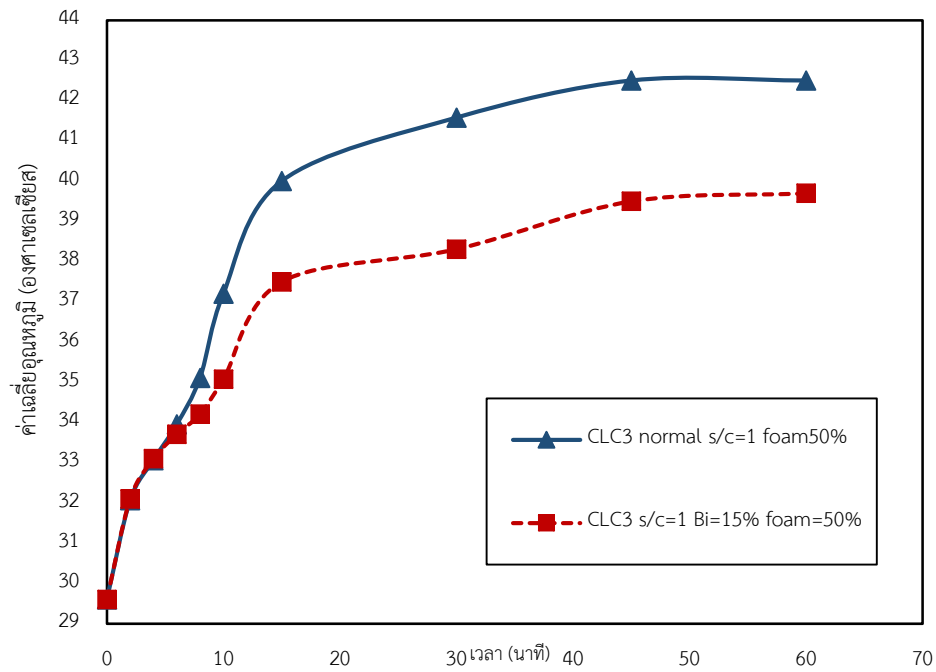
รูปที่ 4.23 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมัน ($s/c=1.5$)

4.5.2 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

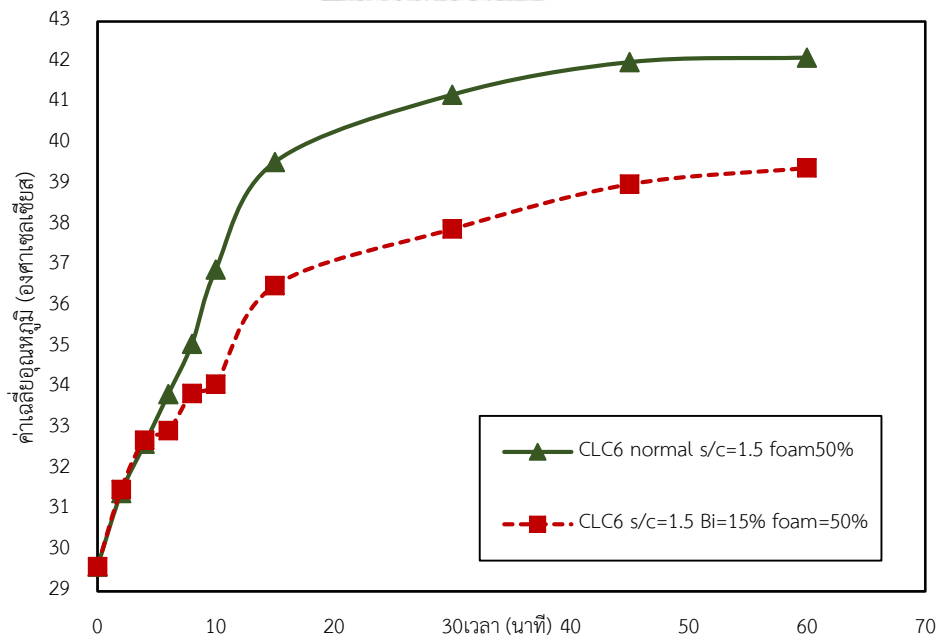
1) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายนอก

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 นาที อุณหภูมิของผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพประมาณร้อยละ 7.1

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพประมาณร้อยละ 6.9



รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสม ถ่านชีวภาพ (s/c=1)

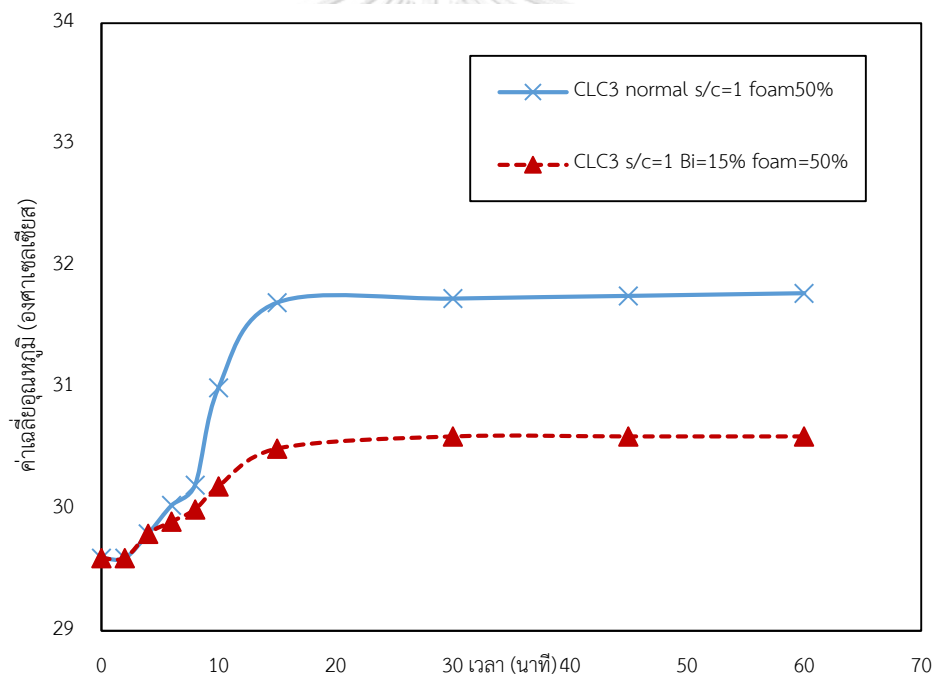


รูปที่ 4.25 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสม ถ่านชีวภาพ (s/c=1.5)

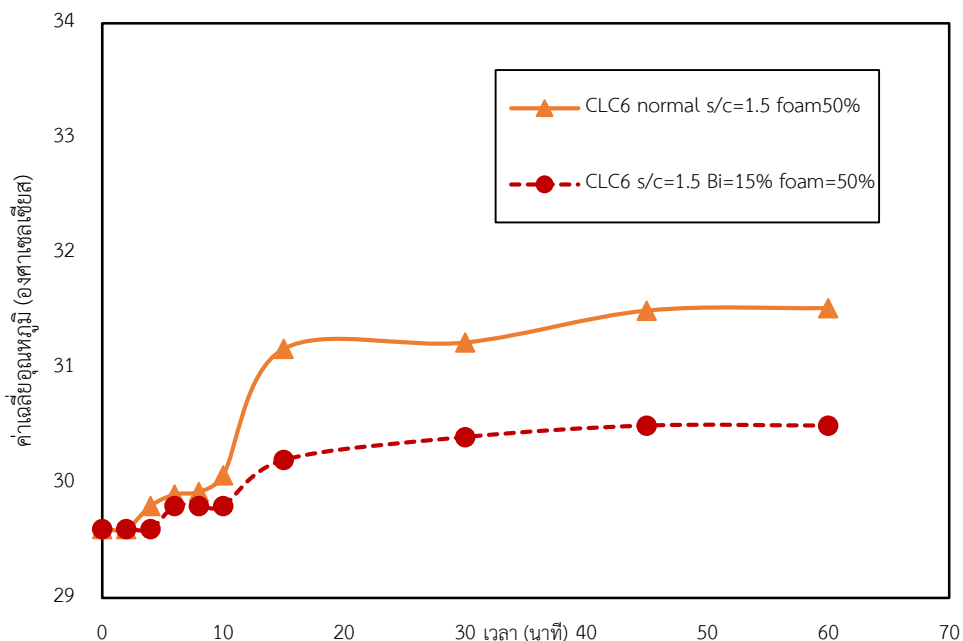
1) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายใน

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 นาที อุณหภูมิของผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพประมาณร้อยละ 3.9

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 โดยผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพประมาณร้อยละ 3.3



รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ ($s/c=1$)



รูปที่ 4.27 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ ($s/c=1.5$)

4.5.3 การถ่ายเทความร้อนและแสดงอุณหภูมิของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

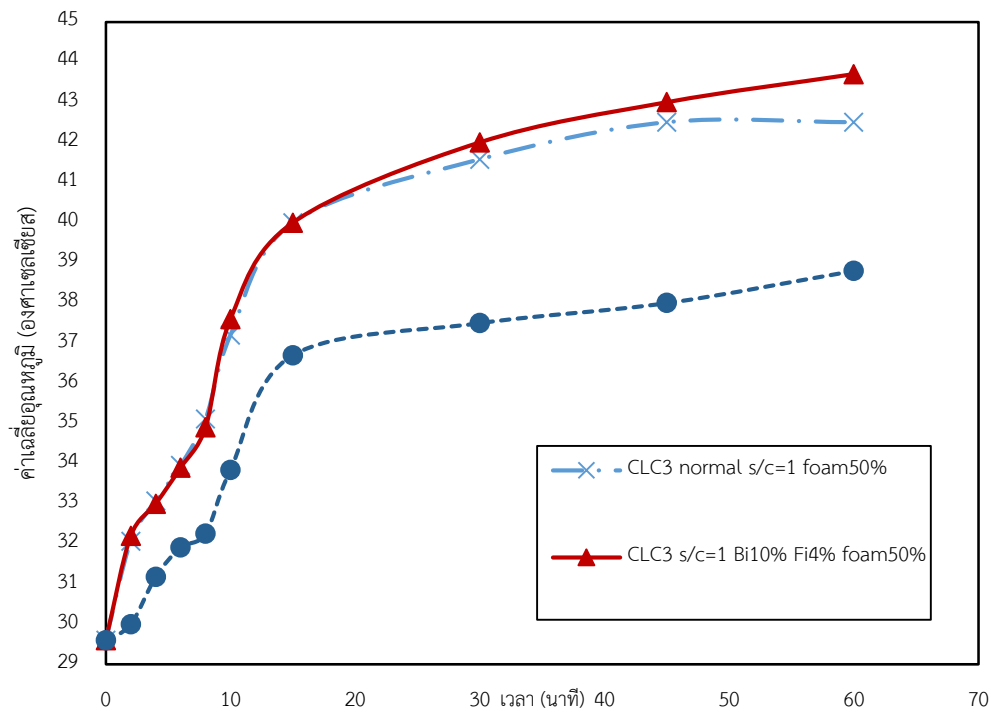
1) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายนอก

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โพร้อยละ 50) พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 นาที อุณหภูมิของผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โพร้อยละ 50) ประมาณร้อยละ 2.82

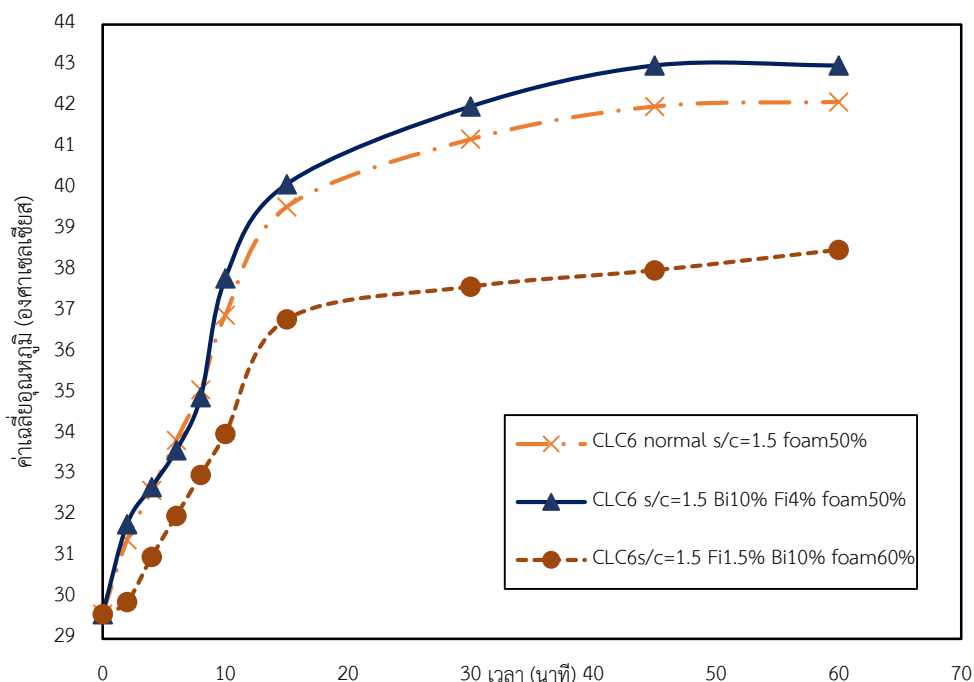
และที่เวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โพร้อยละ 60) พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าประมาณร้อยละ 9.5

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โพร้อยละ 50) ประมาณร้อยละ 2.1

และที่เวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 60) พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าประมาณร้อยละ 9.3



รูปที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1)



รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1.5)

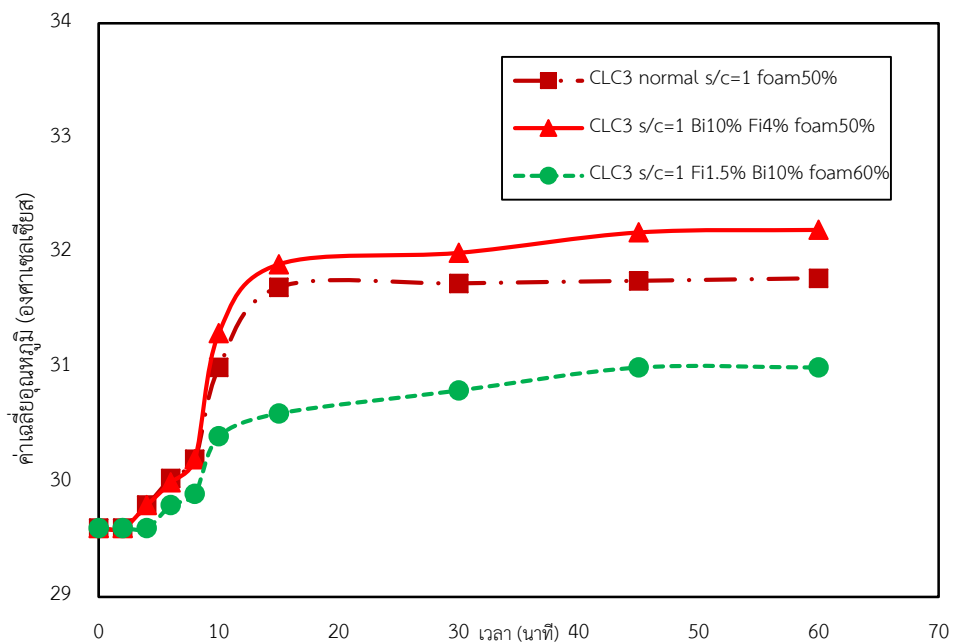
2) ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังภายใน

เมื่อ $s/c=1$ จากผลการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติและคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 50) พบว่าอุณหภูมิของผนังทั้ง 2 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาที่ได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 นาที อุณหภูมิของผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 60 นาที พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 50) ประมาณร้อยละ 1.3

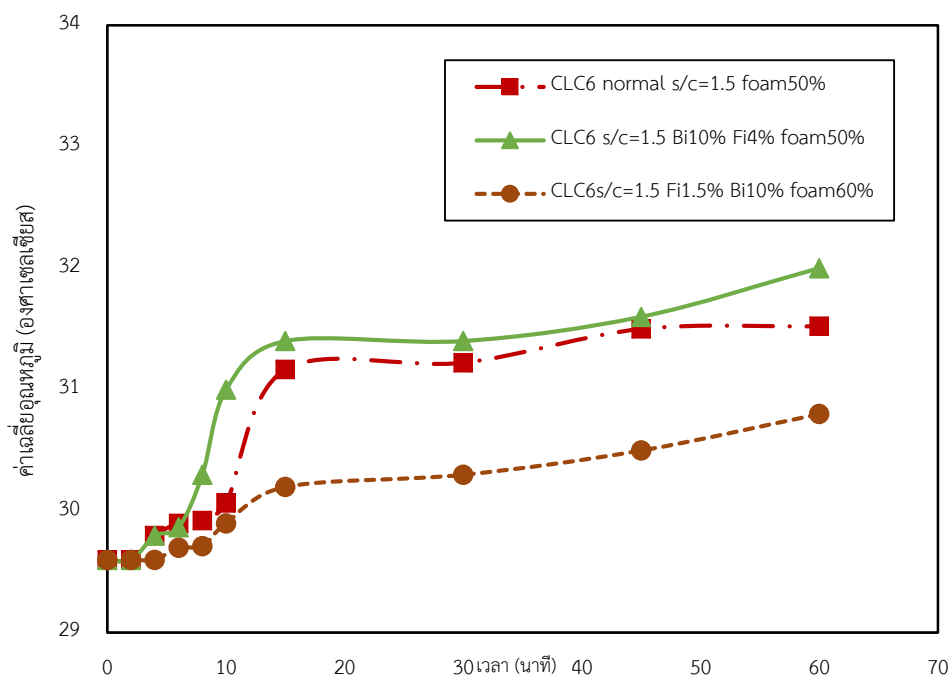
และที่เวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 60) พบว่าผนังคอนกรีตแบบปกติมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าประมาณร้อยละ 2.6

เมื่อ $s/c=1.5$ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่าคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 50) ประมาณร้อยละ 1.6

และที่เวลา 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (โฟมร้อยละ 60) พบว่าผนังคอนกรีต CLC แบบปกติมีแนวโน้มอุณหภูมิผิวภายนอกสูงกว่าประมาณร้อยละ 2.3



รูปที่ 4.30 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1)



รูปที่ 4.31 แสดงอุณหภูมิผิวภายในของผนังคอนกรีต CLC แบบปกติกับผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (s/c=1.5)

ดังนั้นจากผลการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ สาเหตุเกิดจากการใส่เส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่มากขึ้นทำให้ช่องว่างอากาศภายในคอนกรีตลดลงเนื่องจากโฟมเกิดการยุบตัวและหากเนื้อคอนกรีตมีช่องว่างอากาศน้อยจะทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทได้ดีขึ้น
- 2) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่ำลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ สาเหตุเกิดจากโครงสร้างภายในของถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นโพรงอากาศ โดยผิวภายนอกของผนังทำหน้าที่รับความร้อน เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะกระจายและถ่ายเทเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้านใน หากเนื้อคอนกรีตมีความพรุนหรือมีช่องว่างมากั้นระหว่างกลางจะทำให้ความร้อนถ่ายเทได้ยากขึ้น
- 3) การใส่ทั้งเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่ำลง (โฟมร้อยละ 60) เมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

4.6 ผลการทดสอบการคายความร้อนของผนังคอนกรีต CLC

การทดสอบการคายความร้อนของผนังคอนกรีต CLC ทำได้โดยให้ความร้อนแก่ผนังจนครบระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นหยุดให้ความร้อนและปล่อยให้ผนังเย็นตัวตามธรรมชาติ ทำการวัดอุณหภูมิผิวภายนอกของผนังโดยมีหลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์โดยใช้อุณหภูมิผิวภายนอกของผนังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา การทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบพฤติกรรมการคายความร้อนผ่านผนัง 4 ประเภท ได้แก่ ผนังคอนกรีต CLC แบบปกติ ผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน ผนังคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ และผนังคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่าน โดยใช้หลักการ การคายความร้อนของผนังคือความสามารถในการดูดซับความร้อนของผนังและปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ทำให้อุณหภูมิที่ผิวผนังลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิสภาพแวดล้อม

ผลทดสอบการคายความร้อนของผนังคอนกรีต CLC แต่ละประเภท รายละเอียดแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิผิวภายนอกของผนังคอนกรีต CLC ที่ลดลง ณ เวลา ใดๆ

กลุ่มตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหลังจาก ปล่อยผนังทิ้งไว้ 60 นาที (องศาเซลเซียส)	ผลต่างของ อุณหภูมิที่ลดลง (องศาเซลเซียส)
1) CLC3 s/c=1 Foam50%	42.5	34.8	7.7
2) CLC3 s/c=1 Bi15% Foam 50%	39.7	31	8.7
3) CLC3 s/c=1 Bi10% Fi4% Foam50%	43.7	37.5	6.2
4) CLC3 s/c=1 Bi10% Fi1.5% Foam60%	38.8	31	7.8
5) CLC3 s/c=1 Fi6% Foam50%	43.8	37.8	6
6) CLC3 s/c=1 Fi2% Foam50%	42	34.5	7.5

จากตารางที่ 4.2 พบว่าผนังที่มีการคายความร้อนได้ดีที่สุด 3 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่ 2, 4 และ 1 ตามลำดับ โดยผนังคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพ มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 39.7 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 9.2 องศาเซลเซียส ผนังคอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มกับถ่านชีวภาพ (ร้อยละโฟม 60) มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 38.8 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 7.8 องศาเซลเซียส และผนังคอนกรีต CLC แบบปกติ มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 42.5 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 7.7 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิผิวของผนังคอนกรีต CLC ที่ลดลง ณ เวลา ใดๆ

กลุ่มตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหลังจาก ปล่อยผนังทิ้งไว้ 60 นาที (องศาเซลเซียส)	ผลต่างของ อุณหภูมิที่ลดลง (องศาเซลเซียส)
1) CLC6 s/c=1.5 Foam50%	42.1	35	7.1
2) CLC6 s/c=1.5 Bi15% Foam 50%	39.4	31	8.4
3) CLC6 s/c=1.5 Bi10% Fi4% Foam50%	43	36.5	6.5
4) CLC6 s/c=1.5 Bi10% Fi1.5% Foam60%	38.5	31	7.5
5) CLC6 s/c=1.5 Fi6% Foam50%	43.3	37	6.3
6) CLC6 s/c=1.5 Fi2% Foam50%	41.5	35	6.5

จากตารางที่ 4.3 พบว่าผนังที่มีการคายความร้อนได้ดีที่สุด 3 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่ 2, 4 และ 1 ตามลำดับ โดยผนังคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพ มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 39.4 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 8.4 องศาเซลเซียส ผนังคอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มกับถ่านชีวภาพ (ร้อยละโฟม 60) มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 38.5 องศาเซลเซียส หลังจากเวลา

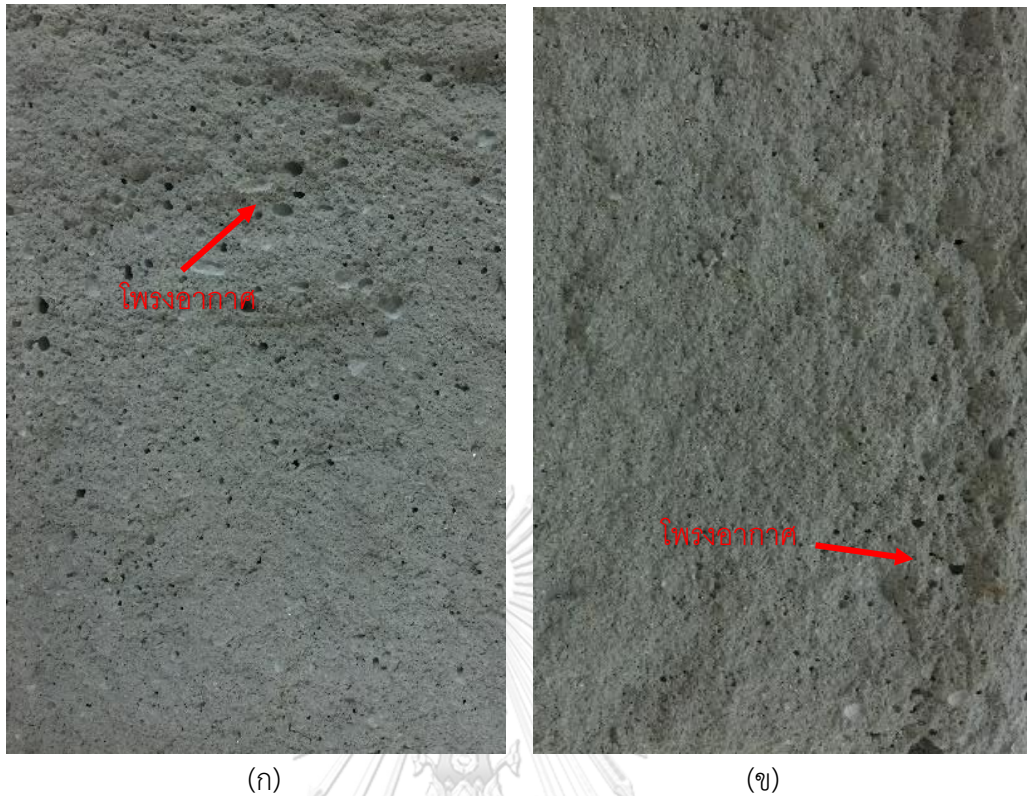
ผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 7.5 องศาเซลเซียส และผนังคอนกรีต CLC แบบปกติ มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 42.1 องศาเซลเซียส หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาที ผนังมีอุณหภูมิลดลง 7.1 องศาเซลเซียส

ดังนั้นจากผลการคายความร้อนของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) เมื่อใส่เส้นใยปาล์มในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีการคายความร้อนได้ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ สาเหตุเกิดจากการใส่เส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างอากาศลดลงเนื่องจากโฟมเกิดการยุบตัว ซึ่งการที่ช่องว่างอากาศลดลงทำให้ผนังสามารถหน่วงเหนี่ยวความร้อนไว้ได้ระยะเวลาานานและคายความร้อนออกมาได้ลดลง
- 2) เมื่อใส่ถ่านชีวภาพในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีความสามารถในการคายความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ สาเหตุอาจเกิดจากถ่านชีวภาพมีลักษณะพรุน มีโพรงกระจายตัวอยู่ข้างใน รวมถึงการใส่ถ่านชีวภาพในส่วนผสมไม่ส่งผลให้โฟมยุบตัวทำให้ ภายในคอนกรีตยังมีช่องว่างอากาศกระจายตัวอยู่ จึงไม่มีตัวกลางในการกักเก็บความร้อน ทำให้สามารถคายความร้อนได้ดี
- 3) การใส่ทั้งเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีต CLC มีความสามารถในการคายความร้อนได้ดีขึ้น (โฟมร้อยละ 60) เมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

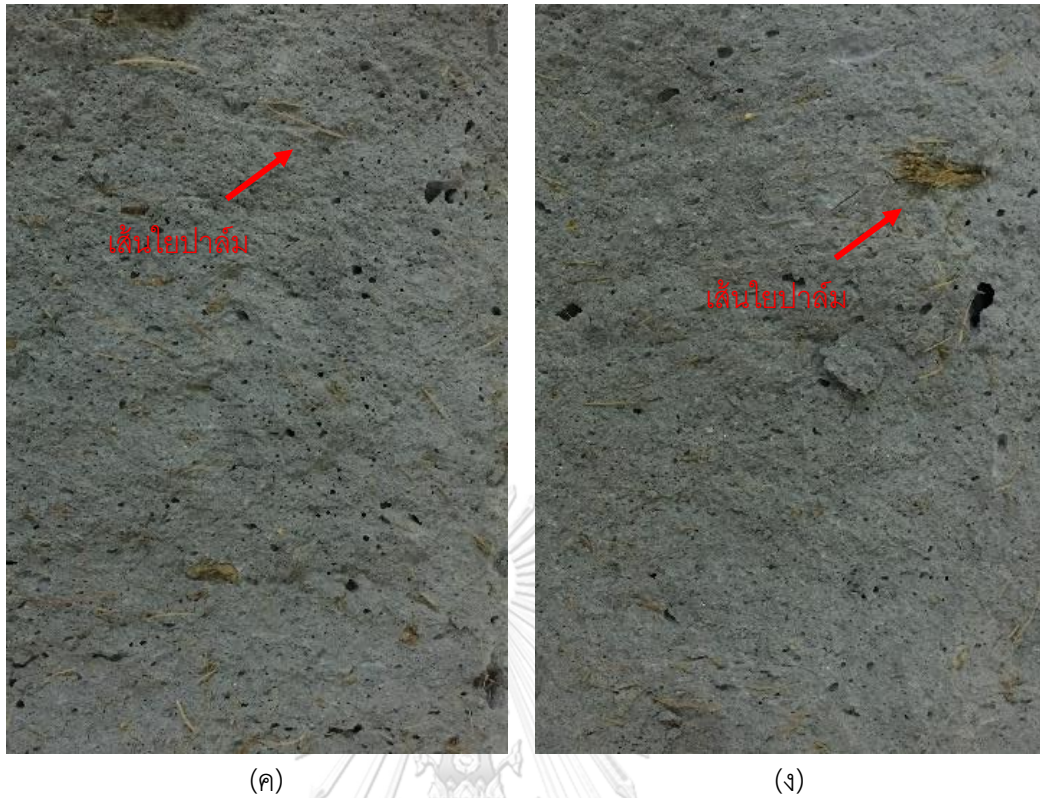
4.7 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC

จากรูปที่ (ก) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโฟมร้อยละ 30 มีการกระจายตัวของช่องว่างอากาศ (Air Void) ที่เกิดจากการผสมสารเพิ่มฟองอากาศลงในมอร์ต้า ช่องว่างอากาศขนาดเล็กรวมตัวกันมีลักษณะคล้ายเนื้อครีมเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูพรุนและมีความแข็งแรงจากรูปที่ 4.14 คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับรูป พบว่า (ข) การเพิ่มสัดส่วนโฟมมากขึ้นทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตเกิดช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นและช่องว่างนี้มีขนาดใหญ่ขึ้น การเพิ่มจำนวนของช่องว่างอากาศภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต CLC โดยตรง



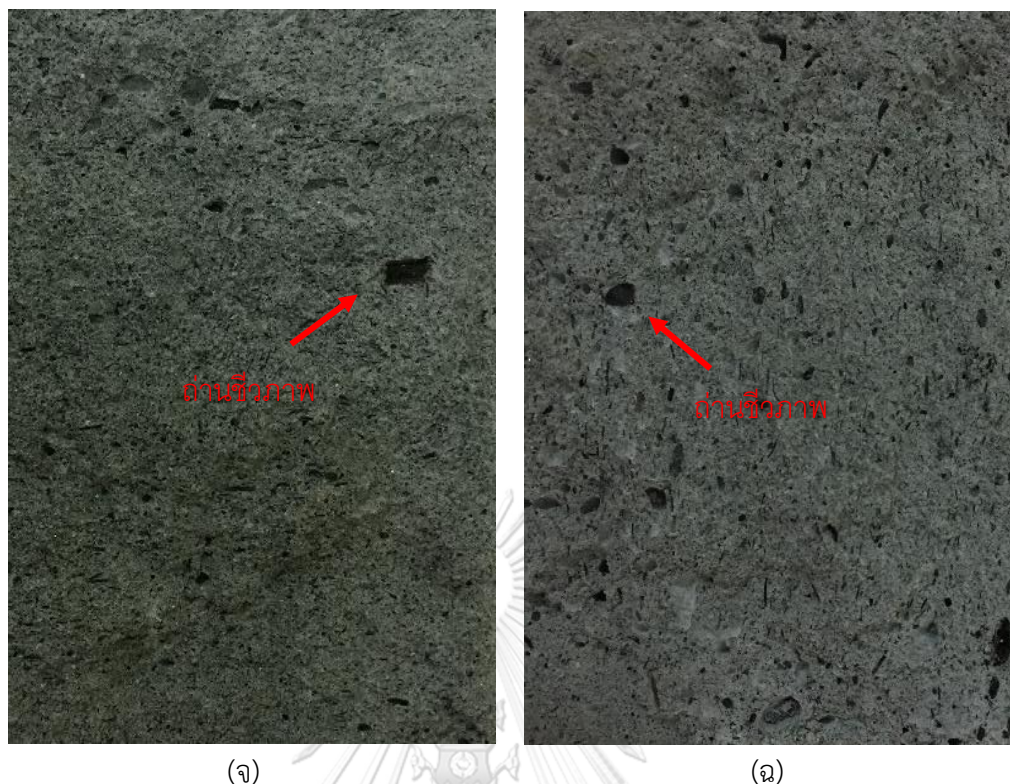
รูปที่ 4.32 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC แบบปกติ

จากรูปที่ (ค) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และรูป (ง) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 ผสมเส้นใยพาล์มน้ำมันร้อยละ 6 พบว่าเมื่อใส่เส้นใยพาล์มน้ำมันผสมลงในคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตมีลักษณะหนาแน่นขึ้นส่งผลให้คอนกรีต CLC มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่เส้นใยพาล์มส่งผลต่อช่องว่างอากาศภายในเนื้อคอนกรีต ส่วนการกระจายตัวของเส้นใยพาล์มทั่วบริเวณเนื้อคอนกรีตมีการกระจายตัวที่ดี



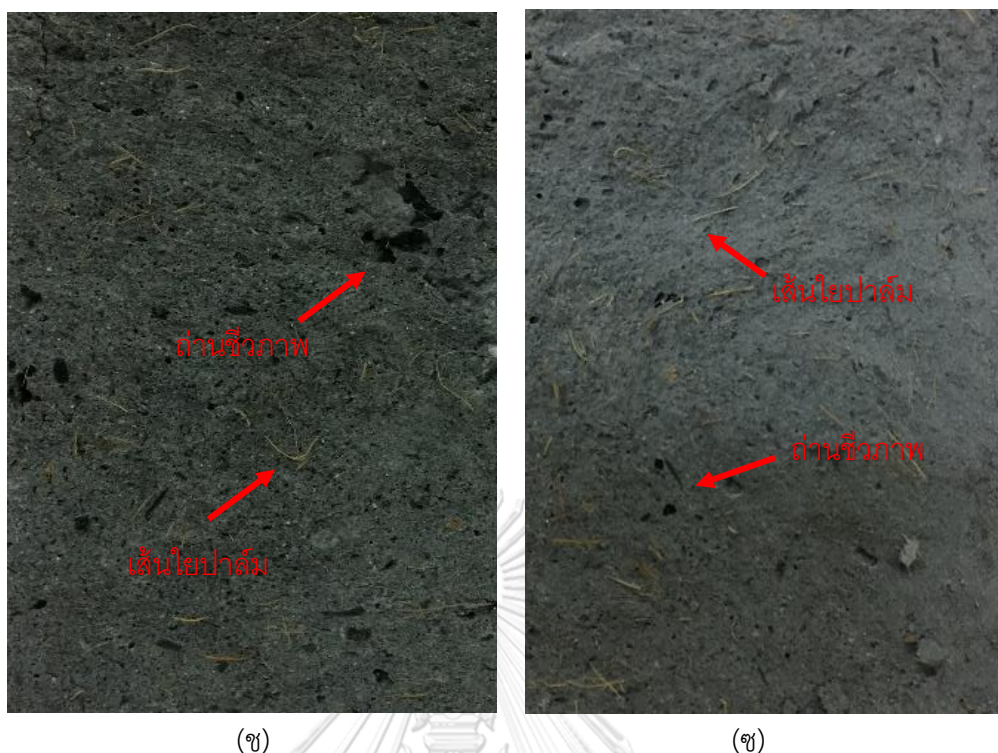
รูปที่ 4.33 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

จากรูป (จ) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโพรยละเอียด 50 ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 10 และรูป (ง) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโพรยละเอียด 50 ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 พบว่า ถ่านชีวภาพในเนื้อคอนกรีตมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับส่วนผสมอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากถ่านชีวภาพมีขนาดเล็กและมีความพรุน คอนกรีต CLC ที่ได้จึงมีสีเข้มขึ้นเล็กน้อยและมีน้ำหนักเบาใกล้เคียงกับคอนกรีต CLC แบบปกติ



รูปที่ 4.34 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

จากรูป (ข) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโพร้มร้อยละ 50 ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 1.5 และถ่านชีวภาพร้อยละ 10 และรูป (ช) คอนกรีต CLC ที่ $s/c = 1.5$ สัดส่วนโพร้มร้อยละ 60 ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 1.5 ถ่านชีวภาพร้อยละ 10 พบว่าการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพกระจายตัวได้ดี คอนกรีต CLC ที่ได้มีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ เมื่อสังเกตตัวอย่างคอนกรีต CLC ที่สัดส่วนโพร้มร้อยละ 60 พบว่าเนื้อภายในคอนกรีต CLC มีฟองอากาศเพิ่มขึ้น

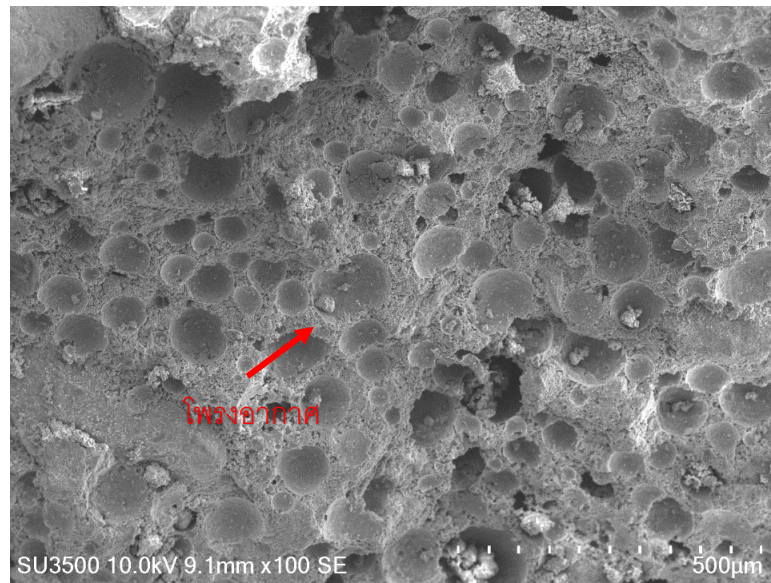


รูปที่ 4.35 ลักษณะทางกายภาพของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านซิงภาพ

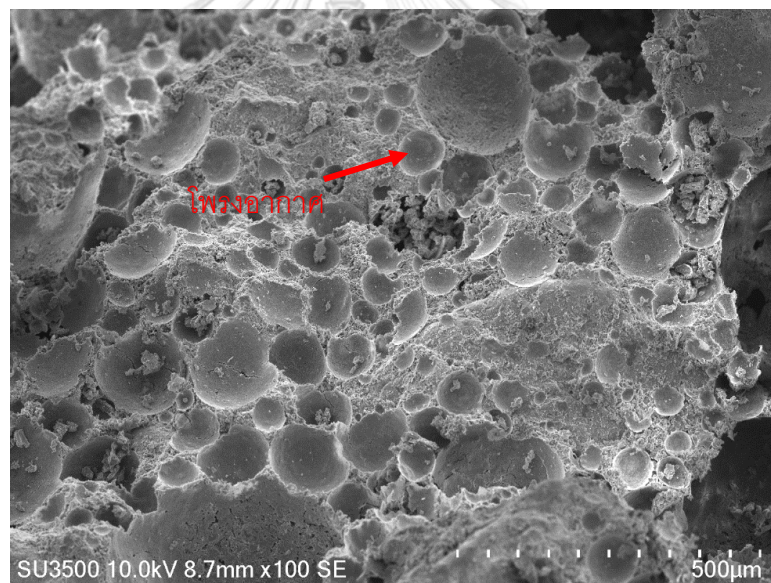
4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM)

4.8.1 คอนกรีต CLC แบบปกติ

รูปที่ 4.36 แสดงโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโพรมวล 30 และรูป 4.37 แสดงโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโพรมวล 50 จากรูปพบว่าโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC มีลักษณะเป็นโพรงอากาศเรียงตัวกันเป็นจำนวนมากทำให้คอนกรีต CLC มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตทั่วไป โพรงอากาศที่สัดส่วนโพรมวล 50 โพรงอากาศกระจายตัวอยู่มากและมีขนาดใหญ่กว่าสัดส่วนโพรมวล 30 โดยโพรงอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต CLC โดยตรง เช่น ความหนาแน่น กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตลดลงเมื่อโพรงอากาศเพิ่มขึ้น



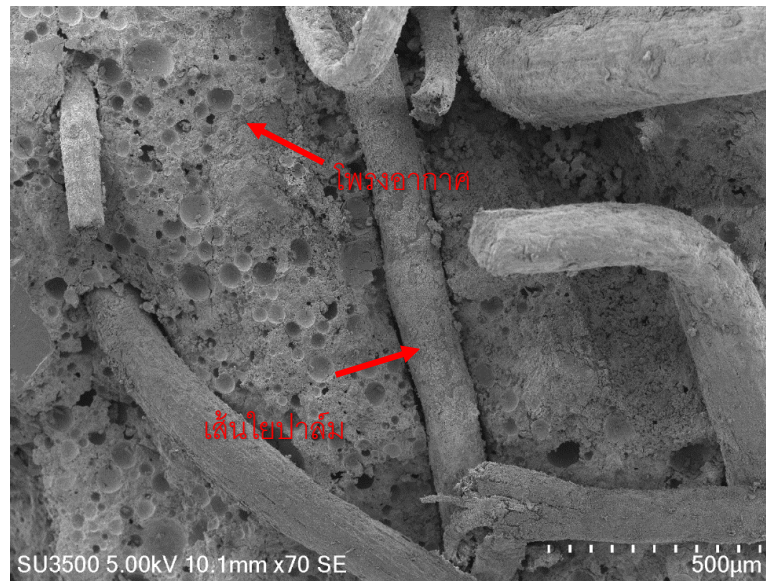
รูปที่ 4.36 คอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 30



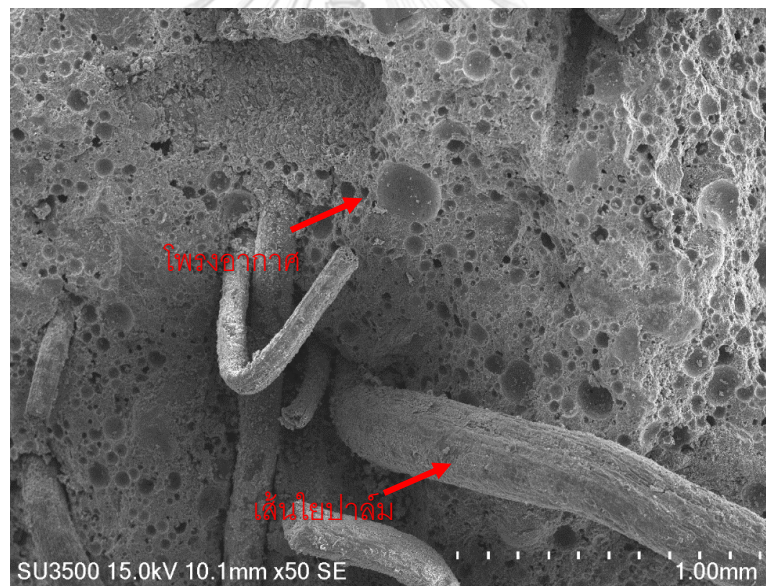
รูปที่ 4.37 คอนกรีต CLC แบบปกติที่สัดส่วนโฟมร้อยละ 50

4.8.2 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.38 และ 4.39 แสดงโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 6 จากรูปพบว่าเมื่อใส่เส้นใยปาล์มเป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้โพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีตมีขนาดและการกระจายตัวที่ลดลง การเพิ่มเส้นใยปาล์มในส่วนผสมส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต CLC โดยตรง เช่น กำลังอัดและกำลังดึงสูงขึ้นเมื่อผสมเส้นใยปาล์มในคอนกรีต CLC



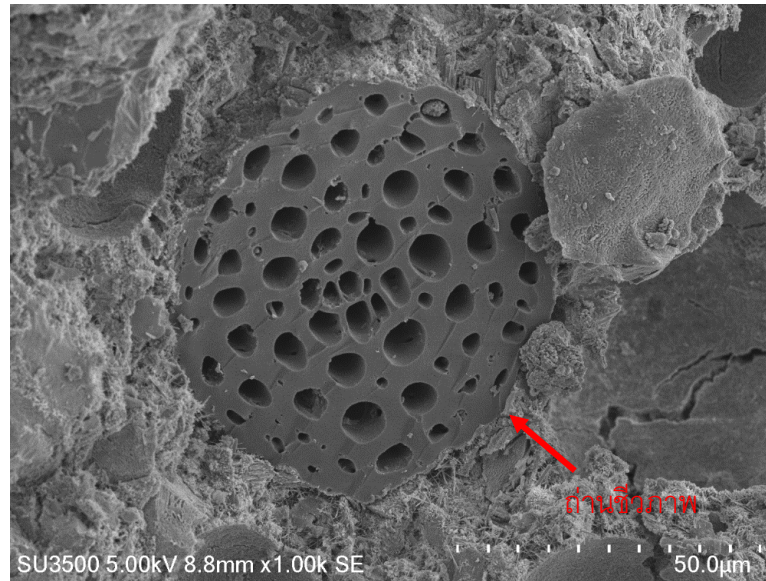
รูปที่ 4.38 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 6 สัดส่วนโฟมร้อยละ 50



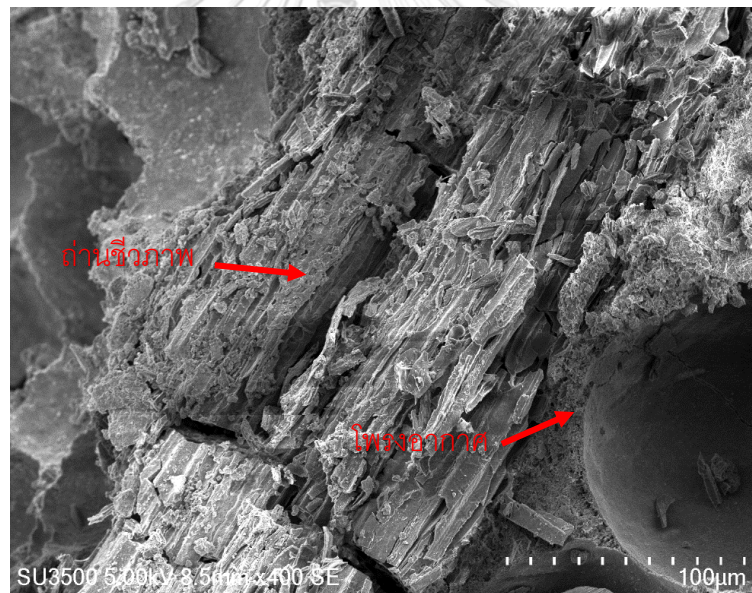
รูปที่ 4.39 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 6 สัดส่วนโฟมร้อยละ 50

4.8.3 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

รูปที่ 4.40 และ 4.41 แสดงโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC สัดส่วนโฟมร้อยละ 50 ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 จากรูปพบว่าถ่านชีวภาพสามารถกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้ดี ถ่านชีวภาพมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นโพรงอากาศ เมื่อนำถ่านชีวภาพมาผสมในคอนกรีต CLC ความหนาแน่นจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



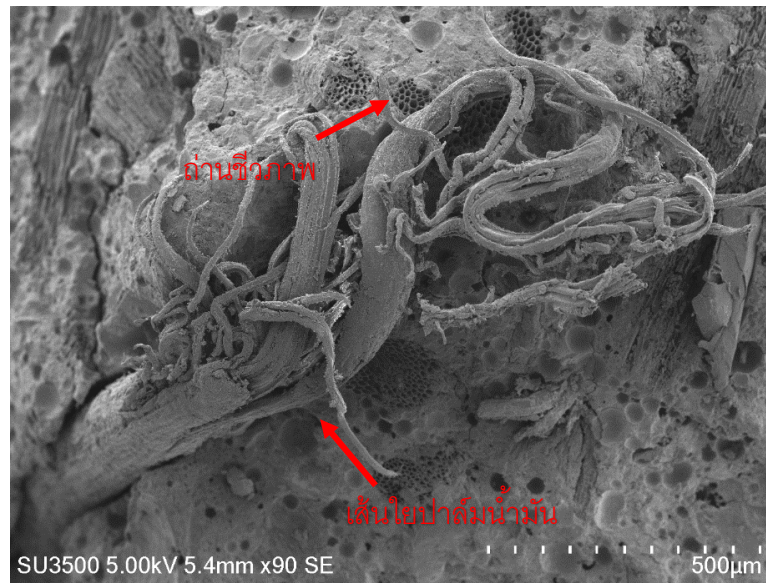
รูปที่ 4.40 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 สัดส่วนโพรร้อยละ 50



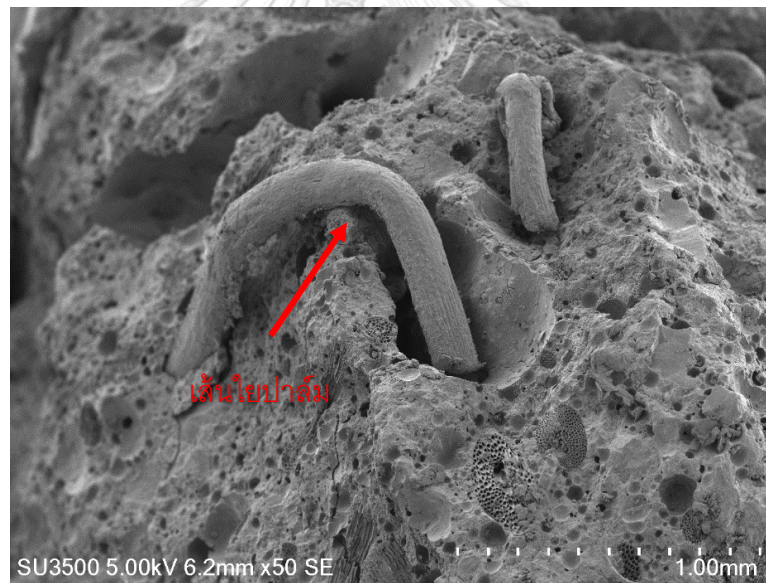
รูปที่ 4.41 คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 สัดส่วนโพรร้อยละ 50

4.8.4 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ

รูปที่ 4.42 และ 4.43 แสดงโครงสร้างภายในของคอนกรีต CLC สัดส่วนโพรร้อยละ 50 ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และถ่านชีวภาพร้อยละ 10 จากรูปพบว่าเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพมีการกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต โดยถ่านชีวภาพจะมีการกระจายตัวในหลายตำแหน่งกว่า เนื่องจากมีขนาดที่เล็กกว่าเส้นใย การผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพส่งผลต่อโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 4.42 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพร้อยละ 4 และ 10 สัดส่วนโฟมร้อยละ 50



รูปที่ 4.43 คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพร้อยละ 4 และ 10 สัดส่วนโฟมร้อยละ 50

4.9 ผลการประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานของคอนกรีต CLC

4.9.1 การประเมินด้านคุณสมบัติคอนกรีต CLC

จากการทดลองนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์มน้ำมัน และถ่านชีวภาพ นำมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต CLC ในด้านต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง กำลังอัด อัตราการดูดซึมน้ำ กำลังดึง การถ่ายเทและการคายความร้อน โดยวัสดุเหลือใช้เหล่านี้สามารถนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดหรือทรายในการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง นอกจากนี้ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เกิดประโยชน์มากขึ้น ในหัวข้อนี้ต้องการประเมินความเป็นไปได้และต้นทุนในการผลิตคอนกรีต CLC การประเมินใช้มาตรฐาน มอก.2601-2556 คอนกรีตบดอัดมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยเลือกประเมินที่คอนกรีตมวลเบาชนิด C12 ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในท้องตลาด คอนกรีตมวลเบาชนิด C12 มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งอยู่ในช่วง 1001-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัดต้องไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและมีอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 23 นอกจากนี้ยังพิจารณาคุณสมบัติกำลังดึงแบบผ่าซีกและการถ่ายเทและการคายความร้อนโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตคอนกรีต CLC ต่อไปในอนาคต จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีต CLC ทุกกลุ่มตัวอย่างสามารถสรุปผลโดยภาพรวมด้านคุณสมบัติของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ และคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพเปรียบเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC แต่ละประเภท

คุณสมบัติของคอนกรีต CLC	คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม	คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ
1) ความหนาแน่น	ความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติค่อนข้างมาก ส่งผลให้น้ำหนักมากทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานหากต้องการใช้งานในรูปแบบวัสดุมวลเบา	ความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีต CLC แบบปกติ ส่งผลให้น้ำหนักค่อนข้างเบา เหมาะสมในการใช้งานในรูปแบบวัสดุมวลเบา	ความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ (ร้อยละโฟม 50) แต่ใกล้เคียงกับคอนกรีต CLC แบบปกติ (ร้อยละโฟม 60)
2) กำลังอัด	กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติค่อนข้างมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทาน	กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ คอนกรีตจึงสามารถรับกำลังอัดได้ดีขึ้น	กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทาน
3) อัตราการดูดซึมน้ำ	อัตราการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ มอก. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ จึงส่งผลดีเนื่องจากหากคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำสูงจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานลดลง ใช้งานยาก อาจจะต้องใช้ปูนก่อฉาบชนิดพิเศษและอาจเกิดเชื้อราในคอนกรีตได้ง่ายเมื่อมีความชื้น	อัตราการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ มอก. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ จึงส่งผลดีเนื่องจากหากคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำสูงจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานลดลง	อัตราการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ มอก. ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ จึงส่งผลดีเนื่องจากหากคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำสูงจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานลดลง จึงสามารถลดการเกิดเชื้อราในคอนกรีตได้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติคอนกรีต CLC แบบปกติกับคอนกรีต CLC แต่ละประเภท (ต่อ)

คุณสมบัติของคอนกรีต CLC	คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม	คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ	คอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ
4) กำลังดึง	กำลังดึงสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ ค่อนข้างมาก ส่งผลให้คอนกรีตสามารถทนการแตกร้าวได้ดีซึ่งเป็นผลดีเวลาขนส่งเพราะการขนส่งคอนกรีตเป็นจำนวนมากอาจเกิดแรงกระแทกระหว่างการขนส่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้	กำลังดึงสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ ส่งผลให้คอนกรีตสามารถทนการแตกร้าวได้ดีซึ่งเป็นผลดีเวลาขนส่งเพราะการขนส่งคอนกรีตเป็นจำนวนมากอาจเกิดแรงกระแทกระหว่างการขนส่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้	กำลังดึงสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ ส่งผลให้คอนกรีตสามารถทนการแตกร้าวได้ดีซึ่งเป็นผลดีเวลาขนส่งเพราะการขนส่งคอนกรีตเป็นจำนวนมากอาจเกิดแรงกระแทกระหว่างการขนส่งทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้
5) คุณสมบัติด้านความร้อน	มีการถ่ายเทความร้อนดีกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติทำให้ความเป็นฉนวนกันความร้อนลดลงและคายความร้อนค่อนข้างต่ำทำให้อุณหภูมิผนังมีค่าสูงกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ	มีการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติทำให้ความเป็นฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้นและคายความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ	มีการถ่ายเทความร้อนได้ต่ำกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ (โฟมร้อยละ 60) และคายความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ
6) อุณหภูมิผิวภายในผนัง	อุณหภูมิผิวภายในใกล้เคียงกับคอนกรีต CLC แบบปกติ	อุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ 1-1.2 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิผิวภายในต่ำกว่าคอนกรีต CLC แบบปกติ 0.7-0.8 องศาเซลเซียส

4.9.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์นั้น วิเคราะห์โดยใช้สมมติฐานว่ามีโรงงานรองรับสำหรับการผลิตแล้ว โดยเปรียบเทียบต้นทุนของวัสดุต่อหน่วยการผลิตเท่านั้น เนื่องจากกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาในระบบเซลลูล่ามีกระบวนการและขั้นตอนการผลิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบเดิม การผลิตคอนกรีตมวลเบาในระบบเซลลูล่าจะนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยปาล์ม น้ำมัน และถ่านชีวภาพมาเป็นวัสดุทดแทนในกระบวนการผลิต ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นมีรายละเอียดดังนี้

1. การประเมินเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเบื้องต้น

ในการประเมินเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตจะนำเสนอในรูปแบบผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบาในระบบเซลลูล่าที่มีขายตามท้องตลาด ขนาด 20x30x7.5 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็น 4 ชนิด อิฐมวลเบาในระบบเซลลูล่าแบบปกติ อิฐมวลเบาในระบบเซลลูล่าผสมเส้นใยปาล์ม น้ำมัน อิฐมวลเบาในระบบเซลลูล่าผสมเส้นใยถ่านชีวภาพ และอิฐมวลเบาในระบบเซลลูล่าผสมเส้นใยปาล์ม น้ำมัน และถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเบื้องต้น (บาทต่อก้อน)

ผลิตภัณฑ์	ส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
อิฐมวลเบาในระบบ เซลลูล่าแบบ ปกติ	ปูนซีเมนต์	1.63 กิโลกรัม	2.50	4.08
	ทราย	2.44 กิโลกรัม	1.60	3.90
	น้ำ	0.81 กิโลกรัม	0.01	0.008
	น้ำยาสร้างโฟม ชนิดสังเคราะห์	6.25 มิลลิลิตร	0.15	0.94
ราคาต่อก้อน				8.93
อิฐมวลเบาในระบบ เซลลูล่าผสมเส้น ใยปาล์ม น้ำมัน	ปูนซีเมนต์	1.63 กิโลกรัม	2.50	4.08
	ทราย	2.39 กิโลกรัม	1.60	3.82
	น้ำ	0.81 กิโลกรัม	0.01	0.008
	น้ำยาสร้างโฟม ชนิดสังเคราะห์	6.25 มิลลิลิตร	0.15	0.94
	เส้นใยปาล์ม ร้อยละ 2	0.05 กิโลกรัม	-	-
ราคาต่อก้อน				8.85

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเบื้องต้น (บาทต่อก้อน)

ผลิตภัณฑ์	ส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
อิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมถ่าน ชีวภาพ	ปูนซีเมนต์	1.63 กิโลกรัม	2.50	4.08
	ทราย	2.07 กิโลกรัม	1.60	3.31
	น้ำ	0.81 กิโลกรัม	0.01	0.008
	น้ำยาสร้างโฟม	6.25 มิลลิลิตร	0.15	0.94
	ชนิดสังเคราะห์			
	ถ่านชีวภาพ ร้อยละ 15	0.37 กิโลกรัม	-	-
ราคาต่อก้อน				8.34
อิฐมวลเบาแบบ เซลลูโลสผสมเส้นใย ปาล์มและถ่าน ชีวภาพ (โฟมร้อยละ 60)	ปูนซีเมนต์	1.31 กิโลกรัม	2.50	3.28
	ทราย	1.68 กิโลกรัม	1.60	2.69
	น้ำ	0.65 กิโลกรัม	0.01	0.008
	น้ำยาสร้างโฟม	6.25 มิลลิลิตร	0.15	0.94
	ชนิดสังเคราะห์			
	เส้นใยปาล์ม	0.04 กิโลกรัม	-	-
	ร้อยละ 1.5			
	ถ่านชีวภาพ ร้อยละ 10	0.24 กิโลกรัม	-	-
ราคาต่อก้อน				6.92

* หมายเหตุ 1) ราคาดังกล่าวยังไม่รวมค่าขนส่งเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพไปยังสถานที่ผลิต

2) ราคาดังกล่าวได้มาจากการซื้อวัสดุแบบปลีก หากมีการสั่งซื้อในระดับอุตสาหกรรม
ราคาส่วนผสมอาจมีการเปลี่ยนแปลง

2. การวิเคราะห์ด้านต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นด้านเทคโนโลยี

ในการประเมินด้านเทคโนโลยีจะพิจารณาจากกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาตามโรงงานทั่วไป
รายละเอียดของต้นทุนและประโยชน์ต่างๆจากเทคโนโลยีมีดังนี้

1) ต้นทุนเทคโนโลยีการผลิต แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1.1 ต้นทุนคงที่ คือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการลงทุนในปีแรก ได้แก่ ค่าพื้นที่
สิ่งปลูกสร้าง เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนด้านเทคโนโลยี

ลำดับ	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	รายละเอียด	ราคา (บาท)
1	อาคารสำหรับเก็บวัสดุ	พื้นที่ 100 ตารางเมตร (ตารางเมตรละ 10,000 บาท)	1,000,000
2	ไซโลเก็บวัสดุภายใน โรงงานก่อนกระบวนการ ผลิต	ขนาดความจุ 50 ตัน รวมค่าติดตั้ง	400,000
รวม			1,400,000

หมายเหตุ ราคาในตารางเป็นราคาประมาณการเท่านั้น

2) ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายดำเนินการ เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดำเนินงานเป็นประจำ ได้แก่ ค่าวัสดุ ค่าพลังงานที่ใช้ ค่าแรงงาน ค่าขนส่งวัสดุ ค่าซ่อมบำรุง เป็นต้น มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ด้านวัสดุ เส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ ไม่มีค่าใช้จ่าย

2.2 ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่ง ค่าขนส่งเส้นใยพาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ ใช้อัตราราคาน้ำมันเชื้อเพลิงโซล่า 20.50 บาทต่อลิตร ใช้ตารางค่าขนส่งวัสดุโดยรถบรรทุก 6 ล้อ (กรณีน้ำหนักรวมไม่เกิน 25 ตัน ภูมิภาคเป็นผิวนราบ การจราจรแบบปกติ ระยะทางขนส่งมากกว่า 200 กิโลเมตร จึงใช้อัตราค่าขนส่งเท่ากับ 2.14 บาทต่อกิโลเมตรต่อตัน โดยมีระยะทางขนส่งจากการประมาณการ 650 กิโลเมตร (ระยะทางจากสุราษฎร์ธานีถึงสระบุรี)

2.3 ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์และอื่นๆ ประมาณ 3,000 บาท

2.4 ค่าซ่อมบำรุงไซโลและอุปกรณ์ รอบละ 5,000 บาท ปีละ 2 ครั้ง รวมเป็นเงิน 10,000 ต่อปี

2.5 ค่าพลังงานไฟฟ้า (หน่วยละ 3 บาท) รวมเป็นเงิน 500 บาทต่อวัน

ตารางที่ 4.9 ตารางค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

ลำดับ	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ	รายละเอียด	ปริมาณที่ใช้ต่อปี	มูลค่า (บาทต่อปี)
1.	เส้นใยปาล์ม (ในกรณีอิฐมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์ม)	ใช้ปริมาณ 0.05 กิโลกรัมต่อก้อน สมมติกำลังผลิตในโรงงาน 30,000 ก้อนต่อปี	1,500 กิโลกรัม	-
2.	ถ่านชีวภาพ (ในกรณีอิฐมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมถ่านชีวภาพ)	ใช้ปริมาณ 0.37 กิโลกรัมต่อก้อน สมมติกำลังผลิตในโรงงาน 30,000 ก้อนต่อปี	11,100 กิโลกรัม	-
3.	เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ (ในกรณีอิฐมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ)	ใช้ปริมาณ 0.04 และ 0.24 กิโลกรัมต่อก้อน สมมติกำลังผลิตในโรงงาน 30,000 ก้อนต่อปี	8,400 กิโลกรัม	-
4.	ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งเส้นใยปาล์ม	ค่าขนส่งระยะทางประมาณ 650 กิโลเมตร		2,087
5.	ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งถ่านชีวภาพ	ค่าขนส่งระยะทางประมาณ 650 กิโลเมตร		15,440
6.	ค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ	ค่าขนส่งระยะทางประมาณ 650 กิโลเมตร		11,684
7.	ค่าภาชนะและอุปกรณ์อื่นๆ			3,000
8.	ค่าซ่อมบำรุงต่างๆ		2 ครั้ง	10,000
9.	ค่าพลังงานไฟฟ้า			182,500

ตารางที่ 4.10 รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาระบบเซลลูโลสต่อปี

ผลิตภัณฑ์	ราคาต้นทุน ต่อก่อน (บาท)	ราคาตาม กำลังผลิต 30,000 ก้อน ต่อปี (บาท)	ต้นทุน ดำเนินการต่อ ปี (บาท)	รวมค่าใช้จ่ายต่อปี (บาท)
1) อิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสแบบปกติ	8.93	267,900	195,500	463,400
2) อิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์ม น้ำมัน	8.85	265,500	197,587	463,087
3) อิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมถ่านชีวภาพ	8.34	250,200	210,940	461,140
4) อิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์ม และถ่านชีวภาพ	6.92	207,600	207,184	414,784

ดังนั้นการเปรียบเทียบต้นทุนในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาระบบเซลลูโลสโดยทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างอิฐมวลเบาแบบปกติกับอิฐมวลเบาที่ผสมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้รูปแบบการผลิตแบบเดียวกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบต้นทุนจึงนำเฉพาะต้นทุนการดำเนินการมาเปรียบเทียบ สามารถสรุปผลได้ดังตาราง 4.10 จากตารางพบว่าต้นทุนดำเนินการของอิฐมวลเบาแบบปกติเท่ากับ 463,400 บาท ต่อปี ต้นทุนดำเนินการของอิฐมวลเบาแบบผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันเท่ากับ 463,087 บาท ต่อปี แสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณร้อยละ 0.07 และเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาแบบผสมถ่านชีวภาพมีต้นทุนดำเนินการเท่ากับ 461,140 บาท แสดงให้เห็นว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณร้อยละ 0.5 และเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาแบบผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพมีต้นทุนดำเนินการเท่ากับ 414,784 บาท ซึ่งสามารถลดต้นทุนดำเนินการได้ประมาณร้อยละ 11.72

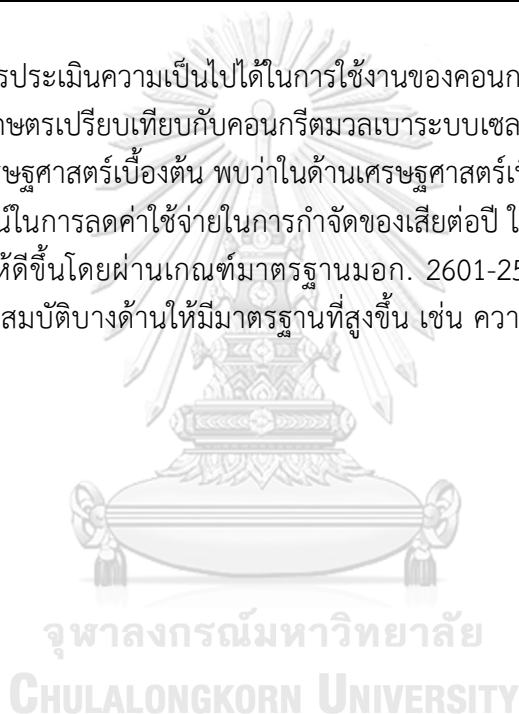
3. ด้านประโยชน์

- 1) ได้อิฐมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผสมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีราคาต้นทุนในการผลิตต่อก้อนต่ำกว่าอิฐมวลเบาแบบปกติ
- 2) สามารถประหยัดค่ากำจัดของเสีย 3,500 บาทต่อตัน รายละเอียดแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.27 ผลประโยชน์ที่ได้จากการลดค่ากำจัดของเสีย

รายการ	รายละเอียด	มูลค่า (บาท)
1) ในกรณีอิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์ม	ใช้ปริมาณเส้นใย 1,500 กิโลกรัมต่อปี	5,250
2) ในกรณีอิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมถ่านชีวภาพ	ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพ 11,100 กิโลกรัมต่อปี	38,850
3) ในกรณีอิฐมวลเบาระบบ เซลลูโลสผสมเส้นใยปาล์มและ ถ่านชีวภาพ	ใช้ปริมาณเส้นใยปาล์มและถ่าน ชีวภาพ 8,400 กิโลกรัมต่อปี	29,400

ดังนั้นจากการประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผสมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาแบบปกติ โดยประเมินด้านคุณสมบัติและด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่าในด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้และมีประโยชน์ในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียต่อปี ในด้านคุณสมบัติสามารถพัฒนาคุณสมบัติส่วนใหญ่ให้ดีขึ้นโดยผ่านเกณฑ์มาตรฐานมอก. 2601-2556 แต่ในการนำไปใช้งานจริงอาจจะต้องพัฒนาคุณสมบัติบางด้านให้มีมาตรฐานที่สูงขึ้น เช่น ความหนาแน่น และคุณสมบัติด้านความร้อน เป็นต้น



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete : CLC) โดยนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยปาล์มน้ำมันและถ่านชีวภาพ มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสโดยแทนที่ทรายละเอียด จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ได้แก่ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง กำลังอัด อัตราการดูดซึมน้ำ กำลังดึง และการถ่ายเทความร้อน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง ปริมาณเส้นใยปาล์มส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติความหนาแน่น เนื่องจากเส้นใยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ทำให้เมื่อใส่เส้นใยลงในส่วนผสม เส้นใยทำให้เกิดการยุบตัวของโฟมภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่างอากาศลดลง ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น ในส่วนของถ่านชีวภาพส่งผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เนื่องจากถ่านชีวภาพมีอนุภาคขนาดเล็กและมีโครงสร้างภายในเป็นโพรงอากาศจึงไม่ส่งผลต่อการยุบตัวของโฟม คอนกรีตที่ได้จึงมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

2) กำลังอัด ปริมาณเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต CLC ได้ โดยเส้นใยปาล์มมีผลต่อการลดลงของช่องว่างภายในคอนกรีต ในส่วนของถ่านชีวภาพสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างซีเมนต์กับทรายและสามารถกักเก็บน้ำไว้ในตัวเอง และค่อยๆคายน้ำให้กับคอนกรีต (Internal Curing) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้คอนกรีตมีกระบวนการบ่มที่ดีและช่วยพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต [26]

3) อัตราการดูดซึมน้ำ อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพในส่วนผสม เส้นใยปาล์มเป็นตัวลดช่องว่างอากาศภายในคอนกรีต ในส่วนของถ่านชีวภาพเป็นตัวเติมเต็มช่องว่างระหว่างซีเมนต์กับทรายส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ลดลง

4) กำลังดึงแบบผ่าซีก การใส่เส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต CLC ให้สูงขึ้น และมีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการแตกร้าวของคอนกรีตได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

5) การถ่ายเทความร้อน การใส่ถ่านชีวภาพผสมในคอนกรีต CLC ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ แสดงว่าคอนกรีตมีความเป็นฉนวนมากขึ้น โดยถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นฉนวน มีโครงสร้างภายในเป็นโพรงอากาศ โพรงจึงเป็นตัวสกัดกั้น

ความร้อนไม่ให้เกิดการถ่ายเทได้ง่าย ในส่วนของการใส่เส้นใยปาล์มในส่วนผสมส่งผลให้คอนกรีตมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ เส้นใยปาล์มทำให้ช่องว่างอากาศในคอนกรีตลดลง ดังนั้นจึงมีความเป็นฉนวนลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

6) การคายความร้อน การใส่ถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมในคอนกรีต CLC มีส่วนช่วยพัฒนาคุณสมบัติด้านการคายความร้อนได้ดีขึ้น ในส่วนของเส้นใยปาล์มเมื่อใส่เป็นส่วนผสมของคอนกรีต CLC ส่งผลให้การคายความร้อนลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ

7) การประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งาน จากผลการทดสอบพบว่ามิกซ์ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. และมีคุณสมบัติด้านความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีต CLC แบบปกติ ได้แก่ คอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพร้อยละ 15 (โฟมร้อยละ 50) และคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มร้อยละ 1.5 และถ่านชีวภาพร้อยละ 10 (โฟมร้อยละ 60)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยในครั้งนี้ได้กำหนดอัตราส่วนที่ใช้ตลอดการทดสอบคือ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนระหว่างทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1 และ 1.5 สัดส่วนของเส้นใยปาล์มเท่ากับร้อยละ 2 4 และ 6 สัดส่วนถ่านชีวภาพเท่ากับร้อยละ 5 10 และ 15 ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่หลากหลายยิ่งขึ้น ควรเพิ่มสัดส่วนในส่วนผสมคอนกรีต เช่น สัดส่วนเส้นใยปาล์มเป็นร้อยละ 0.5 หรือ 1 ปรับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.4 หรือ 0.6 หรือสัดส่วนโฟมอาจปรับให้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 และ 65 โดยเฉพาะกรณีที่มีการใส่เส้นใยปาล์มในส่วนผสมซึ่งมีความหนาแน่นสูง การเพิ่มปริมาณโฟมให้เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้คุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตดีขึ้น เช่น ความหนาแน่น คุณสมบัติด้านความร้อน เป็นต้น

2) งานวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก ซึ่งมีข้อจำกัดในการผลิตตัวอย่าง เช่น การผลิตโฟมเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต CLC ได้ความหนาแน่นของโฟมประมาณ 35-40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ในการผลิตจริงควรใช้เครื่องผลิตโฟมที่มีแรงดันสูงและสามารถผลิตโฟมที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีต CLC ดีขึ้น

3) ผลการทดสอบที่ได้เป็นผลการทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในการใช้งานจริงควรมีการทดสอบกับเครื่องจักรในโรงงานเพิ่มเติม

4) นอกเหนือจากคอนกรีต CLC ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปต่อยอดเป็นวัสดุก่อสร้างประเภทอื่นๆได้ เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป เนื่องจากแผ่นพื้นมีความหนาแน่นค่อนข้างน้อย การใส่เส้นใยปาล์มสามารถช่วยลดการแตกร้าวของแผ่นพื้นได้ เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานและสำนักงานสถิติแห่งชาติ, แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าและการใช้เครื่องปรับอากาศในประเทศ. 2543-2558. p. 8-9.
2. Gritsada Sua-iam, N.M., *Use of Palm Fiber as a Reinforced Fiber for improving the bending strength of Lightweight Foam Concrete*. Research and Development Journal 2016. **27**.
3. Mohd.Ismail H. Fathi, M.S., and Manaf, N. B., *Study of Lightweight Concrete Behaviour* Research and Development Journal, 2004. **25**.
4. Amina Djoudi, *Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete*. Jour of Adhesion Science and Technology, 2014. **28**(20).
5. อัญชิสสา สันติจิตโต, อิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความร้อนของกระเบื้องหลังคา. 2554, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
6. Mahyuddin Ramli, E.T.D., *Effect of Palm Fiber on the Mechanical Properties of Lightweight Concrete Crushed Brick*. 2010, University Sains Malaysia.
7. Initiative, I.B. *Biochar Classification Tool*. 2018.
8. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, คอนกรีตเทคโนโลยี. 2539, cursaladprawa.
9. คำภี จิตรชัยภูมิ, การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยซีโอไลต์ธรรมชาติและนาโนซิลิกา. 2556, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
10. กฤษณ์ กิ่งไก่อ, คุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์. 2553, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
11. KIS Innovate. *Cellular Lightweight Concrete with Pre Foamed Foam*. 2018.
12. D.K.Panesar, *Thermal Conductivity of Foam concrete*. International Journal of Civil and Engineering, 2013. **15**.
13. สำเร็จ รักซ้อน, กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์. 2557, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
14. อุทัย ศุภิสกุลวงศ์, การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังวัสดุก่อของอาคารที่พักอาศัยในเขตร้อนชื้น, in คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ฉบับที่ 4562, in คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ. 2556: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. p. 9-18.

16. Joseph Khedari, *New Low Cost Insulation Particelboards from Mixture of Durian Peel and Coconut Coir*. 2004, Elsevier Publishing Company.
17. Kriker Debicki, B.K., *Mechanical Properties of Date Palm Fiber and Concrete Reinforced with Date Palm Fiber in hot dry Climate*. 2005, Elsevier Publishing Company.
18. บวร อิศรางกูรและคณะ, การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผสมเส้นใยผักตบชวา. วิศวกรรมลาดกระบัง, 2555. **29**: p. 43-48.
19. นิรุช สุขสมเขตร, คุณสมบัติทางกลคอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 2544. **24**.
20. ศักดิ์สิทธิ์ ศรีแสงและคณะ, การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสมคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราบายและเส้นใยมะพร้าว. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา, 2550. **1**: p. 77-87.
21. นันทชัย ชูศิลป์และคณะ, สมบัติเชิงกลของซีเมนต์เฟลสต์เสริมเส้นใยตาลโตนด. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต, 2556. **1**: p. 89-99.
22. Hanizam Awang, M.H.A., *Durability Properties of Foamed Concrete with Fiber Inclusion*. International Journal of Civil and Engineering, 2014. **8**.
23. Souradeep Gupta, H.W.K., Chin Yang Low, , *Use of Biochar as Carbon Sequestering Additive in Cement Mortar*. 2017, National University of Singapore.
24. Morita H, *The Effect of Humid Controlling Charcoal on the Environmental antigenicallergy*. Japanese Society for Dermatoallergy, 2005. **5**.
25. Hans Peter Schmidt, *Biochar as Building Material for Optimal Indoor Climate*. Journal for ecology of Ithaka Institute, 2013.
26. Hyun Do Yun, W.C.C., Jae Yeon Lee,, *Mechanical Properties of Motar Containing Biochar From Pyrolysis*. Korea Institue for Structural Maintenance Inspection, 2012. **16(3)**: p. 67-74.
27. American Concrete Institute ACI Committee 318, *Building Code Requirement for Structual Concrete and Commentary*. 2014. p. 107.



ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.1 ค่าการกระจายขนาดอนุภาค

ตารางที่ ก.1.1 ค่าการกระจายขนาดอนุภาคของทรายละเอียด

ขนาดช่องเปิด (มิลลิเมตร)	น้ำหนักค้าง (กรัม)	ร้อยละค้าง (%)	ร้อยละค้างสะสม (%)
4.75	0	0	0
2.36	0	0	0
1.18	0	0	0
0.60	501	19.91	19.91
0.30	813	32.31	52.23
0.15	891	35.41	87.64
-	311	12.36	100
ผลรวม	2516	100	259.78

ตารางที่ ก.1.2 ค่าการกระจายขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพ

ขนาดช่องเปิด (มิลลิเมตร)	น้ำหนักค้าง (กรัม)	ร้อยละค้าง (%)	ร้อยละค้างสะสม (%)
4.75	0	0	0
2.36	0	0	0
1.18	16.90	4.56	4.56
0.60	179.60	48.48	53.04
0.30	99.10	26.75	79.78
0.15	50.40	13.60	93.39
-	24.50	6.61	100
ผลรวม	370.50	100	330.77

ภาคผนวก ก.2 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC

ตารางที่ ก.2.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC แบบปกติ

กลุ่มตัวอย่าง	น้ำหนัก (กิโลกรัม)				ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
CLC1	4.7313	4.7322	4.8413	4.7683	1412.82
CLC2	4.2278	4.0267	4.2881	4.1809	1238.78
CLC3	3.5293	3.3023	3.3421	3.3912	1004.81
CLC4	5.2212	5.3271	5.2997	5.2827	1565.23
CLC5	4.4425	4.3908	4.1241	4.3191	1279.74
CLC6	3.5050	3.6100	3.6020	3.5723	1058.47

ตารางที่ ก.2.2 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม

กลุ่มตัวอย่าง	น้ำหนัก (กิโลกรัม)				ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
CLC3 Fi2%	4.0062	4.0230	4.0114	4.0135	1189.20
CLC3 Fi4%	4.5190	4.1250	4.2286	4.2909	1271.37
CLC3 Fi6%	4.5210	4.4770	4.1320	4.3767	1296.79
CLC6 Fi2%	4.1100	4.0204	4.0030	4.0445	1198.36
CLC6 Fi4%	4.5489	4.5213	4.2070	4.4257	1311.33
CLC6 Fi6%	4.6026	4.5623	4.3940	4.5196	1339.15

ตารางที่ ก.2.3 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	น้ำหนัก (กิโลกรัม)				ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
CLC3 Bi5%	3.4128	3.5905	3.4048	3.4694	1027.85
CLC3 Bi10%	3.6645	3.5313	3.3101	3.5020	1037.62
CLC3 Bi15%	3.5140	3.4214	3.6336	3.5230	1043.85
CLC6 Bi5%	3.4697	3.5520	3.5795	3.5337	1047.03
CLC6 Bi10%	3.6973	3.4330	3.6238	3.5847	1062.13
CLC6 Bi15%	3.7344	3.7520	3.5795	3.6886	1092.93

ตารางที่ ก.2.4 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	น้ำหนัก (กิโลกรัม)				ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
CLC3 Fi1.5%Bi10% Foam50%	4.3220	4.3651	4.3066	4.3312	1283.33
CLC3 Fi1.5%Bi10% Foam60%	3.6089	3.6056	3.6020	3.6055	1068.30
CLC6 Fi1.5%Bi10% Foam50%	4.3330	4.3375	4.3660	4.3455	1287.56
CLC6 Fi1.5%Bi10% Foam60%	3.6189	3.7856	3.7220	3.7088	1098.91

ภาคผนวก ก.3 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต CLC

ตารางที่ ก.3.1 ค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC1	138.63	137.64	138.62	138.30
CLC2	62.44	62.89	63.33	62.89
CLC3	25.56	25.11	25.11	25.26
CLC4	105.78	102.22	102.22	103.41
CLC5	53.78	58.22	53.78	55.26
CLC6	26.22	27.56	25.78	26.52

ตารางที่ ก.3.2 ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC แบบปกติ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC1	147.11	134.67	151.11	144.30
CLC2	79.11	89.78	72.00	80.30
CLC3	40.00	37.78	42.67	40.15
CLC4	111.11	113.78	126.67	117.19
CLC5	81.78	60.00	82.22	74.67
CLC6	35.56	42.22	42.22	40.00

ตารางที่ ก.3.3 ค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม

กลุ่ม ตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi2%	56.89	55.56	53.33	55.26
CLC3 Fi4%	73.78	76.44	82.67	77.63
CLC3 Fi6%	92.00	110.67	114.22	105.63
CLC6 Fi2%	48.89	55.11	47.11	50.37
CLC6 Fi4%	81.78	72.00	70.22	74.67
CLC6 Fi6%	80.44	87.11	84.44	84.00

ตารางที่ ก.3.4 ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม

กลุ่ม ตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi2%	59.11	58.22	56.89	58.07
CLC3 Fi4%	80.89	89.78	91.11	87.26
CLC3 Fi6%	106.22	115.56	123.11	114.96
CLC6 Fi2%	53.33	61.78	57.78	57.63
CLC6 Fi4%	91.56	81.33	80.00	84.30
CLC6 Fi6%	80.44	97.78	99.56	92.59

ตารางที่ ก.3.5 ค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Bi5%	32.44	30.67	30.67	31.26
CLC3 Bi10%	44.89	41.78	36.89	41.19
CLC3 Bi15%	47.11	44.00	58.22	49.78
CLC6 Bi5%	30.67	31.11	31.11	30.96
CLC6 Bi10%	35.56	36.44	36.89	36.30
CLC6 Bi15%	42.67	43.56	37.78	41.34

ตารางที่ ก.3.6 ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Bi5%	42.22	53.33	43.11	46.22
CLC3 Bi10%	56.89	60.89	40.89	52.89
CLC3 Bi15%	54.22	54.67	58.22	55.70
CLC6 Bi5%	44.89	44.44	40.50	43.28
CLC6 Bi10%	43.11	47.56	47.11	45.93
CLC6 Bi15%	44.44	55.56	53.33	51.11

ตารางที่ ก.3.7 ค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi1.5%Bi10% foam50%	53.33	54.67	56.89	54.96
CLC3 Fi1.5%Bi10% foam60%	48.89	45.78	48.00	47.56
CLC6 Fi1.5%Bi10% foam50%	47.11	49.78	52.44	49.78
CLC6 Fi1.5%Bi10% foam60%	48.44	45.78	45.33	46.52

ตารางที่ ก.3.8 ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi1.5%Bi10% foam50%	56.89	57.78	58.22	57.63
CLC3 Fi1.5%Bi10% foam60%	52.44	52.00	52.44	52.30
CLC6 Fi1.5%Bi10% foam50%	52.89	53.33	53.33	53.19
CLC6 Fi1.5%Bi10% foam60%	53.33	48.89	50.22	50.81

ภาคผนวก ก.4 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC

ตารางที่ ก.4.1 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม

กลุ่มตัวอย่าง	อัตราการดูดซึมน้ำ (%)			ค่าเฉลี่ยอัตราการดูดซึมน้ำ (%)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi2%	13.96	13.30	13.51	13.59
CLC3 Fi4%	10.49	13.51	12.64	12.16
CLC3 Fi6%	10.17	11.13	13.53	11.55
CLC6 Fi2%	12.24	14.40	14.88	13.83
CLC6 Fi4%	10.18	13.49	13.97	12.51
CLC6 Fi6%	12.70	11.18	11.93	11.94

ตารางที่ ก.4.2 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	อัตราการดูดซึมน้ำ (%)			ค่าเฉลี่ยอัตราการดูดซึมน้ำ (%)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Bi5%	15.63	15.55	14.90	15.35
CLC3 Bi10%	14.43	14.75	14.86	14.67
CLC3 Bi15%	14.66	14.78	12.29	13.93
CLC6 Bi5%	15.01	16.68	16.33	16.01
CLC6 Bi10%	13.41	16.17	15.05	14.48
CLC6 Bi15%	14.48	15.04	13.49	14.33

ตารางที่ ก.4.3 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	อัตราการดูดซึมน้ำ (%)			ค่าเฉลี่ยอัตราการดูดซึมน้ำ (%)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	
CLC3 Fi1.5% Bi10% foam50%	11.80	10.17	11.11	11.03
CLC3 F1.5% Bi10% foam60%	13.00	13.41	14.94	13.78
CLC6 Fi1.5% Bi10% foam50%	11.04	11.70	11.50	11.41
CLC6 Fi1.5% Bi10% foam60%	13.87	13.61	12.96	13.48

ภาคผนวก ก.5 ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกที่ 45 วันขึ้นไปของคอนกรีต CLC

ตารางที่ ก.5.1 ค่ากำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์ม

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)		ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
CLC3 normal	0.03	0.07	0.05
CLC3 Fi2%	0.85	0.90	0.88
CLC3 Fi4%	1.00	1.02	1.01
CLC3 Fi6%	1.08	1.10	1.09
CLC6 normal	0.23	0.27	0.25
CLC6 Fi2%	0.72	0.65	0.69
CLC6 Fi4%	0.70	0.75	0.73
CLC6 Fi6%	1.02	1.10	1.06

ตารางที่ ก.5.2 ค่ากำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)		ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
CLC3 Bi5%	0.56	0.49	0.52
CLC3 Bi10%	0.67	0.61	0.64
CLC3 Bi15%	0.73	0.71	0.72
CLC6 Bi5%	0.35	0.37	0.36
CLC6 Bi10%	0.40	0.40	0.40
CLC6 Bi15%	0.59	0.56	0.58

ตารางที่ ก.5.3 ค่ากำลังดึงคอนกรีต CLC ผสมเส้นใยปาล์มและถ่านชีวภาพ

กลุ่มตัวอย่าง	กำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)		ค่าเฉลี่ยกำลังดึง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	
CLC3 Fi1.5% Bi10% foam50%	0.80	0.75	0.78
CLC3 Fi1.5% Bi10% foam60%	0.71	0.66	0.69
CLC6 Fi1.5% Bi10% foam50%	0.67	0.63	0.65
CLC6 Fi1.5% Bi10% foam60%	0.54	0.53	0.54

ภาคผนวก ก.๖ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวภายนอกของคอนกรีต CLC
ตารางที่ ก.6.1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวภายนอกของคอนกรีต CLC

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวภายนอก (องศาเซลเซียส)										
	0	2	4	6	8	10	15	30	45	60	
CLC3 normal s/c=1 foam50%	29.6	32.1	33.1	34.0	35.1	37.2	40.0	41.6	42.5	42.5	
CLC6 normal s/c=1.5 foam50%	29.6	31.4	32.6	33.8	35.1	36.9	39.5	41.2	42.0	42.1	
CLC3 s/c=1 Bi=15% foam=50%	29.6	32.1	33.1	33.7	34.2	35.1	37.5	38.3	39.5	39.7	
CLC6 s/c=1.5 Bi=15% foam=50%	29.6	31.5	32.7	32.9	33.9	34.1	36.5	37.9	39.0	39.4	
CLC3 s/c=1 Bi10% Fi4% foam50%	29.6	32.2	33.0	33.9	34.9	37.6	40.0	42.0	43.0	43.7	
CLC6 s/c=1.5 Bi10% Fi4% foam50%	29.6	31.8	32.7	33.6	34.9	37.8	40.1	42.0	43.0	43.0	
CLC3 s/c=1 Fi1.5% Bi10% foam60%	29.6	30.0	31.2	31.9	32.3	33.8	36.7	37.5	38.0	38.8	
CLC6s/c=1.5 Fi1.5% Bi10% foam60%	29.6	29.9	31.0	32.0	33.0	34.0	36.8	37.6	38.0	38.5	
CLC3 s/c=1 Fi=6% foam50%	29.6	32.0	33.4	34.2	35.5	38.0	39.8	41.6	42.6	43.8	
CLC6 s/c=1.5 Fi=6% foam50%	29.6	31.8	33.2	34.0	35.3	37.8	39.6	42.0	42.5	43.3	
CLC3 s/c=1 Fi=2% foam50%	29.6	31.5	32.6	33.8	35.0	37.6	39.4	40.5	41.0	42.0	
CLC6 s/c=1.5 Fi=2% foam50%	29.6	31.0	32.4	33.7	34.8	37.0	39.0	40.3	40.8	41.5	

ตารางที่ ก.6.2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวภายในของคอนกรีต CLC

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวภายใน (องศาเซลเซียส)											
	0	2	4	6	8	10	15	30	45	60		
CLC3 normal s/c=1 foam50%	29.6	29.6	29.8	30.0	30.2	31.0	31.7	31.7	31.8	31.8		
CLC6 normal s/c=1.5 foam50%	29.6	29.6	29.8	29.9	29.9	30.1	31.2	31.2	31.5	31.5		
CLC3 s/c=1 Bi=15% foam=50%	29.6	29.6	29.8	29.9	30.0	30.2	30.5	30.6	30.6	30.6		
CLC6 s/c=1.5 Bi=15% foam=50%	29.6	29.6	29.6	29.8	29.8	29.8	30.2	30.4	30.5	30.5		
CLC3 s/c=1 Bi10% Fi4% foam50%	29.6	29.6	29.8	29.9	30.2	31.3	31.6	31.6	31.8	32.2		
CLC6 s/c=1.5 Bi10% Fi4% foam50%	29.6	29.6	29.8	29.9	30.3	31.0	31.4	31.4	31.6	32.0		
CLC3 s/c=1 Fi1.5% Bi10% foam60%	29.6	29.6	29.6	30.0	30.0	30.4	30.6	30.8	31.0	31.0		
CLC6s/c=1.5 Fi1.5% Bi10% foam60%	29.6	29.6	29.6	29.7	29.7	30.0	31.2	30.3	30.5	30.8		
CLC3 s/c=1 Fi=6% foam50%	29.6	29.6	29.8	30.0	30.0	31.0	31.8	32.0	32.2	32.3		
CLC6 s/c=1.5 Fi=6% foam50%	29.6	29.6	29.8	30.0	30.0	30.9	31.6	31.8	32.0	32.0		
CLC3 s/c=1 Fi=2% foam50%	29.6	29.6	29.8	29.9	29.9	30.0	31.5	31.6	31.7	31.7		
CLC6 s/c=1.5 Fi=2% foam50%	29.6	29.6	29.8	29.9	29.9	29.9	31.0	31.1	31.4	31.4		

ภาคผนวก ก.7 ผลการทดสอบโพลีสังเคราะห์ด้วยเครื่องผสมคอนกรีต

ครั้งที่	ความถี่	ปริมาตรถัง (ลิตร)	โพลี (กิโลกรัม)	เวลา (วินาที)	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)
1	35	0.0175	0.733	10	41.89	1.75
	35	0.0175	0.758	12	43.31	1.46
	35	0.0175	0.776	12	44.34	1.46
2	40	0.0175	0.712	10	40.67	1.75
	40	0.0175	0.705	11	40.29	1.59
	40	0.0175	0.726	13	41.49	1.35
3	45	0.0175	0.649	12	37.09	1.46
	45	0.0175	0.656	12	37.49	1.46
	45	0.0175	0.632	13	36.11	1.35
4	50	0.0175	0.611	12	34.91	1.46
	50	0.0175	0.621	10	35.49	1.75
	50	0.0175	0.608	10	34.74	1.75



ภาคผนวก ก.8 รายละเอียดโฟมสังเคราะห์



Professional Lightweight Concrete

ข้อมูลความปลอดภัยการใช้สินค้า

MATERIAL SAFETY DATA SHEET (MSDS)**Tripple Trees foaming agent**

- ชื่อสินค้า : Tripple Trees foaming agent
 การใช้งาน : ใช้ในงานซีเมนต์และคอนกรีตผสมเสร็จ
 คุณสมบัติ : เพิ่มฟองอากาศสำหรับงานคอนกรีต, เมื่อผสมกับน้ำและมีการกวนจะทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ

1. ข้อมูลผู้ผลิต

- ผู้ผลิต : บริษัท ช.จิตราพล จำกัด
 ที่อยู่ 366 ซอยอ่อนนุช44 ถนนสุขุมวิท77
 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250
 โทร. 02-7421882 แฟกซ์. 02-7422471
www.Tripletrees.com

2. องค์ประกอบทางเคมี

- ชื่อทางเคมี : Sodium Sulfate Solution
ANALYSIS ITEM
 Sodium Sulfate
 Anion Active Matter
 (Dry weight basis)
 Unsulfated Matter

3. การป้องกันอันตราย

- อันตรายกรณีกลิ้ง
- อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเมื่อสัมผัสเป็นเวลานานต่อเนื่อง
- ก่อให้เกิดการระคายเคืองอันตรายต่อดวงตา กรณีที่สัมผัสกับดวงตาโดยตรง

**4. การป้องกัน**

- ห้ามกิน ดื่ม เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้
- ล้างทำความสะอาดให้หมดจดหลังการสัมผัส
- ให้สวมถุงมือและอุปกรณ์ป้องกันดวงตาหรือหน้าตามที่กำหนดโดยผู้ผลิต ผู้จัดจำหน่าย หรือหน่วยงานที่รับผิดชอบ



Professional Lightweight Concrete

5. มาตรการช่วยเหลือเร่งด่วนลำดับแรก

ถ้ากลิ่นกินเข้าไป	- ถ้ารู้สึกผิดปกติให้โทรหาศูนย์พิษวิทยาหรือปรึกษาแพทย์
ถ้าสัมผัสดวงตา	- ล้างด้วยน้ำอย่างระมัดระวังนานต่อเนื่องอย่างน้อย 15 นาที - ถอดคอนแทคเลนส์ออก ถ้าสามารถทำได้โดยง่าย ชะล้างด้วยน้ำต่อทันที - ติดต่อศูนย์พิษวิทยาหรือแพทย์โดยด่วน
ถ้าสัมผัสผิวหนัง(หรือผม)	- ถอดเสื้อผ้าที่เป็นออกทันที - ล้างผิวหนังด้วยน้ำสะอาด - ถูเบาๆ ด้วยสบู่และน้ำมากๆ - ถ้าผิวหนังมีภาวะแดงเคืองให้ปรึกษาแพทย์

6. มาตรการป้องกันไฟไหม้

การติดไฟและระเบิด : ไม่ติดไฟ

7. มาตรการป้องกันอุบัติเหตุ

ผลิตภัณฑ์กระจายเปื้อนพื้น : ใช้ผ้าแห้งเช็ดให้สะอาดจากนั้นใช้ผ้าชุบน้ำหมาดๆเช็ด
หรือใช้น้ำฉีดล้างทำความสะอาด

8. การขนย้ายและจัดเก็บ

การขนย้ายและจัดเก็บ : ยกหรือขนย้ายผลิตภัณฑ์ด้วยความระมัดระวัง โดยยึดหลักความปลอดภัย
: ควรจัดเก็บผลิตภัณฑ์ในที่ร่ม ไม่สัมผัสแสงแดด หรืออุณหภูมิเยือกแข็ง

ข้อแนะนำการทำความปลอดภัยหลังจัดเก็บผลิตภัณฑ์ : ควรให้ถังบรรจุผลิตภัณฑ์นี้อยู่ในสภาพฝาปิดสมบูรณ์จัดเก็บในคลังสินค้า
ที่มีการระบายอากาศ

9. การรักษาความปลอดภัยของบุคคลโดยใช้เครื่องป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันการหายใจ : ไม่จำเป็นต้องใช้
อุปกรณ์ป้องกันมือ : ไม่จำเป็นต้องใช้
อุปกรณ์ป้องกันตา : ควรสวมแว่นตาป้องกัน
อุปกรณ์ป้องกันผิวหนังและร่างกาย : ควรสวมเสื้อผ้าให้มิดชิด และสวมรองเท้าบู๊ต กันสั่น

10. คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

รูปแบบ : ของเหลว
สี : โส
กลิ่น : ไม่มีกลิ่น
ความสามารถในการหลอมละลาย : ไม่ละลายใน ethanol, ละลายในน้ำ
จุดหลอมเหลว : 884 °C
จุดเดือด : 1,429 °C
จุดวาบไฟ : -



Professional Lightweight Concrete

11. ความเสถียร และ การก่อปฏิกิริยา

ความเสถียร : ผลิตภัณฑ์ มีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีง่าย

12. ข้อมูลความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์

- : อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อ ตา ผิวหนัง หากสัมผัสส่วนใดๆ ทำให้ผิวหนัง
- : หากกลืนกินอาจก่อให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน

13. ข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม

: เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ในกรณีที่ทำให้เจือจางแล้ว ระดับมลพิษต่อแหล่งน้ำต่ำ

14. ข้อพิจารณาสำหรับการกำจัดขยะผลิตภัณฑ์

- : เศษเหลือใช้ของผลิตภัณฑ์นี้ สามารถทิ้งลงสู่ระบบน้ำทิ้งทั่วไปได้
- : ภาชนะที่บรรจุผลิตภัณฑ์นี้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

15. การขนส่งผลิตภัณฑ์

: ไม่มีข้อกำหนดพิเศษในการขนส่ง

16. ข้อมูลอื่นๆ

ผลกระทบต่อสุขภาพ (Health)	: 1	0	- ต่ำ
การติดไฟ (Flammability)	: 0	1	- เล็กน้อย
การก่อปฏิกิริยา (Reactivity)	: 1	2	- ปานกลาง
		3	- รุนแรง
		4	- รุนแรงมาก

* ข้อมูลที่อยู่ในเอกสารนี้จะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เท่านั้น ซึ่งอาจไม่ถูกต้องได้ถ้าหากมีการใช้สารเคมีอื่นร่วมด้วย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวปาณิสรา แสงแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	5 พฤศจิกายน 2536
สถานที่เกิด	สงขลา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปัจจุบันกำลังศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY