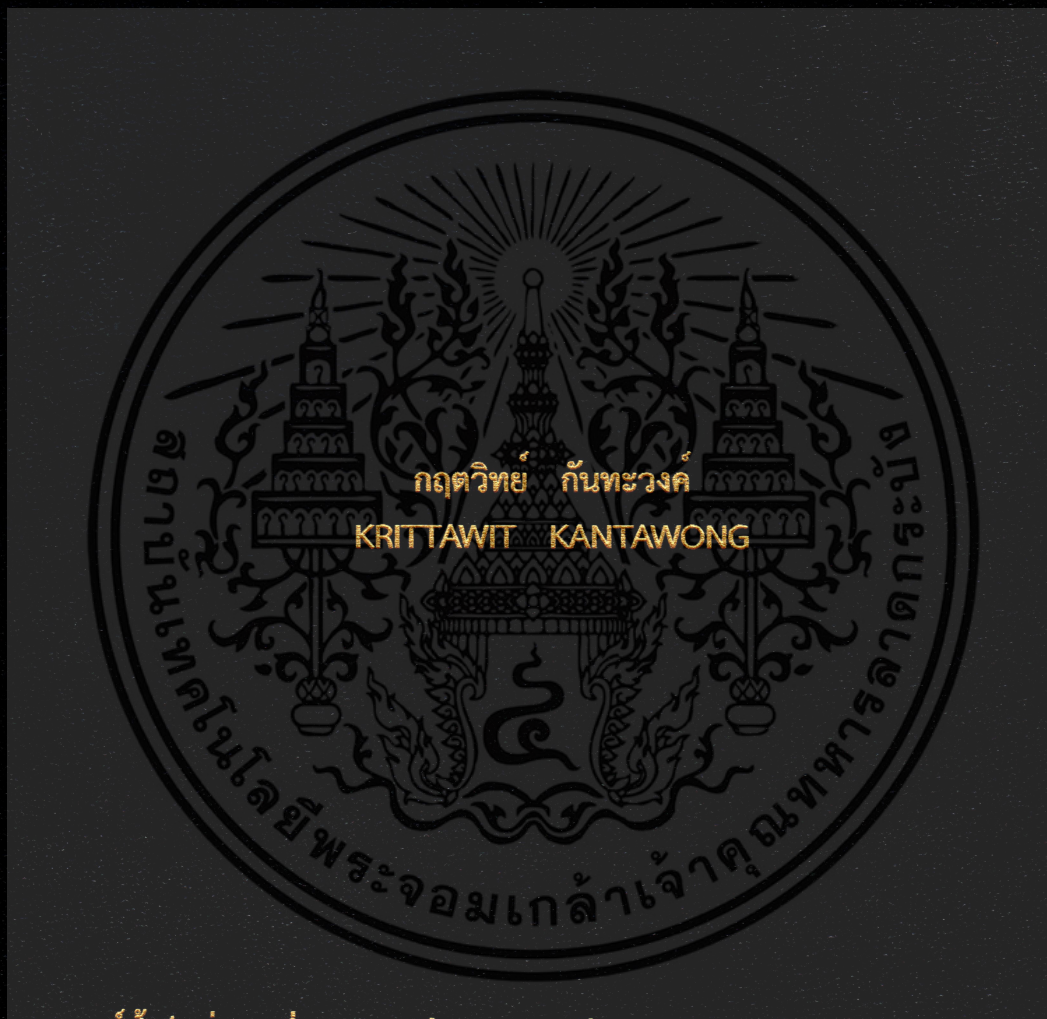


การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

A STUDY ON CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE PROPERTIES WITH
PALM OIL FUEL ASH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-093-123

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

A STUDY ON CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE PROPERTIES WITH
PALM OIL FUEL ASH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559
KMITL-2016-EN-M-093-123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE PROPERTIES WITH
PALM OIL FUEL ASH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-M-093-123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016





FACULTY OF ENGINEERING

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
Thesis Title A Study on Cellular Lightweight Concrete Properties with Palm Oil Fuel Ash
นักศึกษา นายกฤตวิทย์ กันทะวงศ์
รหัสประจำตัว 54613012
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อำนวยการ พานิชกุลพงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-093-123

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์	ธีรเศรษฐ์	
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	
ดร.อาทิตย์	เพชรศิธร	
รศ.อำนวยการ	พานิชกุลพงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
นักศึกษา	นายกฤตวิทย์ กันทะวงศ์
รหัสประจำตัว	54613012
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.อำนวยการ พานิชกุลพงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่มีความหนาแน่นในช่วง 1200 ถึง 1600 kg/m³ (เกรด C12, C14, และ C16 ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556) ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) เป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) โดยน้ำหนัก เทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) จะศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัด อัตราการหดตัว การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลที่ได้ คือ ด้านกำลังรับแรงอัด (ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน) ของคอนกรีตควบคุม (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ด้านการหดตัว (ที่อายุ 75 วัน) คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ ด้านการดูดซึมน้ำ (ที่อายุ 14 วัน) คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (CT) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ตามลำดับ และค่าการนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ ทั้งนี้ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทั้ง 4 จะเป็นผลการรับรองเมื่อมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ที่ความหนาแน่น 1200 ถึง 1600 Kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A STUDY ON CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE PROPERTIES WITH PALM OIL FUEL ASH
Student	Mr.Krittawit Kantawong
Student ID.	54613012
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Amnouy Panitkulpong

ABSTRACT

This research study the properties of Cellular Lightweight Concrete (CLC) with unit weight during 1200 to 1600 Kg/m³ (type C12, C14, and C16 TIS. 2601-2556). Using Palm Oil Fuel Ash (POFA) from Chumporn Palm Oil Industry Public Company Limited is a mixture of cement 10% (P10) and 20% (P20) to improve Cellular Lightweight Concrete (CLC) by weight. Compared with CLC Control (CT) to study the properties of strength, autogenous shrinkage, water absorption and thermal conductivity. The result is the compressive strength (3, 7, 14 and 28 days) of CLC Control (CT) is higher than CLC with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The autogenous shrinkage (at 75 days) of CLC Control (CT) is higher than CLC with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The water absorption (at 14 days) of CLC Control (CT) is lower than CLC with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. And Thermal Conductivity of CLC Control (CT) is higher than CLC with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The results of all properties, it is certified when using Palm Oil Fuel Ash (POFA) to replace cement 10% (P10) and 20% (P20) in Cellular Lightweight Concrete at the unit weight 1200 to 1600 Kg/m³.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.อำนาจ พานิชกุลพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ด้วยการให้แนวทาง คำแนะนำ และคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผศ. กฤติยา ตระกูลทิวากร หัวหน้าภาควิชาการออกแบบ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำการใช้ขบดถ้ำปาล์มน้ำมัน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือ เครื่องใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนถ้ำปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุในการทำวิจัย รวมถึง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดส่งถ้ำปาล์มน้ำมันให้

และที่ขาดเสียไม่ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

กฤตวิทย์ กันทะวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan).....	5
2.1.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน.....	8
2.1.3 คอนกรีตมวลเบา.....	12
2.1.4 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI).....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 คอนกรีตมวลเบา.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 การทดสอบเชิงจุลภาค.....	26
3.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF).....	26
3.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	27
3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	28
3.2.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI).....	29
3.2.2 ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325.....	30
3.2.3 การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency).....	33
3.2.4 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)	36
3.2.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)	42
3.3 การทดสอบสมบัติทางกล.....	44
3.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)	45
3.3.2 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)	47
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	50
4.1 ผลการทดสอบเชิงจุลภาค.....	50
4.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF).....	50
4.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	55
4.2.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition; LOI)	55
4.2.2 ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325.....	55
4.2.3 การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency).....	57
4.2.4 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	57
4.2.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity).....	58
4.3 การทดสอบสมบัติทางกล.....	60
4.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength).....	60
4.3.2 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage).....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก.....	73
ภาคผนวก ก-1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI).....	74
ภาคผนวก ก-2 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	76
ภาคผนวก ก-3 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity).....	80
ภาคผนวก ก-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength).....	85
ภาคผนวก ก-5 ผลการทดสอบอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage).....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ขอรับขอคืนดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.....	129
ภาคผนวก ข-1 ทรายอิมตัวผิวแห้ง.....	130
ภาคผนวก ข-1 ค่าความชื้นเหวลและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์.....	133
ภาคผนวก ค.....	137
ภาคผนวก ค งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	138



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ปาล์มน้ำมัน : พื้นที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรก.....	1
2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618.....	6
2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C618.....	6
2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพของเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C618.....	7
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากซุมพรและกระบี่.....	10
2.5 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาค.....	11
2.6 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา.....	13
2.7 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา.....	15
2.8 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา.....	15
2.9 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละการแทนที่ 0-50 โดยน้ำหนัก.....	17
2.10 ผลการทดสอบหน่วงน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ, การหดตัว.....	17
2.11 ผลการทดสอบค่าการยุบตัว และระยะเวลาก่อตัว.....	18
2.12 จากซ้าย ชนิด, น้ำ/วัสดุประสาน, ค่าการไหลแผ่, ความต้องการน้ำ(%) และกำลังอัด.....	19
2.13 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง เทียบกับที่ผสมซิลิกาฟูม และที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	20
3.1 อัตราส่วนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต่อทราย.....	38
3.2 จำนวนคอนกรีตมวลเบาที่ต้องทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ	41
3.3 ทดสอบการนำความร้อน.....	43
3.4 การทดสอบกำลังอัด.....	46
3.5 การทดสอบอัตราการหดตัว.....	48
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.2 ระยะเวลาบดและค้ำร้อยละเอียดของน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325.....	55
4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
2.1 การลำเลียงทะลายปาล์ม เส้นใยผลปาล์มและกะลา เพื่อมาเผาเป็นเชื้อเพลิง.....	9
2.2 เถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 2 ชนิด.....	9
2.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	11
2.4 กราฟ กำลังอัด - ร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อายุ 28 วัน.....	18
2.5 กำลังอัด - อายุคอนกรีต.....	21
2.6 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตความเข้มข้น 5%.....	21
2.7 การหดตัวของความหนาแน่นต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4.....	22
2.8 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อคมวลเบาผสมเถ้าแกลบ.....	24
3.1 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF).....	27
3.2 จากซ้าย Sputter coater และ Scanning Electron Microscope (SEM).....	28
3.3 อุปกรณ์ทดสอบ LOI.....	30
3.4 อุปกรณ์ทดสอบร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325.....	31
3.5 อุปกรณ์ทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency).....	34
3.6 อุปกรณ์การทำคอนกรีตมวลเบาชนิดเติมฟองอากาศ.....	37
3.7 แบบหล่อคอนกรีต 150 X 150 X 150 mm.....	40
3.8 แบบหล่อคอนกรีต 30 X 60 X 8 cm.....	43
3.9 เครื่องทดสอบแรงอัด.....	46
3.10 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage).....	48
4.1 ภาพถ่ายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด ที่กำลังขाय 1,000 เท่า.....	51
4.2 ภาพถ่ายคอนกรีตมวลเบา ที่กำลังขाय 3,000 เท่า.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปรภาพ	หน้า
4.3 ปรภาพถ่ายคอนกริตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่กำลังขาย 3,000 เถ้า.....	52
4.4 ปรภาพถ่ายคอนกริตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่กำลังขาย 3,000 เถ้า.....	53
4.5 ปรภาพขยาย 20,000 เถ้าของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H).....	54
4.6 ปรภาพขยาย 1,500 เถ้าของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite).....	54
4.7 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด.....	56
4.8 เปรียบเทียบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกริตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท.....	57
4.9 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกริตมวลเบา (CT).....	58
4.10 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกริตมวลเบา (P10).....	59
4.11 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกริตมวลเบา (P20).....	59
4.12 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกริตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท.....	60
4.13 กำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาประเภท CT ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน.....	61
4.14 กำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาประเภท P10 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน.....	61
4.15 กำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาประเภท P20 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน.....	62
4.16 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาความหนาแน่น 1200 kg/m ³	62
4.17 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาความหนาแน่น 1400 kg/m ³	63
4.18 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกริตมวลเบาความหนาแน่น 1600 kg/m ³	63
4.19 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกริตมวลเบาเกรด C12.....	64
4.20 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกริตมวลเบาเกรด C14.....	65
4.21 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกริตมวลเบาเกรด C16.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ กาบ และทะลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900°C ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ [1] พ.ศ. 2554-2556 (รูปที่ 1) ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 3,767,000 ไร่ และมีผลผลิตเป็นอันดับ 3 ของโลกประมาณ 12,383,000 ตันต่อปี

ตารางที่ 1.1 ปาล์มน้ำมัน : พื้นที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรก

ประเทศ	เนื้อที่ให้ผล (1,000 ไร่)			ผลผลิต (1,000 ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)			Country
	Harvested area (1,000 rais)			Production (1,000 tons)			Yield per rai (Kgs.)			
	2554 2011	2555 2012	2556 2013	2554 2011	2555 2012	2556 2013	2554 2011	2555 2012	2556 2013	
รวมทั้งโลก	105,645	110,198	112,833	245,574	255,434	266,479	2,325	2,318	2,362	World Total
อินโดนีเซีย	38,563	41,563	44,250	105,000	113,000	120,000	2,723	2,719	2,712	Indonesia
มาเลเซีย	27,038	27,769	28,438	93,815	93,265	95,729	3,470	3,359	3,366	Malaysia
ไทย ^{1/}	3,565	3,701	3,767	10,760	11,312	12,383	3,018	3,057	3,287	Thailand ^{1/}
ไนจีเรีย	20,000	20,313	18,750	8,000	8,100	8,000	400	399	427	Nigeria
โคลัมเบีย	1,438	1,438	1,563	4,614	4,671	4,991	3,209	3,248	3,193	Colombia
แคเมอรูน	761	769	844	2,400	2,500	2,450	3,154	3,251	2,903	Cameroon
เอกวาดอร์	1,267	1,241	1,368	2,097	2,649	2,317	1,655	2,135	1,694	Ecuador
กานา	2,250	2,250	2,250	2,126	2,196	2,100	945	976	933	Ghana
ปาปัวนิวกินี	894	913	938	2,000	2,050	2,100	2,237	2,245	2,239	Papua New Guinea
ฮอนดูรัส	688	731	781	1,867	1,989	2,004	2,714	2,721	2,566	Honduras
อื่น ๆ	9,181	9,510	9,884	12,895	13,702	14,405	1,405	1,441	1,457	Others

ที่มา : องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ

Source : Food and Agriculture Organization of the United Nations

ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มหรือประมาณ 6,500,000 ตันต่อปี เฉพาะบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ต้องใช้กากเพื่อนำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ชั่วโมงละ 36 ตัน ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เถ้าปาล์มน้ำมันถึง 11 ตันต่อวัน เป็นชนิดเถ้าลอย (Fly Ash) 1 ตันต่อวัน ชนิดเถ้าเปียก (Wet Ash) 10 ตันต่อวัน หรือได้เถ้าประมาณร้อยละ 1.273 โดยน้ำหนัก เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N [2] โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน เพราะยังเป็นวัสดุใหม่และการวิจัยยังไม่แพร่หลายเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหิน ดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่การพัฒนาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ร่วมกับคอนกรีตมวลเบา เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณมากและรวดเร็ว เพราะคอนกรีตมวลเบาไม่ได้นำไปใช้กับโครงสร้างหลัก (เสา, คาน, พื้น และฐานราก) แต่นำไปใช้กับโครงสร้างที่รับน้ำหนักหรือแรงกระทำไม่มาก เช่นผนัง แต่ก็มีความสำคัญต่อองค์อาคารคือช่วยแบ่งสัดส่วนพื้นที่ใช้งาน ทั้งยัง มีความรวดเร็วในการก่อสร้าง และที่สำคัญคือลดปริมาณเถ้าปาล์มได้ปริมาณมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงผลเชิงจุลภาค ผลเชิงกลและผลทางกายภาพ ของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC (Cellular Lightweight Concrete) หรือคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟอง โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก
 - ทดสอบเชิงจุลภาค
 - ทดสอบทางกายภาพ
 - ทดสอบสมบัติทางกล
2. เพื่อหาอัตราส่วนผสมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟอง
3. เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและมลภาวะเนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตการใช้วัตถุดิบ

- 1.1. ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash ; POFA) จากบริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ชนิดเถ้าเปียก (Wet Ash)
- 1.2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 1.3. ทรายละเอียดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง
2. การสร้างตัวอย่างทดสอบจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ

2.1. คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองควบคุม (CLC Control ; CT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.2. คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10)
- 2.3. คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20)
3. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ความสามารถเทได้ (Workability) โดยใช้โต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) เป็นตัวทดสอบ ที่การไหลแผ่ $110 \pm 5\%$
4. อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.5
5. ความหนาแน่นที่ทดสอบ 1200, 1400, และ 1600 Kg/m^3 (เกรด C12, C14, และ C16 ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556)
6. การทดสอบคุณสมบัติเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยข้อ 1.2 ประกอบด้วย
 - 6.1. การทดสอบเชิงจุลภาค
 - การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)
 - การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)
 - 6.2. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ
 - การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)
 - ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
 - การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency)
 - อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
 - ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
 - 6.3. การทดสอบสมบัติทางกล
 - กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
 - อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC (Cellular Lightweight Concrete), เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) รวมถึงรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทาง ในการทำวิจัย
2. ส่งเถ้าปาล์มน้ำมันวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีรวมถึงค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)
3. หาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ความสามารถเทได้ (Workability) โดยใช้โต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) เป็นตัวทดสอบโดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.5
4. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC เป็นตัวอ้างอิงเพื่อใช้เปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 กับร้อยละ 20
6. ทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลจากห้องทดลอง
7. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ พร้อมเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC (CT) กับคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ
8. สรุปผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิชาการ
 - 1.1. เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านการศึกษาคูณสมบัติคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองในการนำมาใช้กับงานคอนกรีต
 - 1.2. เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนา หรือปรับปรุงคุณสมบัติต่อไป
2. ด้านเศรษฐกิจ
 - 2.1. เป็นแนวทางในการสร้างวัสดุทดแทนเพื่อการนำไปใช้งานที่มีคุณสมบัติเทียบเท่า หรือใกล้เคียงกับวัสดุเดิม
 - 2.2. เป็นการสร้างมูลค่าแก่วัสดุดิบเดิมซึ่งมีมูลค่าต่ำและมีปริมาณสำรองจำนวนมากในปัจจุบัน
 - 2.3. ลดต้นทุนการผลิต
3. ด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม
 - 3.1. ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนสร้างจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด
 - 3.2. เป็นแนวทางเพื่ออนุรักษ์สภาพแวดล้อม ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและมลภาวะเนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 หลักการและทฤษฎี

2.1.1 วัสดุปอซโซลาน(Pozzolan)

เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น วัสดุปอซโซลานที่พบในไทย ได้แก่ แถ่ ถ่านหิน แถ่กลบ แถ่ปาล์มน้ำมัน และเถ้าขานอ้อย ซึ่งทั้ง 4 อย่าง มีปริมาณมากพอสมควรแต่ก็อาจจะมีวัสดุปอซโซลานอื่นๆ อีก จากมาตรฐาน ASTM C618 [2] วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีผลรวมของ ซิลิกา(SiO_2), อลูมินา(Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์(Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไป วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดผสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติได้ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดผสาน วัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาใช้กับคอนกรีตจะทำให้ปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ ตาม ASTM C618-15 (2015) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติ หรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (silica oxide, SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (alumina oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดง ในตารางที่ 2.1 ถึง 2.3 ซึ่งโดยทั่วไปถ่านล้อย ชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้ถ่านล้อยที่มี SiO_2 สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311/C311M [3]

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ถ่านล้อยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่ Al_2O_3 ต่ำ ทำให้ละลาย Class C นอกจากนี้ SiO_2 ต่ำแล้ว ยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 [2]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3), ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ

1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. สามารถใช้ละลายชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [2]

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
<i>ความละเอียด :</i>			
- ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ	34	34	34
<i>ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ :</i>			
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
<i>ความคงตัว (soundness)^C :</i>			
- การขยายตัวหรือหดตัวออตเคลฟ, ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
<i>ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ^D :</i>			
- ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ

- A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนแรง
- B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด
- C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัว ออตเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพของเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C618 [2]

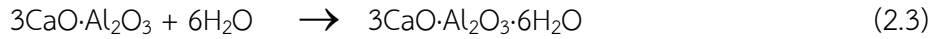
ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้างแรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม, ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ : เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง, ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม : การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ, ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต* : วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100

หมายเหตุ* ปริมาณมาตรฐานปอซโซลานที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยต้านซัลเฟตจะต้องอยู่ ภายในร้อยละ ± 2 ของการทดสอบหรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน [4]

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ดังสมการ (2.1) – (2.3)



ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ หรือซิลิกา (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์หรืออลูมินา (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการ (2.4) และ (2.5)



ค่า x , y , และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และอุดรูพรุนในคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

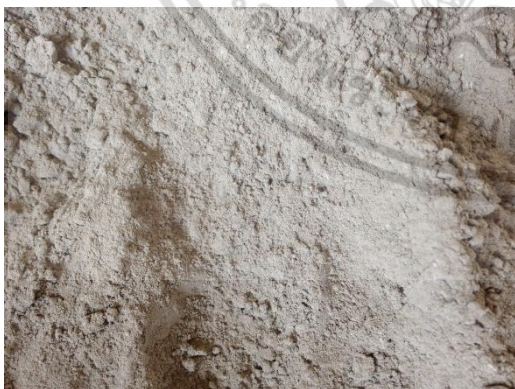
2.1.2 เถ้าปาล์มน้ำมัน

ปัจจุบันมีนโยบายจากภาครัฐในการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น เพราะน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ ดังนั้นจะมีกากปาล์มตลอดจนเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยคาดว่าอาจจะเพิ่ม มากกว่า 3 เท่าใน 10 ถึง 15 ปีข้างหน้า แต่การนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์ยังน้อยมากโดยเฉพาะการนำมาใช้ในงานคอนกรีต (ซึ่งเป็นหนทางที่ใช้ประโยชน์ได้ง่ายและปลอดภัยที่สุด) เนื่องจากยังเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ ซึ่งผู้ใช้งานหรือผู้ดูแลส่วนผสมคอนกรีตยังไม่แน่ใจที่จะนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้งาน หรืออาจเข้าใจถึงผลของการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตแต่เจ้าของโครงการยังไม่ต้องการให้ใช้ในโครงการ ดังนั้นการส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต จึงยังต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องและเพิ่มจำนวนมากยิ่งขึ้น เพราะเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลผลิตที่เกิดขึ้นในบ้านเรา มีจำนวนมากขึ้นทุกปี หากไม่สามารถนำมาใช้ได้ก็ต้องนำไปทิ้ง แต่ถ้าหากนำไปใช้ได้จะเป็นการกำจัดทิ้งเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าปาล์มน้ำมันและลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมันได้อย่างเป็นรูปธรรมที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมัน(ชนิดเถ้าเปียก) จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเถ้าลอย(Fly Ash) กับชนิดเถ้าเปียก(Wet Ash) ดังรูปที่ 2.2 (ก.) – (ข.) โดยจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของบริษัท เพื่อเป็นการลดภาระค่าไฟฟ้า จึงมีโครงการระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม มีการใช้เส้นใยทะเลลายปาล์ม เส้นใยผลปาล์ม และกะลาปาล์ม (รูปที่ 2.1) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 3.5 เมกกะวัตต์ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 2514960 ยูนิิตต่อปี



รูปที่ 2.1 การลำเลียงทะเลลายปาล์ม เส้นใยผลปาล์มและกะลา เพื่อมาเผาเป็นเชื้อเพลิง



(ก.) เถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าลอย (Fly Ash)

(ข.) เถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าเปียก (Wet Ash)

รูปที่ 2.2 เถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน ในส่วนผสมคอนกรีตจะเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะจะเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมเรื่องการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต ถ้าหากประเทศไทยสามารถมีมาตรฐานอุตสาหกรรมการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเกิดขึ้น ย่อมเป็นแนวทางที่สำคัญในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม และสร้างความเชื่อมั่นในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตต่อไป

คุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน

1.องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน คือมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาสูง โดยทั่วไปปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้ามีความละเอียดมากบวกกับความชื้นหรือน้ำที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานสำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ การวิจัยยังไม่แพร่หลายถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น เช่น เถ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติวัสดุปอซโซลาน อาจนำมาใช้ในการพิจารณาได้โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติที่กำหนดใน Class N คือการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการไหม้ต้องไม่เกินร้อยละ 10 มีดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากชุมพรและกระบี่ [5]

Chemical Composition (%)	เถ้าปาล์มน้ำมัน	
	ชุมพร	กระบี่
Silicon Dioxide (SiO ₂)	57.7	65.3
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	4.5	2.5
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.3	1.9
Calcium Oxide (CaO)	6.5	6.4
Magnesium Oxide (MgO)	4.2	3.0
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.5	0.3
Potassium Oxide (K ₂ O)	8.2	5.7
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.2	0.4
Loss On Ignition (LOI)	10.5	10.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาค

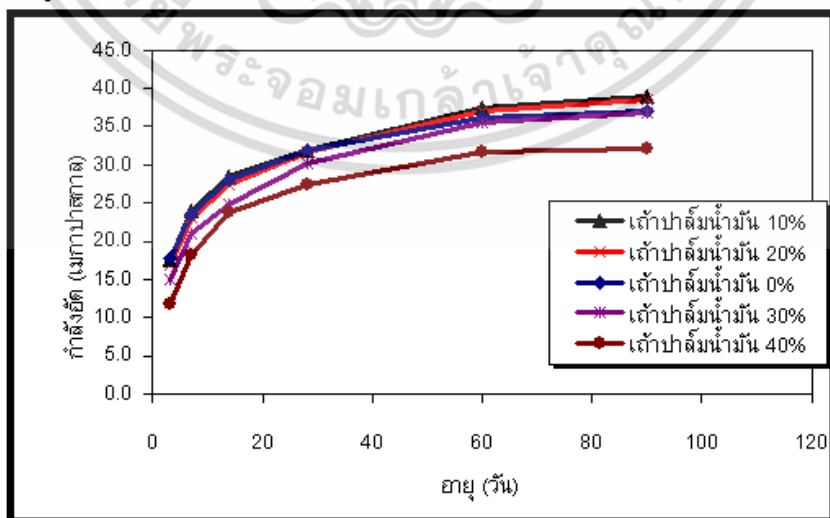
ถ้าปาล์มที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดต่ำและอนุภาคใหญ่มากซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย จึงต้องนำมาบดละเอียดก่อน โดยมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดความละเอียดปอซโซลาน Class N ต้องมีร้อยละค้ำบนตะแกรงร่อนเปียกเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [6] ได้มีการนำเข้าปัมน้ำมันมาบดละเอียดเป็นเวลา 3 ชม. โดยได้ค่าตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาค [6]

เวลาบด(นาที)	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละที่ค้ำบน ตะแกรงเบอร์ 325	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
0	1.97	41.2	62.5
40	2.17	17.1	19.9
180	2.33	1.5	10.2

3. กำลังอัด

การศึกษาเข้าปาล์มน้ำมันในไทย วิรัชชาติและคณะ [6] พบว่าถ้าปาล์มที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากกำลังอัดที่ได้มีค่าต่ำ ส่วนการใช้เข้าปาล์มบดละเอียด(ร้อยละค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5) ในอัตราทดแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 สามารถให้กำลังอัดมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วันเท่ากับร้อยละ 104 และร้อยละ 101 ตามลำดับ ตามรูป 2.3



รูปที่ 2.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเข้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 คอนกรีตมวลเบา

ส่วนของโครงสร้างที่ไม่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกมาก เช่น ผนัง แต่มีความสำคัญคือช่วยแบ่งพื้นที่ หรือป้องกันลม, ฝน, แสงแดด และวัสดุแปลกปลอมอื่นๆ จึงได้มีการพัฒนานำวัสดุมวลเบามาใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากน้ำหนักเบาที่ช่วยลดขนาดโครงสร้างหลักลง ยังมีความรวดเร็วในงานก่อสร้างอีกด้วย สามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System) ซึ่งจะแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 ประเภท

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เลื่อย ขี้เถ้า ชานอ้อย หรือเม็ดโฟม ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้ สารเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัย

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Circular Lightweight Concrete ; CLC) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟูและทิ้งให้แข็งตัว คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรง

คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลึกสีขาว

2. ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) ซึ่งแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาวเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งควบคุมคุณภาพได้ยาก มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตทำให้คุณภาพคอนกรีตที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ มีการดูดซึมน้ำมากกว่า

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เป็นระบบที่นอกจากจะช่วยให้คอนกรีต มีคุณภาพได้มาตรฐานสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยให้เกิดการตกผลึก (Calcium Silicate) ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ทนทาน กว่าที่การผลิตในระบบอื่นมาก

ในงานวิจัยนี้จะใช้คอนกรีตมวลเบาแบบ CLC (Circular Lightweight Concrete) ร่วมกับถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 กับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแทนที่ซีเมนต์

คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

1. กำลังรับแรงอัด

คอนกรีตมวลเบาจะมีค่าประมาณ 10 ถึง 140 kg/cm² ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมเบาสำหรับโครงสร้าง ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงอัด 100 ถึง 400 kg/cm² ค่ากำลังอัดนี้สามารถทำให้สูงขึ้นโดยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทรายแทนมวลรวมน้ำหนักรวม แต่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ 2601-2556 [7] กำหนดกำลังอัดที่อายุ 28 วันตามตาราง 2.6

ตารางที่ 2.6 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [7]

เกรด	ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)
C6	2.0 (20.4)
C7	
C8	
C9	2.5 (25.5)
C10	
C12	
C14	5.0 (51.0)
C16	

2.ความคงทน

ในการทดสอบทางด้านความคงทนของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะเป็นในเรื่องการกัดกร่อนจากสารเคมี เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาไม่มีโพรงอากาศภายในจึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งานในสภาพที่มีซัลเฟตสูง หรือสภาพดินซึ้น ในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันก่อน

3.การหดตัว

การหดตัวของคอนกรีตส่วนใหญ่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต นำไปสู่การแตกร้าวได้ถ้ามีการยึดรั้ง การหดตัวของคอนกรีตมักพบโดยทั่วไปต้องคำนึงถึงในการออกแบบด้วย ได้แก่การหดตัวแบบออโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง ในหลายกรณีการหดตัวทั้งสองมักเกิดด้วยกัน มักจะรุนแรงและต่างเวลากัน โดยการหดตัวแบบออโตจีเนียสจะเกิดในช่วงอายุต้น แต่การหดตัวแบบแห้งจะเกิดเมื่อผิวหน้าคอนกรีตแห้งตัวแล้วหลังจากการบ่ม

- การหดตัวแบบออโตจีเนียส(Autogenous Shrinkage) เป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคัปิลลารี(Capillary Pores) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างคอปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capillary Suction นี้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-desiccation” การหดตัวแบบอโตจินัสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อมแต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบอโตจินัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบอโตจินัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

- การหดตัวแบบแห้ง(Drying Shrinkage) เกิดเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างและโพรงอากาศของคอนกรีตทำให้บริเวณผิวสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมและเกิดการหดตัว โดยการหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมแม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีช่องว่างคอปิลลารี (Capillary Pores) และปริมาณน้ำอิสระมาก ทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวกและมาก ดังนั้นจึงมีการหดตัวแบบแห้งที่สูง

โดยรวมแล้วคอนกรีตมวลเบามีการหดตัวร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาขึ้นอยู่กับตัวแปร เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มวลรวม

4.การนำความร้อน

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่เลว(เป็นฉนวนกันร้อน) เนื่องจากภายในก้อนคอนกรีตมวลเบา มีฟองอากาศที่กระจายอยู่ในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะช่วยลดทอนปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้เป็นอย่างดี จึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ทำให้ผนังมีค่าความต้านทานความร้อนสูง และยังไม่สะสมความร้อนเอาไว้ในตัวเอง จึงช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งฉนวนกันความร้อนชนิดอื่น

5.ความหนาแน่น

ตามที่มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ 2601-2556 [7] กำหนดไว้ว่า คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะต้องมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามตารางที่ 2.7 โดยคอนกรีตมวลเบาแต่ละก้อนจะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมาตรฐานจะกำหนดความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ 500 kg/m^3 ถึง 1600 kg/m^3 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 เกรดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [7]

เกรด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m ³)
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1000
C12	1001 ถึง 1200
C14	1201 ถึง 1400
C16	1401 ถึง 1600

6. การดูดซึมน้ำ

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพราะเมื่อคอนกรีตมวลเบา มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง เวลาก่อฉาบ ตัวคอนกรีตมวลเบาจะไปดูดน้ำจากมอร์ตาร์ที่ฉาบ ซึ่งอาจทำให้ผิวฉาบแห้งและเกิดรอยร้าวของการฉาบ แม้ว่าจะไม่ส่งผลต่อส่วนโครงสร้างหลัก(เสา, คาน และพื้น) แต่ก็ทำให้มองดูไม่สวยงาม การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะมีค่ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีความพรุนหรือเป็นโพรงภายในตัวคอนกรีตมากกว่า ดังนั้นจึงมีมาตรฐานกำหนดให้อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาต้องมีค่าไม่เกินตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [7]

เกรด	อัตราการดูดซึมน้ำ ไม่มากกว่า % (เศษส่วนโดยมวล)
C6	25
C7	
C8	
C9	23
C10	
C12	
C14	20
C16	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.ความสามารถเทได้

ในปริมาณความสามารถเทได้ที่เท่ากัน คอนกรีตมวลเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา และในการทดสอบความสามารถเทได้จะใช้โต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) เช่นเดียวกับการทดสอบมอร์ตาร์ ความสามารถเทได้ที่ดีคือมีการไหลแผ่ $110\pm 5\%$

8.การทนไฟ

คอนกรีตมวลเบามีความต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อิฐมอญก่อ 2 ชั้นมีฉนวนตรงกลาง (ช่องว่างตรงกลาง) จะกันไฟได้ดีกว่าอิฐมวลเบาเล็กน้อยและทนไฟที่ $1,100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้นานกว่า 4 ชั่วโมงซึ่งนานกว่าอิฐมอญ 2-4 เท่า ทำให้จะช่วยจำกัดความเสียหายในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ได้

9.สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวหรือการบวม (swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงต้านแรงยึดเกาะกัน และทำให้แรงดึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลงจึงทำให้คอนกรีตขยายตัว ซีเมนต์เพสต์มีการขยายตัวสูงมากประมาณ 2000×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำมากคือประมาณ 200×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เพราะคอนกรีตประกอบด้วยมวลรวมกว่าร้อยละ 70 ของปริมาตรทั้งหมด ส่วนคอนกรีตมวลเบามีค่าประมาณ 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา การขยายตัวของคอนกรีตจึงเกิดจากการออกหรือเข้าของความชื้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะไม่ขยายตัวสู่ปริมาณเต็มเมื่อมันหดตัวถึงที่สุดแล้ว และได้รับความชื้นกลับมา

2.1.4 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)

การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) เป็นการวัดปริมาณคาร์บอนและความชื้นในวัสดุที่เกิดขึ้นกับการทำปฏิกิริยากับอากาศ ASTM C150 กำหนดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 3 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 วิธีการทดสอบทำได้โดยการเผาปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิ $950\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ 1 กรัมเผาครั้งแรกอย่างน้อย 15 นาที และครั้งต่อไปอย่างน้อยครั้งละ 5 นาที จนได้น้ำหนักคงที่(รายละเอียดการทดสอบมีอยู่ใน ASTM C114) ส่วนการทดสอบ LOI ของวัสดุพอลิโพรพิลีนจะใช้อุณหภูมิ $750\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามมาตรฐาน ASTM C311/C311M วิธีการทดสอบเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่างที่อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Joo-Hwa Tay [8] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากการเผาเพื่อหนึ่งปาล์มที่อุณหภูมิ 350 °C แต่เพราะอุณหภูมิดังกล่าวไม่สามารถทำให้กะลาปาล์มเผาไหม้ได้สมบูรณ์ จึงนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C อีกครั้งในห้องปฏิบัติการ แล้วนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต วิธีการคือทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันจากน้ำนำมาผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (ขนาด 150 μm .) จากนั้นหาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้าน กำลังอัด, ความหนาแน่น, การดูดซึมน้ำ, การหดตัว, ค่าการยุบตัว และระยะเวลาก่อตัว ใช้อัตราส่วน ปูน : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2 : 4, อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) เท่ากับ 0.6 ใช้ลูกปูนขนาด 10x10x10 cm. ทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน ในแต่ละการทดสอบใช้ลูกปูน 3 ก้อนเพื่อนเป็นค่าเฉลี่ย ผลที่ได้ดังแสดง

ตารางที่ 2.9 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละการแทนที่ 0-50 โดยน้ำหนัก

Compressive Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)			
	3rd day	7th day	14th day	28th day
(%) (1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0	22.17	27.50	31.83	35.50
10	22.20	27.43	31.93	35.50
20	19.80	22.70	25.70	29.50
30	14.80	18.70	20.80	25.50
40	10.29	13.78	16.60	20.20
50	8.60	12.03	14.60	17.78

ตารางที่ 2.10 ผลการทดสอบหน่วงน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ, การหดตัว

Ash (%) (1)	Density (kg/m^3)			Water absorption (%) (5)	28th day shrinkage strain ($\times 10^{-6}$) (6)
	Oven dry (2)	Saturated (3)	Air dry (4)		
0	2,186	2,358	2,352	6.20	815
10	2,185	2,351	2,336	6.18	815
20	2,144	2,306	2,293	6.25	820
30	2,120	2,271	2,248	6.96	830
40	2,099	2,270	2,227	7.25	845
50	2,046	2,209	2,173	7.96	855

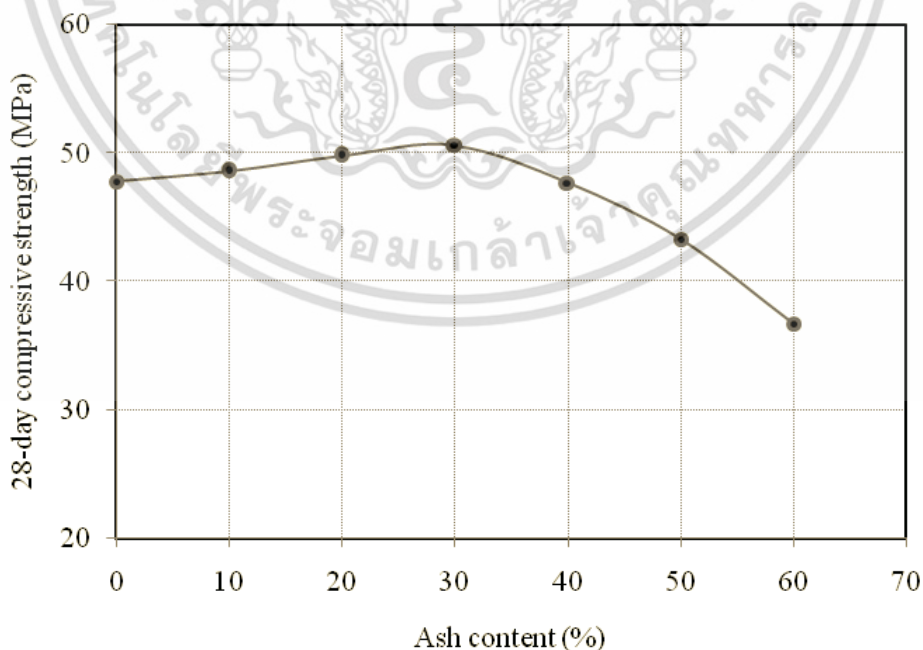
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ผลการทดสอบค่าการยุบตัว และระยะเวลาก่อตัว

Ash (%) (1)	Slump (mm) (2)	Compacting factor (3)	Initial setting time (4)	Final setting time (5)
0	150	0.975	2 hr 5 min	3 hr 15 min
10	150	0.970	2 hr 10 min	3 hr 45 min
20	140	0.960	2 hr 10 min	4 hr 0 min
30	130	0.955	2 hr 20 min	4 hr 10 min
40	130	0.950	2 hr 30 min	4 hr 30 min
50	120	0.950	2 hr 40 min	4 hr 40 min

จากการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีขนาดใหญ่

M. W. Hussin and A.S.M. Abdul Awal [9] ศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากการเผาไหม้กาก และกะลาปาล์มเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้แก่หม้อกำเนิดไอน้ำ(Palm oil mill boiler) ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อการสกัดน้ำมันปาล์ม มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 ผลจากการทดสอบพบว่า สามารถแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในซีเมนต์ได้มากที่สุดถึงร้อยละ 30 (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 กราฟ กำลังอัด-ร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่อายุ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคอนกรีตทั้งมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ กำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วัน มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้

วีรชาติ และคณะ [6] ได้ศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจังหวัดกระบี่มา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ก่อน เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออก ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 นี้เรียกว่า OP จากนั้นนำมาบดละเอียดให้ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เรียกว่า G1P ละบดต่ออีกจนร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เหลืออยู่ต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เรียกว่า G2P จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุ เพื่อศึกษาความต้องการน้ำและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการวิจัยพบว่าความต้องการน้ำของมอร์ตาร์มากขึ้นตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในซีเมนต์ และกำลังอัดของ G2P พัฒนามากกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อผ่าน 60 วันไปแล้ว ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.12 จากซ้าย ประเภท, น้ำ/วัสดุประสาน, ค่าการไหลแผ่, ความต้องการน้ำ และกำลังอัด

ชนิดของมอร์ตาร์	W/(C+P)	Flow	Water Requirement (%)	กำลังอัด (ksc - %)			
				7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CT1	0.67	111	100	333 - 100	436 - 100	499 - 100	525 - 100
OP10	0.68	105	101	276 - 83	381 - 87	462 - 93	494 - 94
OP20	0.70	109	104	248 - 74	319 - 73	375 - 75	406 - 77
OP30	0.72	107	107	179 - 54	289 - 66	331 - 66	357 - 68
OP40	0.73	108	109	133 - 40	193 - 44	250 - 50	264 - 50
G1P10	0.66	107	99	318 - 96	411 - 94	498 - 100	535 - 102
G1P20	0.67	111	100	298 - 90	389 - 89	473 - 95	510 - 97
G1P30	0.68	112	101	258 - 78	361 - 83	443 - 89	473 - 90
G1P40	0.69	107	103	217 - 65	309 - 71	366 - 89	392 - 75
G2P10	0.66	107	99	325 - 98	428 - 98	510 - 102	546 - 104
G2P20	0.67	111	100	301 - 90	414 - 95	498 - 100	532 - 101
G2P30	0.67	106	100	283 - 85	394 - 90	469 - 94	501 - 95
G2P40	0.68	109	101	260 - 78	344 - 79	409 - 82	437 - 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

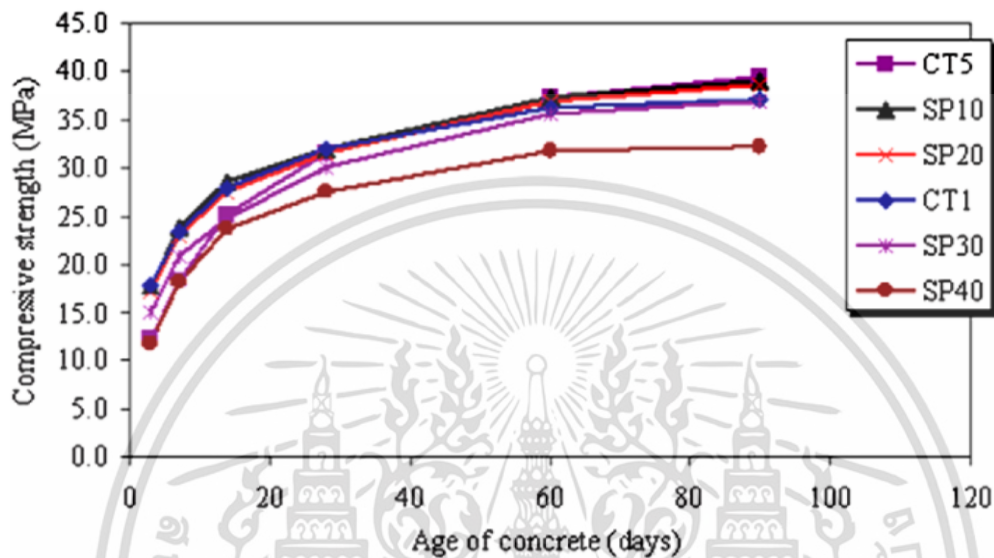
Vanchai Sata, Chai Jaturapitakkul and Kraiwood Kiattikomol [10] ได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงเพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดกับคอนกรีตกำลังสูงที่มีซิลิกาฟวมเป็นส่วนผสมโดยน้ำหนัก และใช้ร่วมกับสารลดน้ำปริมาณสูง หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Superplasticizer ในปริมาณที่ให้ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 185 mm. ถึง 210 mm. ค่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบอยู่ที่ 45 : 55 โดยปริมาตร ทำการควบคุมอัตราการดูดซึมน้ำที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียด 1.0% และมวลรวมหยาบ 0.8% จากนั้นแทนที่ซิลิกาฟวม (อัตราร้อยละ 5 (SF05) ถึงร้อยละ 15 (SF15) ในคอนกรีตกำลังสูง เทียบกับคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดสามารถนำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 (POFA30) และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (POFA20) ยังมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟวมร้อยละ 5 ด้วยที่อายุคอนกรีต 28 วัน และที่อายุคอนกรีต 90 วัน มีกำลังอัดสูงถึง 88-91 เมกะปาสกาล (ตารางที่ 2.10) เมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไซ้มีขนาด 10.1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30

ตารางที่ 2.13 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง เทียบกับที่ผสมซิลิกาฟวม และที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

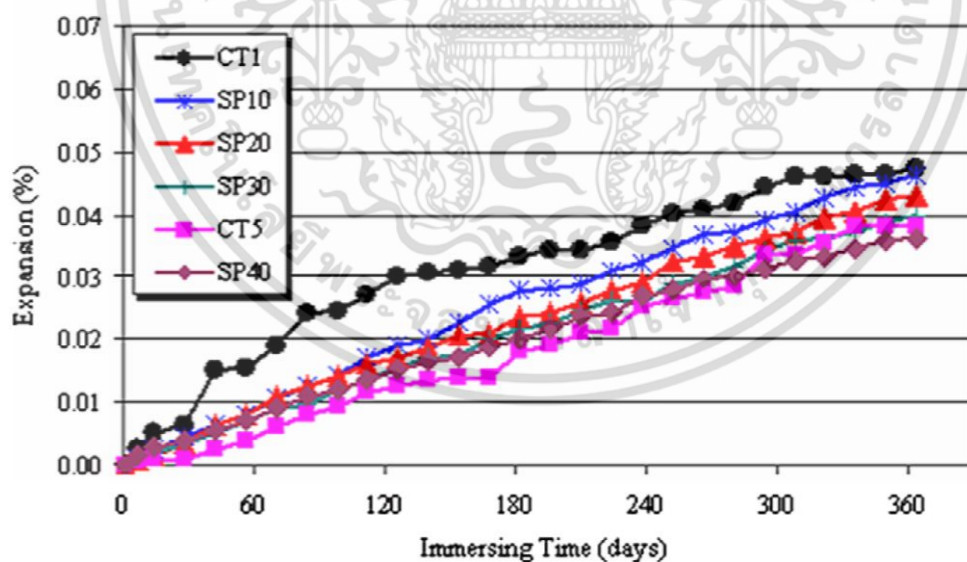
Concretes	Compressive strength (MPa) – (% of control compressive strength)				Modulus of elasticity 90 days (GPa)
	7 days	28 days	60 days	90 days	
Control	68.8–(100)	77.5–(100)	83.8–(100)	87.5–(100)	44.6
SF05	71.1–(103)	80.2–(103)	85.2–(102)	88.0–(101)	44.9
SF10	77.5–(113)	91.7–(118)	96.7–(115)	97.9–(112)	47.9
SF15	75.9–(110)	92.6–(119)	95.0–(113)	96.0–(110)	46.8
POFA10	71.7–(104)	81.3–(105)	86.5–(103)	89.1–(102)	44.2
POFA20	71.1–(103)	85.9–(111)	88.5–(106)	91.5–(105)	44.6
POFA30	68.5–(100)	79.8–(103)	84.7–(101)	88.7–(101)	43.7

Weerachart Tangchirapat, Tirisit Saeting and Chai Jaturapitakkul [11] ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ (ประเภทที่ 1) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อศึกษา ระยะเวลาก่อตัว, กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และความทนทานต่อสารละลายซัลเฟต (กรณีนี้คือคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับคอนกรีตควบคุมประเภทที่ 5 ที่ทนซัลเฟต ; CT5) โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดเป็น OP, หลังบดแล้วอนุภาคเฉลี่ย 15.9 ไมครอนเรียกว่า MP และบดจนอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 7.4 ไมครอนเรียกว่า SP ผลที่ได้ คือ ระยะเวลาก่อตัวต้นและปลายของคอนกรีตประเภทที่ 1 ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันใช้เวลามากกว่าคอนกรีตควบคุม (ประเภทที่ 1 ล้วน ; CT1) แต่น้อยกว่าคอนกรีตประเภทที่ 5 (ชนิดทนซัลเฟต), ผลการทดสอบด้านกำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันชนิด SP เท่านั้นจึงจะสามารถทำให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม (ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) และปริมาณสูงสุดของการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ (ประเภทที่ 1) คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีต(จากซีเมนต์ประเภทที่ 1) ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมัน(ร้อยละ 30) จะมีกำลังอัดเทียบเท่าเมื่ออายุคอนกรีต 90 วัน ตามรูปที่ 2.5, ผลการทดสอบ ความทนทานต่อสารละลายซัลเฟต โดยการแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายซัลเฟตที่ความเข้มข้น 5 % เป็นเวลา 1 ปี แห่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 30 % ชนิด SP มีการขยายตัวระดับเดียวกับ แห่งคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กำลังอัด - อายุคอนกรีต

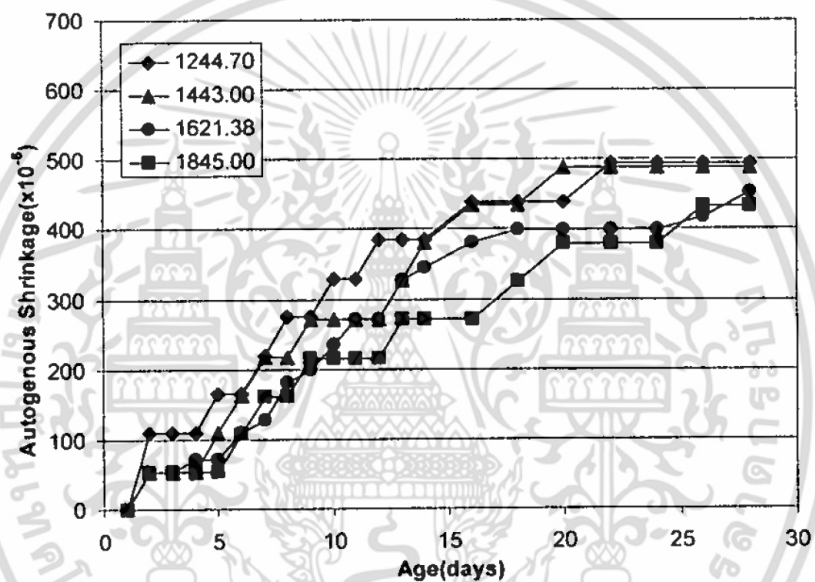


รูปที่ 2.6 การขยายตัวของแห่งคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตความเข้มข้น 5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 คอนกรีตมวลเบา

ศิวะ วาสาลา [12] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโฟมที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ในคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ซึ่งใช้น้ำยาเคมีทำให้เกิดฟองก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับซีเมนต์เพสและมอร์ตาร์ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักของตัวอย่างลดลง โดยมุ่งเน้นการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC เพื่อใช้ในการงานโครงสร้าง ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $1,200-2,000 \text{ kg/m}^3$ และสามารถรับกำลังอัดที่ 28 วันมากกว่า 180 kg/cm^2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 และ 0.5 และใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายโดยน้ำหนักที่ 1 : 1 ทำการทดสอบคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด การหดตัวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม



รูปที่ 2.7 การหดตัวของความหนาแน่นต่างๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4

ผลการทดลองพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฟองโฟมซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $1,200-2,000 \text{ kg/m}^3$ มีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง $100-450 \text{ kg/cm}^2$ ส่วนมอร์ตาร์ผสมฟองโฟมกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง $100-350 \text{ kg/cm}^2$ การหดตัวมีค่าอยู่ในช่วง $778 \times 10^{-6}-1,012 \times 10^{-6}$ และ $393 \times 10^{-6}-649 \times 10^{-6}$ ในซีเมนต์เพสและมอร์ตาร์ตามลำดับ และค่าแรงยึดเหนี่ยวในส่วนของมอร์ตาร์มีค่าระหว่าง $25.83-47.49 \text{ kg/cm}^2$

สุเมธ สันทัตพัฒนา [13] ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (CLC) ที่มีความหนาแน่นในช่วง 600 ถึง 1800 kg/m^3 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 1 : 1 โดยศึกษาคุณสมบัติด้านกำลัง การดูดซึมน้ำ การหดตัว และการนำความร้อน โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$. สำหรับการทดสอบกำลังอัดและการดูดซึมน้ำขนาด $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. สำหรับการทดสอบอัตราการหดตัว และขนาด $20 \times 60 \times 10 \text{ cm}$. สำหรับการเอ็กซเรย์เป็นเอกซเรย์สองวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

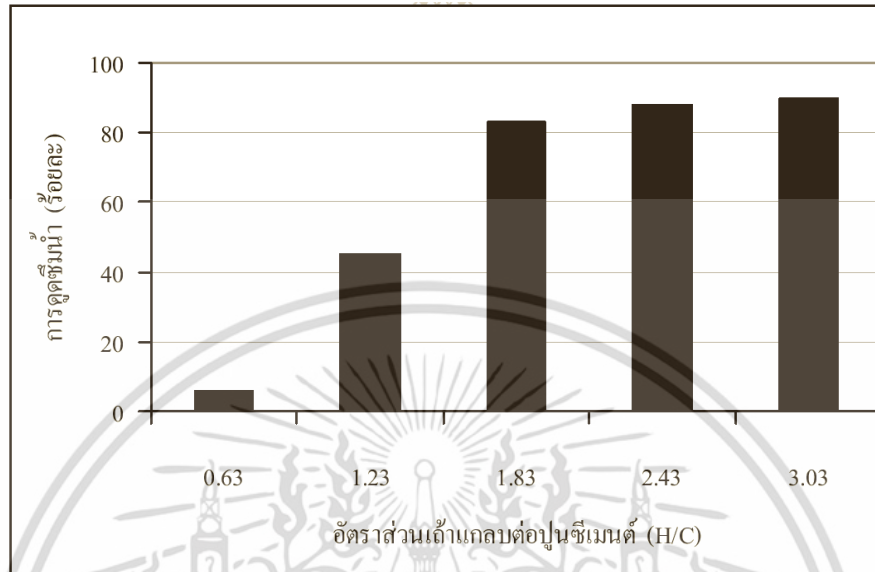
ทดสอบการนำความร้อน ผลที่ได้พบว่า กำลังอัดอยู่ในช่วง 5 ถึง 300 kg/cm² อัตราการดูดซึ่มอยู่ในช่วง 14% ถึง 33% การหดตัวอยู่ในช่วง 550µm. ถึง 1100µm. และการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.23 ถึง 0.61 W/m.K

วัชรพงษ์ วงศ์เขียว [14] ศึกษาผลของเถ้าหนัก(Bottom Ash) และซิลิกาฟุม(Silica Fume) ต่อสมบัติกำลังอัดและสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาคของเถ้าหนักไม่เหมาะสมในการนำมาทดแทนปูนซีเมนต์จึงต้องทำการบดละเอียด 6 ชม. ด้วย Ball mill การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ 1. การเปรียบเทียบคอนกรีตธรรมดากับคอนกรีตธรรมดาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนัก(ความหนาแน่น 2290±5 kg/m³) ที่อัตราส่วน 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และเติมซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วทำการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7,14, 28 และ 60 วัน 2. การเปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบากับคอนกรีตมวลเบาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนัก(ความหนาแน่น 1500±100 kg/m³) ที่อัตราส่วน 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และเติมซิลิกาฟุมในอัตราส่วน 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วทำการบ่ม 2 วิธี คือ บ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูงเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในอากาศเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่น กำลังอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนักและมีการเติมซิลิกาฟุมเพิ่ม ทั้งที่ผ่านบ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูงและไม่ผ่านบ่มด้วยไอน้ำที่ความดันสูงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าหนักและซิลิกาฟุมเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดลองของคอนกรีตธรรมดาพบว่า ค่าการยุบตัวและค่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าหนักและซิลิกาฟุมเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซิลิกาฟุมเป็นสารเติม

ประชุม คำพุด และกิตติพงษ์ สุวิโร [15] ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้าแกลบที่เสริมแผ่นยางพาราและไม่เสริมแผ่นยางพารา โดยใช้เถ้าแกลบเป็นมวลรวมละเอียด(ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100) การทดลองช่วงแรกเป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณ ปูน : ทราย : น้ำ : เถ้าแกลบ โดยเปลี่ยนเฉพาะปริมาณเถ้าแกลบ ปูน, ทราย และน้ำใช้ปริมาณเดียว โดยเริ่มจาก 1 : 0.5 : 1 : 0.63 และเพิ่มเถ้าแกลบทีละ 0.6 จาก 0.63, 1.23, 1.83, 2.43 และ 3.03 โดยความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น จาก 1506 kg/m³(เถ้าแกลบ 0.63), 829 kg/m³(เถ้าแกลบ 1.23), 690 kg/m³(เถ้าแกลบ 1.83), 653 kg/m³(เถ้าแกลบ 2.43) และ 642 kg/m³(เถ้าแกลบ 3.03) ทดสอบคุณสมบัติ ความหนาแน่น, การดูดซึ่ม, และกำลังอัดตามมาตรฐาน มอก.58-2530 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 1 : 0.5 : 1 : 1.83 จึงใช้เป็นค่าออกแบบ การทดลองช่วงท้าย เป็นการสอบคุณสมบัติด้านความหนาแน่น, การดูดซึ่ม, การเปลี่ยนแปลงความยาว และกำลังอัด(อีกครั้ง โดยเทียบที่เสริมและไม่เสริมแผ่นยางพารา) ผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบพบว่า ความหนาแน่น, การดูดซึมน้ำ, และกำลังอัด ของคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ผสมเถ้ากลบเสริมแผ่นยางพารา มีค่าใกล้เคียง คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ผสมเถ้ากลบไม่เสริมแผ่นยางพารา การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ผสมเถ้ากลบเสริมแผ่นยางพารามีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 2.8 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบาผสมเถ้ากลบ

ปณชัย ไทวิชา [16] ศึกษาผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังอัด ความหนาแน่น และการนำความร้อนของมอร์ต้าร์มวลเบาผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ โดยนำเถ้ากลบสังเคราะห์มาแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน และปูนขาวร้อยละ 20 ใช้อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อทราย 2 : 1 และทำการเติมสารกักกระจายฟองอากาศ 3 ชนิด(เปรียบเทียบกัน) ได้แก่ Aluminium Powder, Portland Foam และ Portland Light ในอัตราร้อยละ 0.5 และ 1 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน เริ่มจากการนำเถ้ากลบมาเผาที่อุณหภูมิ 500 °C นาน 1 ชม. เพื่อกำจัดสิ่งปะปนจนเถ้ากลบมีสีเทา จากนั้นเผาเพื่อควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 650 °C อีก 1 ชม. จนเถ้ากลบมีสีขาวแล้วนำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine 8 ชม. แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยค่าร้อยละที่ค้างบนตะแกรงร้อนต้องไม่เกินร้อยละ 15 เพื่อให้ได้เถ้ากลบสังเคราะห์ละเอียด ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ใช้ Aluminium Powder ร้อยละ 1 และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้ากลบสังเคราะห์ร้อยละ 60 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน ให้ความหนาแน่นต่ำสุด คือ 0.89 kg/m³ กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 41 kg/cm² และค่าการนำความร้อนทดสอบด้วยวิธี Thermal Constant Analysis(TCA) ด้วยเครื่อง Hot Disk Thermal Constant Analyser(Hot Disk TCA) ได้ค่าการนำความร้อน 0.701 W/m.K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึง รายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะครอบคลุมไปถึง วัสดุที่ใช้ การเตรียมตัวอย่างทดสอบ การส่งตัวอย่างทดสอบ สัดส่วนผสม ขั้นตอนการทดสอบโดยละเอียด พร้อมรูปประกอบการเข้าใจ ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะถูกกล่าวถึงในการทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม คือ

3.1 การทดสอบเชิงจุลภาค

- 3.1.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)
- 3.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

- 3.2.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)
- 3.2.2 ค่าร้อยละผสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
- 3.2.3 การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency)
- 3.2.4 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- 3.2.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

3.3 การทดสอบสมบัติทางกล

- 3.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
- 3.3.2 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

การทดสอบครั้งหนึ่งจากการทดสอบทั้ง 8 จะเป็นการส่งตัวอย่างทดสอบยังสถาบันที่ได้รับ การรับรองเพื่อทำการวิเคราะห์ผลตามมาตรฐานทดสอบ เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทางที่ไม่ สามารถหาได้จากห้องปฏิบัติการคอนกรีตทั่วไป และยังต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือเป็นผู้ทำ การทดสอบจากสถาบันที่ให้การทดสอบนั้นๆ ให้ เพื่อออกไปรับรองผลการทดสอบ โดยการทดสอบ ต่างๆ จะอ้างอิงจากมาตรฐานสากล เช่น American Society for Testing and Materials (ASTM) หรือ International Standards Organization (ISO) ตามกระบวนการทดสอบของแต่ละมาตรฐาน ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีวิธีการทดสอบที่ไม่เหมือนกัน เช่น การทดสอบการนำความร้อน (Thermal Conductivity) มาตรฐาน ASTM C518 และ มาตรฐาน ISO 22007-2 จะใช้หลักการคล้ายกัน คือ ปล่อยความร้อนผ่านวัสดุ ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยสิ่งที่ แตกต่างกันคือ ขนาด ชนิด และช่วงอุณหภูมิที่เครื่องสามารถสร้างได้ตามชนิดของวัสดุ ผลจากการ ทดสอบทั้งสองมาตรฐานสามารถนำไปใช้ได้ เพราะเป็นมาตรฐานการทดสอบสากล และทางสถาบัน ทดสอบจะออกไปรับรองผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล ในการทดสอบการนำความร้อนของงานวิจัยนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเลือกวิธีตามมาตรฐาน ASTM C518 เพราะมีความเหมาะสมกว่า เพราะมาตรฐาน ISO 22007-2 จะใช้ชิ้นทดสอบขนาด 5x5x1 cm. ซึ่งมีข้อกำหนดว่าพื้นผิวทดสอบต้องเรียบ แต่ชิ้นตัวอย่างในงานวิจัยเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบฟองอากาศ จึงมีโพรงฟองทำให้ผิวไม่เรียบเป็นต้น และในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ส่งตัวอย่างทดสอบ 4 อย่าง ประกอบด้วย

- การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)
- การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)
- การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)
- ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

3.1 การทดสอบเชิงจุลภาค

การทดสอบเชิงจุลภาคในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 อย่าง คือ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) และการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) จะเป็นการส่งตัวอย่างทดสอบยังสถาบันที่มีมาตรฐานรองรับ เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทางและต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือเป็นผู้ทดสอบ

3.1.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

เทคนิค X-Ray Fluorescence หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้ เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

อุปกรณ์

1. แก้วปาล์มน้ำมัน
2. เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนำวัสดุพอลิโซลามาใช้ในงานคอนกรีต การตรวจสอบองค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค XRF นับว่าเป็นขั้นตอนแรกก่อนการนำมาใช้ เพราะปริมาณซิลิกาและอลูมินาในวัสดุพอลิโซลามีความสำคัญต่อการเป็นวัสดุยึดประสาน หากปริมาณมีไม่เพียงพอก็ไม่สามารถนำไปใช้กับงานคอนกรีตโครงสร้างได้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเข้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) มาใช้กับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาถูกนำมาใช้เพื่อการกันพื้นที่ แบ่งห้อง กันลมฝน ที่จะเข้ามาภายในอาคาร ผลที่ได้แสดงในผลการทดสอบบทที่ 4



รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

การทดสอบ Scanning Electron Microscope หรือ SEM สามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน และแสดงให้เห็นลักษณะและการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาคหรือความผิดปกติของอุปกรณ์ขนาดเล็กๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานทางด้านชีววิทยา ฯลฯ ในการทดสอบจะเป็นการส่งตัวอย่าง ณ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล (DSTAR) โดยอุปกรณ์และขั้นตอนวิธีการทดสอบสรุปได้โดยรวม ดังนี้

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างที่จะนำมาส่องกล้อง ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แก๊สพอลิเมอร์
 - คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟอง (CT)
 - คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองผสมแก๊สพอลิเมอร์ 10% (P10)
 - คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองผสมแก๊สพอลิเมอร์ 20% (P20)
2. เครื่องมือฉาบผิว Sputter coater (เครื่องเคลือบไอออนทองคำ)
 3. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



(ก.) Sputter coater

(ข.) Scanning Electron Microscope (SEM)

รูปที่ 3.2 จากซ้าย Sputter coater และ Scanning Electron Microscope (SEM)

วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างที่จะส่งทดสอบไปให้ความชื้นเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชม. อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เพราะถ้าตัวอย่างทดสอบชื้นจะทำการเคลือบทองได้ไม่ดี
2. ติดตัวอย่างทดสอบกับแท่นทรงกระบอก(อุปกรณ์ของเครื่อง SEM) โดยให้ขนาดประมาณเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 cm. ถ้าเป็นผงก็โรยให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณนี้เช่นกัน
3. ทำการฉาบผิว (เคลือบทอง) แท่นทรงกระบอกที่ติดตัวอย่างแล้ว ด้วยเครื่อง Sputter coater โดยที่ การฉาบผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ยกเว้นกรณีตัวอย่างนำไฟฟ้าได้ตั้งอยู่แล้ว
4. หลังการเคลือบผิวเพื่อนำไฟฟ้าก็นำมาส่องกล้อง ผลที่ได้แสดงในบทที่ 4

3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพ คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายนอกที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า หรือโดยใช้เครื่องมือวัด สามารถบอกความหนา-เบา กว้าง-ยาว ได้ เช่น ความหนาแน่น น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยไม่มีผลต่อองค์ประกอบภายในและไม่เกิดสารใหม่ เช่น การนำความร้อน การนำไฟฟ้า การดูดซึมน้ำ มีคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับปริมาณและเนื้อสารในวัตถุ ในส่วนของงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการทดสอบ 4 อย่าง ดังได้กล่าวเกริ่นนำบทที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการทดสอบ ดังนี้

3.2.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)

ASTM C150 กำหนดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้สูงสุดสำหรับเถ้าลอย ชั้นคุณภาพ N (Class N) ไว้น้อยสุดไม่เกินร้อยละ 10 (ตารางที่ 2.1) ซึ่งเถ้าปาล์มน้ำมันก็จัดอยู่ในชั้นคุณภาพนี้ คือ ปอซโซลานจากธรรมชาติ หรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ในงานวิจัยนี้จะส่งทดสอบที่สถาบันวิจัยจุฬา โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

อุปกรณ์

1. เถ้าปาล์มน้ำมัน 1 กรัม
2. เครื่องชั่งที่อ่านละเอียดถึง 4 ตำแหน่งหรือมากกว่าในหน่วยกรัม (g.)
3. เตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ (ช่วง 600 °C ถึง 1200 °C)

วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างที่จะส่งทดสอบบดไล่ความชื้นเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชม. อุณหภูมิ 110±5 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง
2. ชั่งตัวอย่างทดสอบ(เถ้าปาล์มน้ำมัน) 1 กรัม บันทึกค่า แล้วนำไปใส่เตาเผา ปรับอุณหภูมิที่ 750±50 °C (ASTM C311/C311M) เป็นเวลา 15 นาที
3. หลังการเผา 15 นาที นำตัวอย่างที่ได้ออกมาชั่ง บันทึกค่า จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิเดิมอีกครั้ง แต่คราวนี้ ให้เผาครั้งละ 5 นาที ครบแล้วนำออกมาชั่ง บันทึกค่า ทำเช่นนี้เรื่อยๆ จนกว่าน้ำหนักของเถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง
4. คำนวณค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้จากสูตร (ASTM C311/C311M)

$$\text{Loss on ignition, \%} = (A/B) \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ A = น้ำหนักหลังจากการเผา
B = น้ำหนักก่อนการเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) เถ้าปาล์มน้ำมัน



(ข.) เครื่องชั่ง



(ค.) เตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ทดสอบ LOI

3.2.2 ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ ของการนำเถ้าลอยชั้นคุณภาพ N (Class N) ซึ่งเป็นปอซโซลานจากธรรมชาติมาใช้ได้ ก็ต่อเมื่อมีค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ต้องไม่เกินร้อยละ 34 โดยใช้วิธีร่อนเปียก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) แนะนำว่าการจะนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ให้ได้ผลดี ต้องให้ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 เพราะการบดไม่เพียงพอเพิ่มความละเอียด แต่จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ลดช่องว่างหรือโพรงฟองในเนื้อเถ้าปาล์มน้ำมันจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น (ทราบได้จากค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นจากตารางที่ 2.5 เพิ่มจาก 1.97 เป็น 2.33 เมื่อบดนานขึ้น ค่าร้อยละที่ค้างเหลือ 1.5 จาก 41.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. ถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียด 4 ซม.
2. ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
3. เครื่องชั่งที่อ่านละเอียดถึง 4 ตำแหน่งหรือมากกว่าในหน่วยกรัม (g.)
4. บีกเกอร์ (สำหรับเป็นภาชนะ)
3. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้



(ก.) ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 325

(ข.) บีกเกอร์



(ค.) ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ทดสอบร้อยละสะสมของน้ำหนักที่คั่งอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบ

1. ชั่งถ้ำปาล์มน้ำมัน 1 กรัมค้อยๆ เทลงบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 μm) ที่แห้งและสะอาด



2. ใช้หัวฉีดน้ำแบบฝอยฉีดลงบนตะแกรงร้อนที่มีถ้ำอยู่ให้ทั่วประมาณ 1 นาที ขณะนั้นให้หมุนตะแกรงเป็นวงกลมในแนวราบ ใช้ผ้าซับด้านใต้ตะแกรง
3. นำไปเข้าเตาอบประมาณ 2 ชม. ที่อุณหภูมิ 105 ± 5 $^{\circ}\text{C}$ และชั่งหาส่วนที่เหลือ



4. คำนวณร้อยละที่ค้างดังนี้

$$R_C = R_S \times (100 + C) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	R_c	=	ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรง
	R_s	=	น้ำหนักของซีเมนต์ที่ค้ำบนตะแกรง
	C	=	ค่าความคลาดเคลื่อนของตะแกรง ปกติมีค่าประมาณ +30%

5. หากค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้ำอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 5 ให้บดเพิ่ม (อ้างอิงจากงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ให้ต่ำกว่าร้อยละ 5 จะทำให้การทำปฏิกิริยาได้ดี)

3.2.3 การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency)

เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency) ที่เท่ากัน คือ $110 \pm 5\%$ เป็นตัวควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มาตรฐาน ASTM C230 กำหนดให้ใช้อัตราส่วน ปูน : ทราย ที่ 1 : 2.75 ในการทดสอบ แต่งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้อัตราส่วน ปูน : ทราย ที่ 1 : 2.5 เพราะผู้วิจัยเลือกอัตราส่วน ปูน : ทราย ในการทำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่ 1 : 2.5 เพื่อให้เกิดความสัมพันธ์กัน และเพราะปริมาณทรายที่มากเกินไป (1 : 2.75) จะทำให้คอนกรีตมวลเบาที่กำลังลดลงเมื่อเทียบที่ความหนาแน่นเดียวกัน (1 : 2.5) ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติด้านรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) กำหนดไว้

อุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด
3. ทรายละเอียดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100
4. ชุดทดสอบการไหล (Flow Table)
5. เครื่องผสมมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C305
5. เครื่องชั่ง
6. เวอร์เนียคาลิเปอร์ ขนาด 30 cm.
7. นาฬิกาจับเวลา
8. เกรียงก่อ
9. Tamper สำหรับกระทุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(ข.) ชุดทดสอบการไหล (Flow Table)



(ค.) Tamper สำหรับกระทุ้ง

(ง.) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ขนาด 30 cm.(อันล่าง)



(จ.) เครื่องชั่ง

(ฉ.) เครื่องผสมมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ต้าร์ (Mortar Consistency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบ

1. ผสมซีเมนต์ต่อทรายในอัตราส่วน 1 : 2.5 โดยน้ำหนักให้พอดีกับขนาดที่จะบรรจุลงในแบบ (ใช้ปูน 200 กรัม ทราย 500 กรัม จะล้นกรวยทองเหลืองชนิดหนอย) กวนให้เข้ากันในเครื่องผสมมอร์ตาร์
2. ใช้น้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เริ่มที่ 0.60, 0.61, 0.62... (จนกว่าจะได้ค่าการกระจายในชั้นตอนสุดท้ายที่ $110 \pm 5\%$) ผสมกับซีเมนต์และทรายในชั้นตอนที่ 1 กวนให้เข้ากัน เทลงในแบบทองเหลือง กระทุ้งสองชั้น ปาดผิวให้เรียบด้วยเกรียง แล้วค่อยๆ ยกแบบขึ้น
3. หมุนลูกเบี้ยวของโต๊ะควบคุมการไหล เพื่อให้งานกระแทกให้ได้ 25 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 ± 1 วินาที
4. ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์ 4 แนว แล้วหาค่าเฉลี่ย



5. คำนวณการกระจายจาก

$$\text{อัตราการกระจาย} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (3.3)$$

โดยที่ D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ตาร์แนว
แล้วหาค่าเฉลี่ย

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของกรวยทองเหลือง

6. ทำวิธีเดียวกันนี้กับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์ม 10% (แทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนัก) และ 20%

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นตัวควบคุมในการสร้างคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ คือ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่การไหลแผ่เดียวกัน ($110 \pm 5\%$) เพราะจากการสำรวจผู้ประกอบการหลายๆ คน แนะนำว่าการใช้อัตราส่วนน้ำน้อยอาจทำให้กำลังอัดสูงขึ้น แต่มีความลำบากในการผสมและผลิต ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุประสาน (w/b) ที่ความสามารถเทได้ (Workability) เพื่อให้ง่ายต่อการผสม สามารถนำไปใช้จริง และนำมาเปรียบเทียบกับ (ค่าการไหลแผ่เดียวกัน $110\pm 5\%$) ถึงข้อดีข้อด้อย ได้ค่าดังตารางที่ 3.1

3.2.4 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) ได้กำหนดค่าการดูดซึมน้ำไว้ตามตารางที่ 2.8 ในงานวิจัยนี้จำกัดขอบเขตการศึกษาที่ความหนาแน่น $1200-1600 \text{ kg/m}^3$ (เกรด C12-C16) โดยความหนาแน่น 1200 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 23% ส่วนความหนาแน่น 1400 kg/m^3 และ 1600 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 20% หากเกินนี้ถือว่าใช้ไม่ได้

ในขั้นตอนการทำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ จะเหมือนกันในขั้นตอนการเตรียมคอนกรีตมวลเบา เพื่อการทดสอบคุณสมบัติ 4 อย่าง ประกอบด้วย

- อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
- กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
- อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

ซึ่งจะอธิบายขั้นตอนการทำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศไว้ ณ ตรงนี้

***อุปกรณ์การทำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นต่างๆ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด
3. น้ำ
4. ทรายละเอียดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100
5. นํ้ายาโฟม
6. เครื่องผสมคอนกรีตหรือโม้
7. บั้มลม
8. เครื่องฉีดโฟม
9. เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ
10. เครื่องชั่ง
11. ถังน้ำ
12. อุปกรณ์หาความหนาแน่น (kg/m^3)

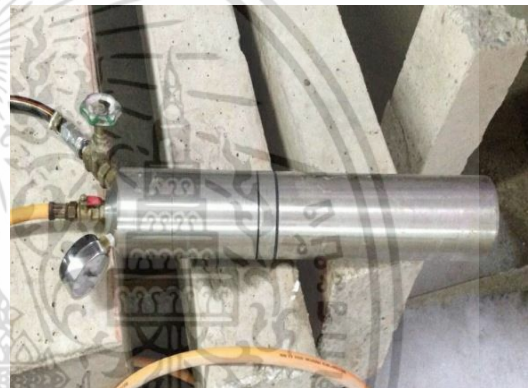
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) เครื่องผสมคอนกรีต



(ข.) น้ำยาโพน

(ค.) อุปกรณ์หาความหนาแน่น (kg/m³)

(ง.) เครื่องฉีดโพน



(จ.) เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ



(ฉ.) ปั่นลม

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์การทำคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

***วิธีผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผสมน้ำยาในอัตราส่วน น้ำยา : น้ำ เท่ากับ 1 : 25 (สามารถผสมได้ 1 : 20 ถึง 1 : 30) ลงในถัง
2. ต่อสายเครื่องเพิ่มแรงดันน้ำด้านนอกเข้ากับเครื่องฉีดโฟม และสายยางด้านน้ำเข้าลงในถังที่ผสมน้ำยาโฟมกับน้ำ (ในขั้นตอนที่ 1)
3. ต่อบั๊มลมเข้าเครื่องฉีดโฟม คูรูปที่ 3.6 (ง.) จะเห็นมีสองสายต่อเข้าเครื่องฉีดโฟม แล้วลองฉีดโฟม โดยลักษณะโฟมที่ดีต้องมีขนาดเล็กเฉลี่ยกัน



4. ผสมปูนและทรายละเอียดในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง) อัตราส่วน 1 : 2.5 (ไม่มีมวลรวมหยาบ) ลงในเครื่องผสมหรือโม้ โดยในส่วนของปูนจะใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ร้อยละ 0 ร้อยละ 10 กับร้อยละ 20 กวนให้เข้ากันในเครื่องผสม ใส่ลงในอัตราส่วนที่ได้จากการหาค่าความชื้นเหลือในการทดลองที่ 3.2.3 การทดสอบความชื้นเหลือของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency) ลงในโม้แยกเป็นกรณีไป จะได้ทั้งหมด 3 กรณี ตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนซีเมนต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต่อทราย

ร้อยละการแทนที่ในซีเมนต์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน	Cement : Sand	Water to Binder Ratio (W/B)	Density (kg/m ³)	Grade
0	1 : 2.5	0.64	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16
10	1 : 2.5	0.67	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16
20	1 : 2.5	0.69	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาปริมาตรได้แน่นอนในการตรวจสอบความหนาแน่น โดยให้ปริมาตรพอดีกับเกรียงก่อสร้างสามารถปาดผิวหน้าได้



6. คำนวณหาความหนาแน่นจากสูตร

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (kg/m^3)
 m = มวลของวัสดุ (kg.)
 V = ปริมาตรความจุของอุปกรณ์ เท่ากับ $0.00013973105 \text{ m}^3$

ในการคำนวณตามสมการ 3.4 ต้องหักกลบน้ำหนักของวัสดุออกด้วย ตัวอย่างการคำนวณพิจารณารูปในขั้นตอนที่ 5 รูปขวา จะได้น้ำหนัก 509.11 g. นน.อุปกรณ์ 216.44 g.

จะได้ น้ำหนักมอร์ตาร์(ยังไม่เติมฟอง) = $509.11 - 216.44 = 292.67 \text{ g.} = 0.29267 \text{ kg.}$

จากสมการ (3.4) หาความหนาแน่น $\rho = 0.29267 / 0.00013973105 = 2094.52 \text{ kg/m}^3$

โดยความหนาแน่นของมอร์ตาร์(ยังไม่ผสมโฟม) ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด จะอยู่ในช่วง $2095 \pm 10 \text{ kg/m}^3$

7. ค่อยๆ ฉีดน้ำยาโฟมที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 ลงในโม้ กวนจนกว่าจะเข้ากันดี เช็ความหนาแน่นเหมือนขั้นตอนที่ 6 จนกว่าจะได้ความหนาแน่นที่ต้องการ

***ข้อแนะนำ ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา (มอร์ตาร์+โฟม) ที่ความหนาแน่นใดๆ ต้องเผื่อความหนาแน่นนั้นไปอีก 150 kg/m^3 เพราะมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) กำหนดความหนาแน่นต่อนอบแห้ง ฉะนั้นเมื่ออบแห้ง ความหนาแน่นจะหายไป $160 - 200 \text{ kg/m}^3$ เช่น จะผลิตความหนาแน่น 1600 kg/m^3 ต้องออกแบบที่ 1750 kg/m^3 เมื่ออบแห้งความหนาแน่นจะเหลือ $1550 - 1590 \text{ kg/m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

1. คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)
 - ความหนาแน่น 1200 (CT-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (CT-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (CT-C16)
2. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10)
 - ความหนาแน่น 1200 (P10-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P10-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P10-C16)
3. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20)
 - ความหนาแน่น 1200 (P20-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P20-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P20-C16)
4. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 15x15x15 cm.
5. เหล็กกระทง
6. ตู้อบ
7. ผ้าสำหรับซับน้ำ
8. เครื่องชั่ง
9. เวอร์เนียคาลิเปอร์ ขนาด 20 cm.
10. พลาสติกห่อคอนกรีต



รูปที่ 3.7 แบบหล่อคอนกรีต 15x15x15 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบ

1. ตักคอนกรีตมวลเบา (CT) หรือคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (P10 และ P20) ทั้ง 3 ความหนาแน่น (1200, 1400 และ 1600 kg/m³) จากขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า ใส่ลงในแบบหล่อคอนกรีต 15x15x15 cm. ที่ทาน้ำมันแล้ว โดยในหนึ่งความหนาแน่นจะผลิต 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นค่าเฉลี่ย และจำนวนที่ต้องผลิต ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนคอนกรีตมวลเบาที่ต้องทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

ประเภท	ความหนาแน่น (1200,1400,1600)	วัน(14)	W/B	จำนวน/ความ หนาแน่น	จำนวน ทั้งหมด
CT	3	1	1	3	9
P10	3	1	1	3	9
P20	3	1	1	3	9

2. ใช้เหล็กกระทงเพื่อใส่ช่องว่างภายใน ปาดหน้าให้เรียบ ใช้พลาสติกห่อคอนกรีตคลุมผิวหน้าเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้ 24 ชม.



3. หลังจากครบ 24 ชม. แกะคอนกรีตออกจากแบบใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์วัดขนาดโดยมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้ที่ ± 1 mm. แล้วนำไปบ่มน้ำ 13 วัน จะได้คอนกรีตอายุ 14 วัน

4. ให้บ่มขึ้นทดสอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 ± 5 °C ไม่น้อยกว่า 24 ชม. และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชม.

5. ชั่งมวลทดสอบแต่ละก้อนเป็นมวลเมื่อแห้ง บันทึกค่า

6. แช่ตัวอย่างในน้ำสะอาด 24 ชม. แล้วยกออก ใช้ผ้าเช็ดน้ำออกก่อนชั่งใหม่ภายใน 3 นาที มวลที่ได้ถือเป็นมวลขึ้นทดสอบเมื่อเปียก กรณีไม่ผ่านให้นำไปอบอีกครั้งแล้วทำเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วิธีคำนวณ

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ A = อัตราการดูดซึมน้ำ เป็นร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)
 m_1 = มวลของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง เป็นกรัม
 m_2 = มวลของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก เป็นกรัม

3.2.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อน คุณสมบัตินี้มีความสำคัญสำหรับการลดการใช้พลังงานของอาคาร นั่นคือ ถ้าความสามารถในการนำความร้อนได้น้อย จะทำให้ภายในอาคารมีอุณหภูมิต่ำลงจึงช่วยประหยัดพลังงานแก่อาคารนั้น ค่าการนำความร้อนสามารถทดสอบได้หลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสมและประเภทของชิ้นทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีทดสอบโดยการอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C518

อุปกรณ์

1. คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)
 - ความหนาแน่น 1200 (CT-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (CT-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (CT-C16)
2. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10)
 - ความหนาแน่น 1200 (P10-C12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนาแน่น 1400 (P10-C14)
- ความหนาแน่น 1600 (P10-C16)
- 3. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20)
 - ความหนาแน่น 1200 (P20-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P20-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P20-C16)
- 4. แบบหล่อขนาด 30x60x8 cm. (หลังจากบ่มแล้วจึงตัดครึ่งเป็น 30x30x8 cm.)
- 5. เหล็กกระทง
- 6. เวอร์เนียบาลิปเปอร์ ขนาด 30 cm.
- 7. พลาสติกห่อคอนกรีต



รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีต 30x60x8 cm.

วิธีการทดสอบ

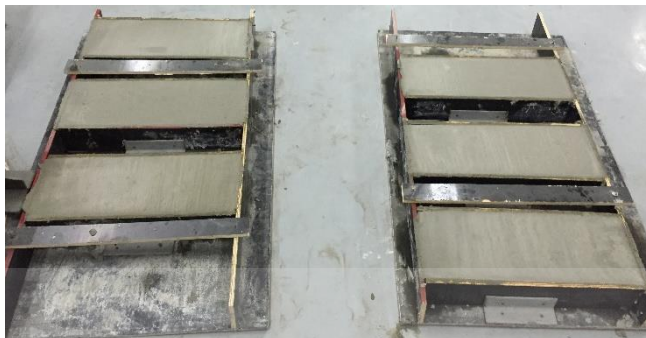
1. ตักคอนกรีตมวลเบา (CT) หรือคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (P10 และ P20) ทั้ง 3 ความหนาแน่น (1200, 1400 และ 1600 kg/m³) จากขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบา (หัวข้อ 3.2.4) ที่ทำน้ำมันแล้ว ใส่ลงไปในแบบหล่อคอนกรีต 30x60x8 cm. โดยในหนึ่งความหนาแน่นจะผลิต 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นค่าเฉลี่ย และจำนวนที่ต้องผลิต ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ทดสอบการนำความร้อน

ประเภท	ความหนาแน่น (1200,1400,1600)	วัน(28)	W/B	จำนวน/ความ หนาแน่น	จำนวน ทั้งหมด
CT	3	1	1	2	6
P10	3	1	1	2	6
P20	3	1	1	2	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เหล็กกระทุ้งเพื่อไล่ช่องว่างภายใน ปาดหน้าให้เรียบ ใช้พลาสติกห่อคอนกรีตคลุมผิวหน้า เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้ 24 ชม.



3. หลังจากครบ 24 ชม. แกะคอนกรีตออกจากแบบใช้เวอร์เนียวัดขนาด แล้วนำไปบ่มน้ำ 27 วัน จะได้คอนกรีตอายุ 28 วัน

4. ให้อบชิ้นทดสอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 ± 5 °C ไม่น้อยกว่า 24 ชม. และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชม.

5. ตัดครึ่งชิ้นทดสอบจากขนาด $30 \times 60 \times 8$ cm. 1 ชิ้น จะได้ $30 \times 30 \times 8$ cm. 2 ชิ้น

6. ส่งชิ้นตัวอย่างทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518 (ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ) หรือถ้ามีเครื่องมือทดสอบสามารถหาค่าการนำความร้อนได้จากสูตร

$$\text{ค่าการนำความร้อน (k)} = \frac{Q}{A} \times \frac{L}{\Delta T} \quad (3.6)$$

เมื่อ	Q	คือ	ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วย วัตต์ (W)
	A	คือ	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วย ตารางเมตร (m^2)
	L	คือ	ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วย เมตร (m)
	ΔT	คือ	อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูง และด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วย เคลวิน (K)

3.3 การทดสอบสมบัติทางกล

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ก็คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ได้แก่ การยืดหดตัว การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความสามารถในการรับน้ำหนัก การทนต่อการสึกหรอ ในส่วนงานวิจัยนี้จะทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาอยู่ 2 เรื่อง คือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

เนื่องจากน้ำหนักที่เบาเพราะเกิดโพรงฟองจากน้ำยาโฟม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจึงลดตามไปด้วย มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) กำหนดกำลังรับแรงอัดของความหนาแน่น 1200, 1400 และ 1600 kg/m³ ที่อายุ 28 วัน ตามตารางที่ 2.6 โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (CT) กับคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (P10 และ P20) เพื่อให้สามารถนำผลที่ได้ไปออกแบบใช้งานจริงได้

อุปกรณ์

1. คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)
 - ความหนาแน่น 1200 (CT-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (CT-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (CT-C16)
2. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10)
 - ความหนาแน่น 1200 (P10-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P10-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P10-C16)
3. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20)
 - ความหนาแน่น 1200 (P20-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P20-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P20-C16)
4. แบบหล่อขนาด 15x15x15 cm.
5. เหล็กกระทง
6. เวอร์เนียคาลิเปอร์ ขนาด 20 cm.
7. พลาสติกห่อคอนกรีต
8. เครื่องทดสอบแรงอัดที่สามารถควบคุมอัตราแรงอัดได้ 1.125–4.5 กิโลนิวตัน/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงอัด

วิธีการทดสอบ

1. ตักคอนกรีตมวลเบา (CT) หรือคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (P10 และ P20) ทั้ง 3 ความหนาแน่น (1200, 1400 และ 1600 kg/m³) จากขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบา (หัวข้อ 3.2.4) ที่ทาน้ำมันแล้ว ใส่ลงในแบบหล่อคอนกรีต 15x15x15 cm. โดยในหนึ่งความหนาแน่นจะผลิต 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นค่าเฉลี่ย และจำนวนที่ต้องผลิต ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การทดสอบกำลังอัด

ประเภท	ความหนาแน่น (1200,1400,1600)	วัน (3,7,14,28)	W/B	จำนวน/ความ หนาแน่น	จำนวน ทั้งหมด
CT	3	4	1	3	36
P10	3	4	1	3	36
P20	3	4	1	3	36

2. ใช้เหล็กกระทุ้งเพื่อไล่ช่องว่างภายใน ปาดหน้าให้เรียบ ใช้พลาสติกห่อคอนกรีตคลุมผิวหน้าเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำชื้นทิ้งไว้ 24 ชม.

3. หลังจากครบ 24 ชม. แกะคอนกรีตออกจากแบบใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดขนาดโดยมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้ที่ ± 1 mm. แล้วนำไปบ่มน้ำให้ได้อายุคอนกรีต 3, 7, 14 และ 28 วัน จึงนำขึ้นจากน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่ออายุคอนกรีตครบ ให้อบขึ้นทดสอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 ± 5 °C ไม่น้อยกว่า 24 ชม. และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชม. จากนั้นให้ทดสอบกำลังอัดโดยควบคุมอัตราแรงอัดให้อยู่ในช่วง 1.125 ถึง 4.5 กิโลนิวตัน/วินาที

3.3.2 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

การทดสอบจะใช้ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด $4 \times 4 \times 16$ cm. อ้างอิงมาตรฐาน ญี่ปุ่น JIS A 1129 ทำการวัดขนาดตัวอย่างทดสอบทั้งหมดทุกวันโดยเครื่องมือวัด Autogenous Shrinkage

อุปกรณ์

1. คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)
 - ความหนาแน่น 1200 (CT-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (CT-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (CT-C16)
2. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10)
 - ความหนาแน่น 1200 (P10-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P10-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P10-C16)
3. คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20)
 - ความหนาแน่น 1200 (P20-C12)
 - ความหนาแน่น 1400 (P20-C14)
 - ความหนาแน่น 1600 (P20-C16)
4. แบบหล่อขนาด $4 \times 4 \times 16$ cm.
5. Gauge plug (น็อตตัวผู้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm.)
5. เหล็กกระทง
6. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ขนาด 20 cm.
7. พลาสติกห่อคอนกรีต
8. เครื่องวัดการยืดหดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) แบบหล่อขนาด 4x4x16 cm.



(ข.) เครื่องวัดการยัดหดตัว

รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

วิธีการทดสอบ

1. ตักคอนกรีตมวลเบา(CT) หรือคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน(P10 และ P20) ทั้ง 3 ความหนาแน่น (1200, 1400 และ 1600 kg/m³) จากขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบา (หัวข้อ 3.2.4) ที่ทำน้ำมันติดตั้ง Gauge plug แล้ว ใส่ลงในแบบหล่อคอนกรีต 4x4x16 cm. โดยในหนึ่งความหนาแน่นจะผลิต 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นค่าเฉลี่ย และจำนวนที่ต้องผลิต ตามตารางที่ 3.5

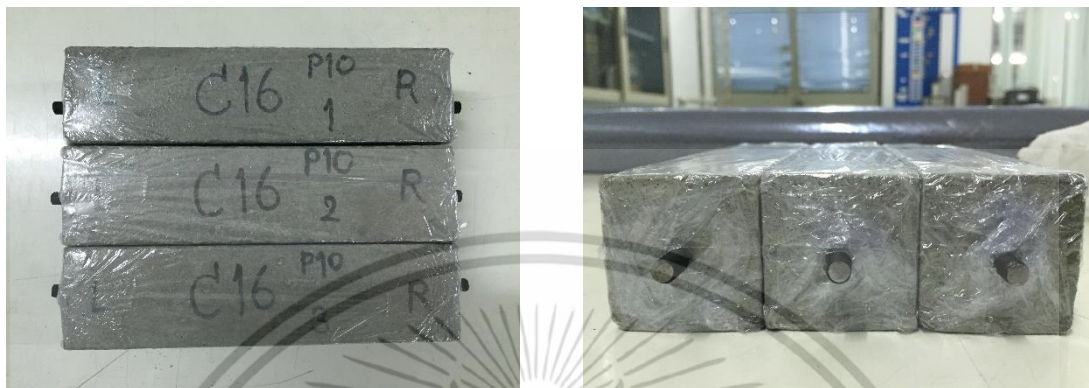
ตารางที่ 3.5 การทดสอบอัตราการหดตัว

ประเภท	ความหนาแน่น (1200,1400,1600)	W/B	จำนวน/ความหนาแน่น	จำนวน ทั้งหมด
CT	3	1	3	9
P10	3	1	3	9
P20	3	1	3	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เหล็กกระทุ้งเพื่อไล่ช่องว่างภายใน ปาดหน้าให้เรียบ ใช้พลาสติกห่อคอนกรีตคลุมผิวหน้าเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำขึ้น ทิ้งไว้ 24 ชม.

3. หลังจากครบ 24 ชม. แกะคอนกรีตออกจากแบบใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์วัดขนาด บันทึกเป็นค่าเริ่มต้น ใช้พลาสติกห่อทั้งก้อนไว้



4. ทำการวัดขนาดตัวอย่างทดสอบทั้งหมดทุกวันโดยเครื่องมือวัด Autogenous Shrinkage เป็นเวลา 28 วัน หรือมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

บทนี้จะกล่าวถึง ผลจากการดำเนินงานวิจัยซึ่งต่อเนื่องมาจากบทที่ 3 จะแสดงผลการทดสอบเป็นลำดับเช่นกัน ตั้งแต่ ผลการทดสอบเชิงจุลภาค ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และผลการทดสอบสมบัติทางกล โดยมีการเปรียบเทียบ นำเสนอในรูปแบบตาราง กราฟ ประกอบความเข้าใจ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาและนำไปใช้ได้ โดยมีรายละเอียดจะเรียงลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบเชิงจุลภาค

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

Chemical Composition (%)	เถ้าปาล์มน้ำมัน
Silicon Dioxide (SiO ₂)	47.6
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	1.66
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	2.37
Calcium Oxide (CaO)	11.9
Potassium Oxide (K ₂ O)	6.96
Magnesium Oxide (MgO)	4.55
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.84
Manganese(II) oxide (MnO)	0.13
Titanium Oxide (TiO ₂)	0.11
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0
Loss On Ignition (LOI)	14.2

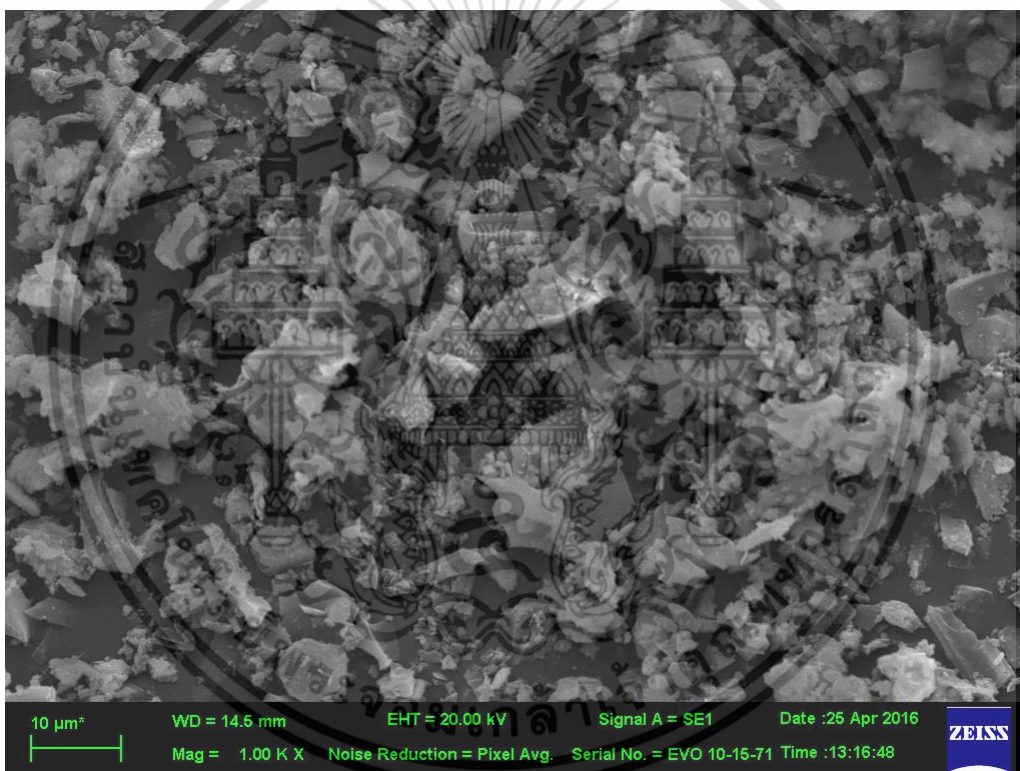
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าออกไซด์หลักสำหรับการเป็นวัสดุพอลิเมอร์ คือ ซิลิกา (SiO₂) ร่วมกับอลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มีค่าร้อยละ 51.63 ซึ่งใกล้เคียงชั้นคุณภาพ C (Class C) ตามตารางที่ 2.1 และปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) มีปริมาณสูง ซึ่งมักจะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรงทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวยึดประสาน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โดยรวมแล้วองค์ประกอบเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ถือว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำไปใช้ได้ ที่ต้องระวังคือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ASTM C618 กำหนดไว้ คือไม่เกินร้อยละ 10

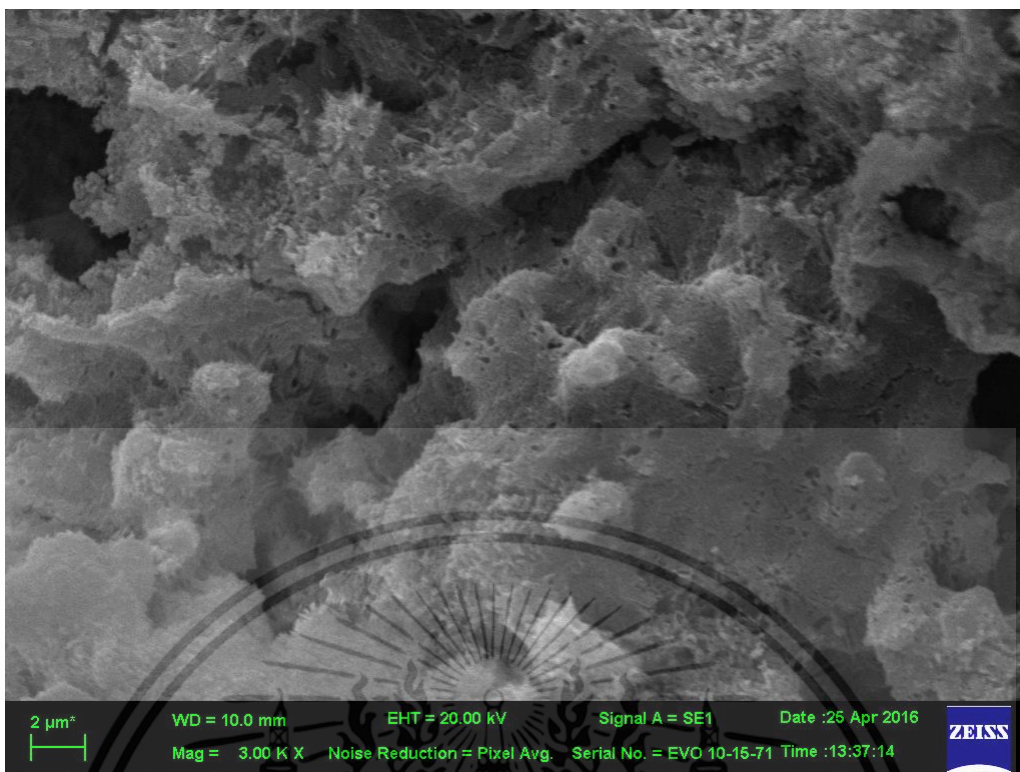
4.1.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน โดยผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย เถ้าปาล์มน้ำมัน, คอนกรีตมวลเบา, คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และ คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.4

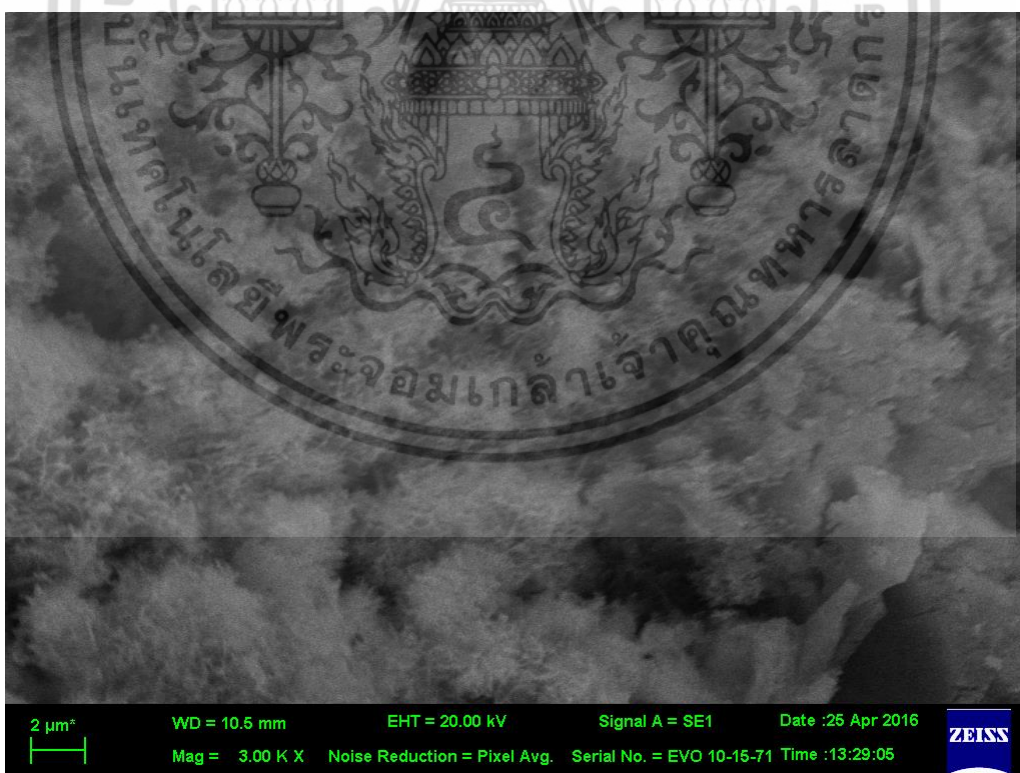


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

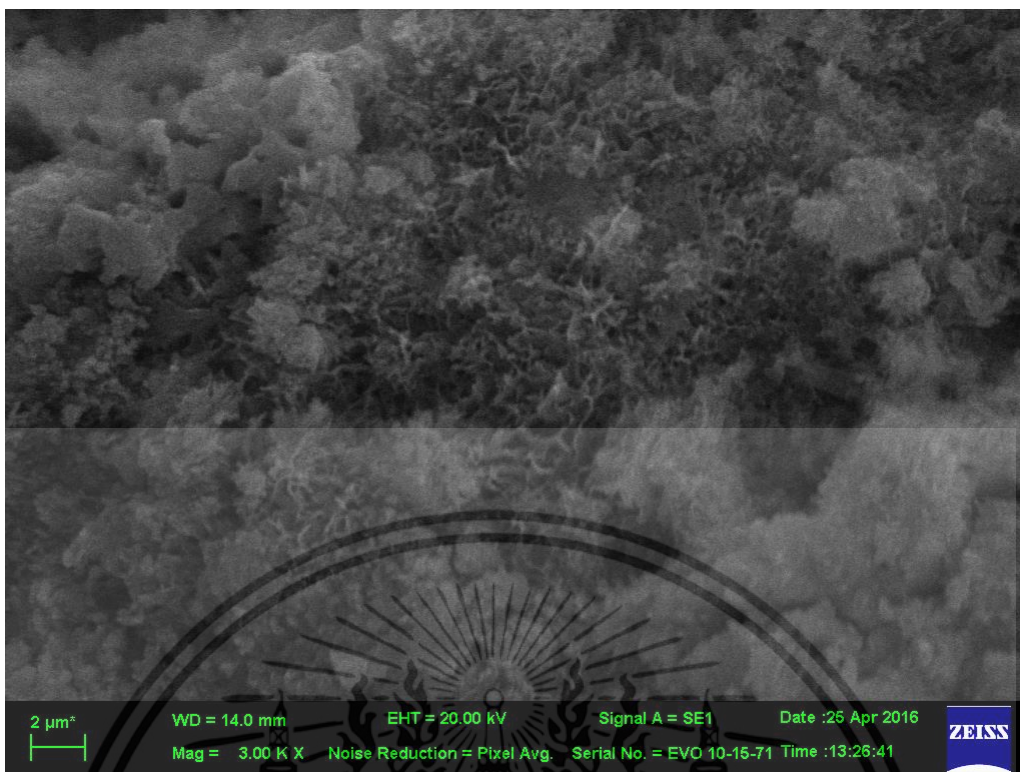


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายคอนกรีตมวลเบา ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

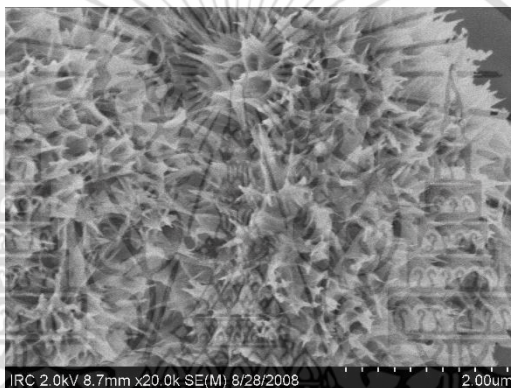
จากรูปที่ 4.1–4.4 แสดงการถ่ายภาพวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของ เถ้าปาล์ม น้ำมัน, คอนกรีตมวลเบา, คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และคอนกรีตมวลเบาผสม เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ตามลำดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีอนุภาคเป็น เหลี่ยมมุม ขรุขระ ไม่แน่นอน ภาพถ่ายขยายของคอนกรีตมวลเบา(รูปที่ 4.2) เมื่อเทียบกับภาพถ่าย ขยายของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 และคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 20 (รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นระหว่างอนุภาคว่าเถ้า ปาล์มน้ำมันเนื่องจากอนุภาคเล็ก(กว่าปูนซีเมนต์) จะเข้าไปอุดรูพรุนระหว่างซีเมนต์และเป็นตัวช่วยยึด ผสานทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงน้อยลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดซ้ำภาพที่ 4.2–4.4 ได้จาก การตัดชิ้นทดสอบที่มีอายุมากกว่า 28 วัน แล้วส่งวิเคราะห์ภาพถ่าย และเพื่อให้เห็นภาพโครงสร้างที่ ชัดเจนยิ่งขึ้น ในรูปที่ 4.5 เป็นภาพถ่ายขยาย 20,000 เท่าของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งเกิด จากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ระหว่างปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำและจะได้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H) ด้วย ดังสมการ (2.1)–(2.3)



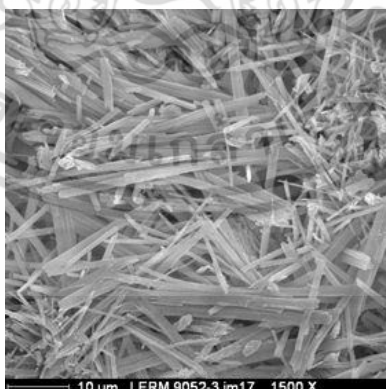
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์หรืออลูมินา (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน มีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ทำให้อุดรุกรุนในคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ดังรูปที่ 4.3-4.4 เมื่อเทียบกับรูป 4.2 ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นลักษณะของเอ็ทริงไทต์ (Ettringite) ซึ่งจะมีขนาดใหญ่มากกว่า $10 \mu\text{m}$. ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.2-4.4 ลักษณะที่ได้จากภาพถ่ายจะมีขนาดและลักษณะไม่ตรงกันจึงไม่ใช่เอ็ทริงไทต์



รูปที่ 4.5 ภาพขยาย 20,000 เท่าของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)



รูปที่ 4.6 ภาพขยาย 1,500 เท่าของเอ็ทริงไทต์ (Ettringite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.2.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)

ตามตารางที่ 2.1 แต่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) สูงกว่ามาตรฐาน ASTM C618 กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 10 สืบเนื่องมาจากทางสถาบันวิจัยที่ส่งตัวอย่างทดสอบใช้อุณหภูมิในการทดสอบสูงถึง 1100 °C ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C311/C311M กำหนดอุณหภูมิสำหรับการทดสอบวัสดุพอลิโพรพิลีนที่ 750±50 °C เท่านั้น ซึ่งค่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ที่สูงนี้ ทำให้ความต้องการน้ำในการผสมคอนกรีตสูงขึ้น และถ้ามากกว่าร้อยละ 20 จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำลง แต่ในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบา (แทนที่โดยน้ำหนัก ร้อยละ 10 กับร้อยละ 20) มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) กำหนดกำลังอัดขั้นต่ำที่อายุคอนกรีต 28 วันไว้ตามตารางที่ 2.6 จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการศึกษาและการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งถ้าผลการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) ก็จะเป็นทางเลือกที่ดีในการลดปริมาณที่ละมาก ๆ

4.2.2 ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

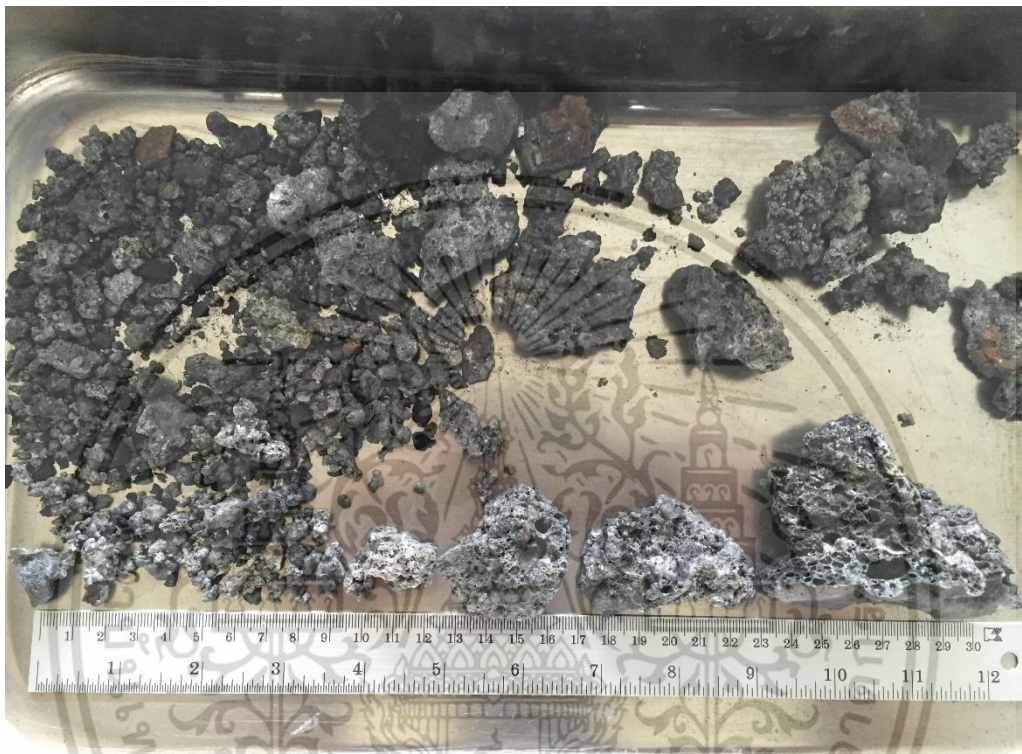
เถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเปียก (Wet Ash) การนำมาใช้ต้องอบแห้งก่อน แล้วจึงร่อน ผู้วิจัยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อแยกสิ่งเจอปนที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออก ในการบดเถ้าแต่ละรอบรอบละ 7 หม้อบด (Pot Mill) จะทำการหาค่าร้อยละสะสมทุกครั้งหลังบดเสร็จ โดยจะใช้เถ้าปาล์มน้ำมันก็ต่อเมื่อค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 5 คำนวณจากสมการ (3.2)

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาบดและค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325

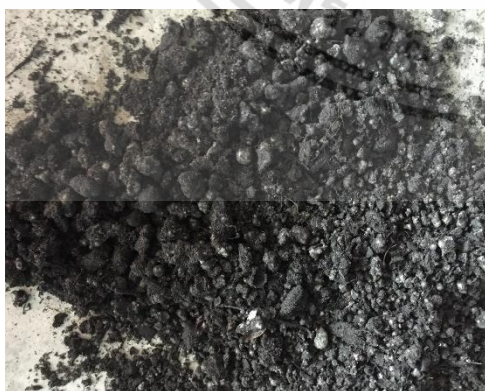
ระยะเวลาบด (ชั่วโมง)	ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325
4	23.54
5	14.27
6	5.92
7	3.76

ใช้เวลาบด 7 ชม. ค่าค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 จึงเหลือร้อยละ 3.76 ซึ่งถือว่าใช้เวลานานมากหากจะนะไปใช้ และเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

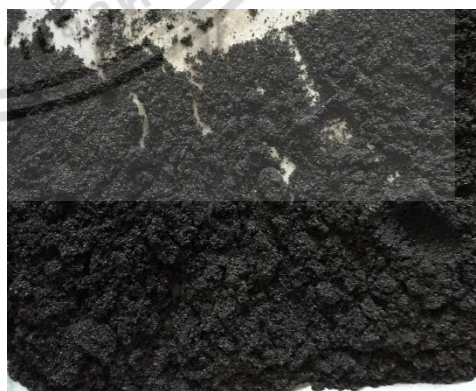
เวลาแค่ 3 ชม. เพราะร้อนแยกสิ่งเจอปนที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Slag) ออก โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 16 ที่ละเอียดกว่า การบดจึงใช้เวลาน้อยกว่าเพราะสแลก (Slag) ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์นี้มีความแข็งมากเมื่อจับกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น โดยสแลกดังกล่าวเกิดจากการเผาอะลาปาล์มที่อุณหภูมิไม่สูงพอ (ต่ำกว่า 900 °C) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่อะลาปาล์มจึงไม่สลายตัวและจับกันเป็นก้อนและเป็นสแลก (Slag) ดังรูปที่ 4.7 (ก.)



(ก.) ขนาดของสแลก(Slag) ถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อนทิ้ง(ใช้ตะแกรงเบอร์ 10)



(ข.) ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10



(ค.) หลังร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10

รูปที่ 4.7 ถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดสอบความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency)

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นค่าความชื้นเหลวของมอร์ตาร์ (Mortar Consistency) ที่การไหลแผ่เท่ากัน คือ $110 \pm 5\%$ และอัตราส่วน ปูน : ทราย เท่ากับ 1 : 2.5 ได้ค่าดังตารางที่ 4.3

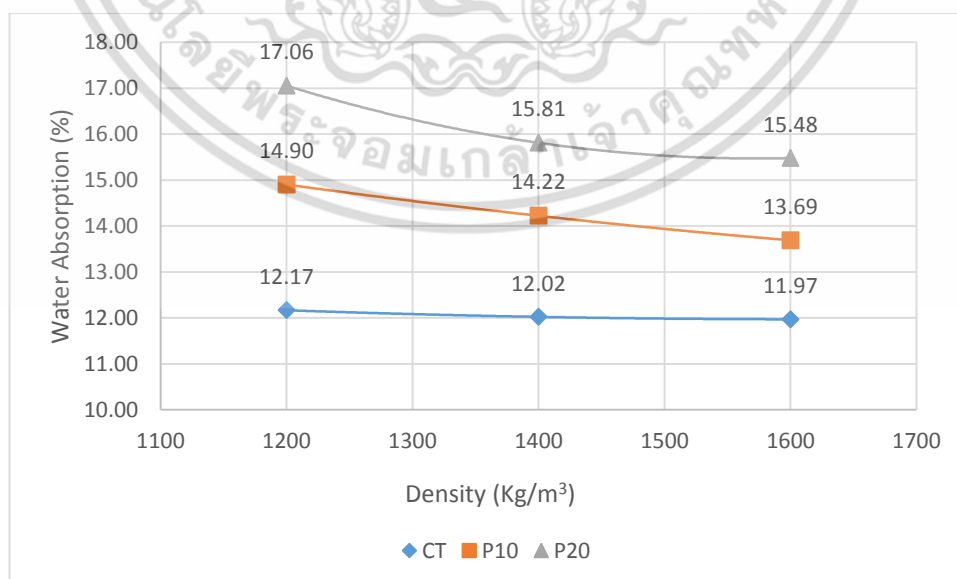
ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ประเภทมอร์ตาร์	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)
ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 0%	0.64
ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10%	0.67
ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20%	0.69

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ได้นี้ เป็นค่าที่ใช้ออกแบบคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศตามตารางที่ 3.1 ในการทดสอบคุณสมบัติอีก 4 อย่างได้แก่ อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption), ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

4.2.4 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) อายุคอนกรีต 14 วัน ตามรูปที่ 4.8



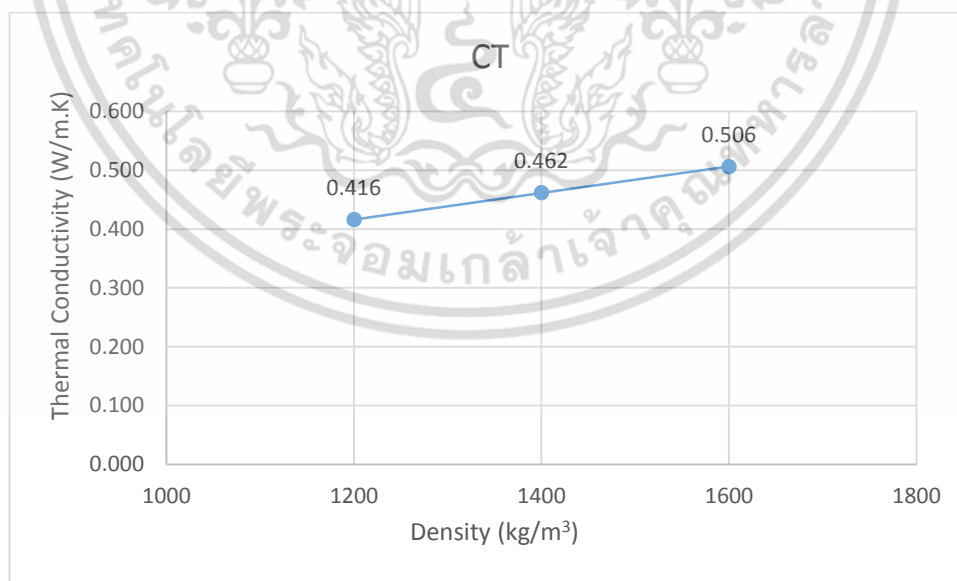
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นภาพไปรษณีย์บนด้านกระดาษไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ กำหนดอัตราการดูดซึมน้ำไว้ตามตารางที่ 2.8 ความหนาแน่น 1200 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 23% ส่วนความหนาแน่น 1400 kg/m^3 และ 1600 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 20% ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบผ่านเกณฑ์ทุกความหนาแน่น ทุกประเภทคอนกรีตมวลเบา เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ตามกราฟรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ยิ่งผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมาก อัตราการดูดซึมน้ำก็จะมากไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) สูง เพราะค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ในเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่ดูดน้ำมาก ทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์มากขึ้น ดังนั้นเมื่ออบแห้งแล้วนำไปป้อนน้ำอีก คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูญเสียน้ำ (จากการอบแห้ง) ก็จะดูดน้ำมากกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) และเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตชนิดเดียวกัน ความหนาแน่นที่มากกว่าจะมีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่า เพราะคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่นน้อยจะมีโพรงฟองภายในซึ่งเกิดจากน้ำยาฟองโฟมมาก จำทำให้มีการดูดซึมน้ำได้เยอะกว่า โดยรวมแล้วคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ชนิด มีเกณฑ์การดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556)

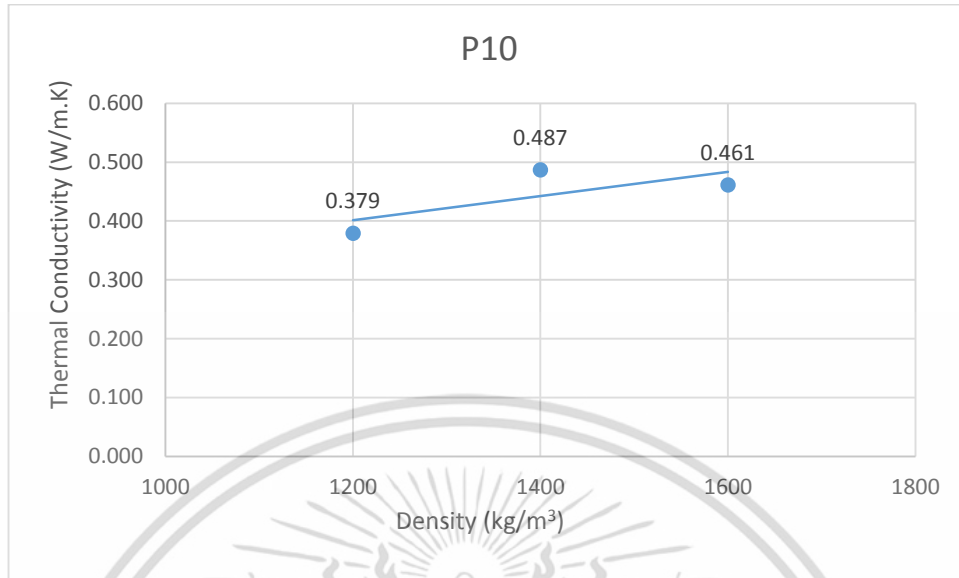
4.2.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ได้ค่าตามรูปที่ 4.9 – 4.11 เป็นค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท (CT, P10 และ P20) ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนทั้ง 3 ประเภท

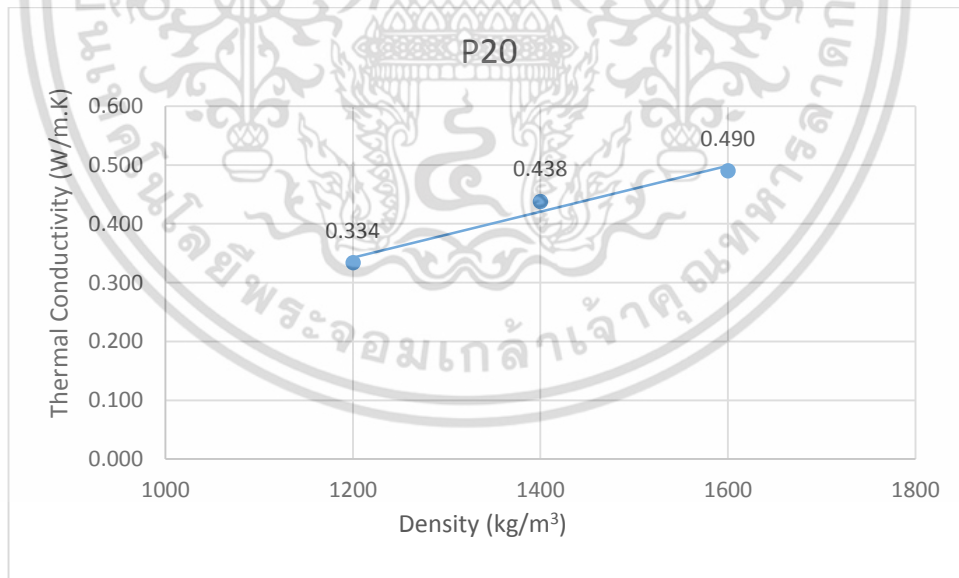


รูปที่ 4.9 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา (CT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

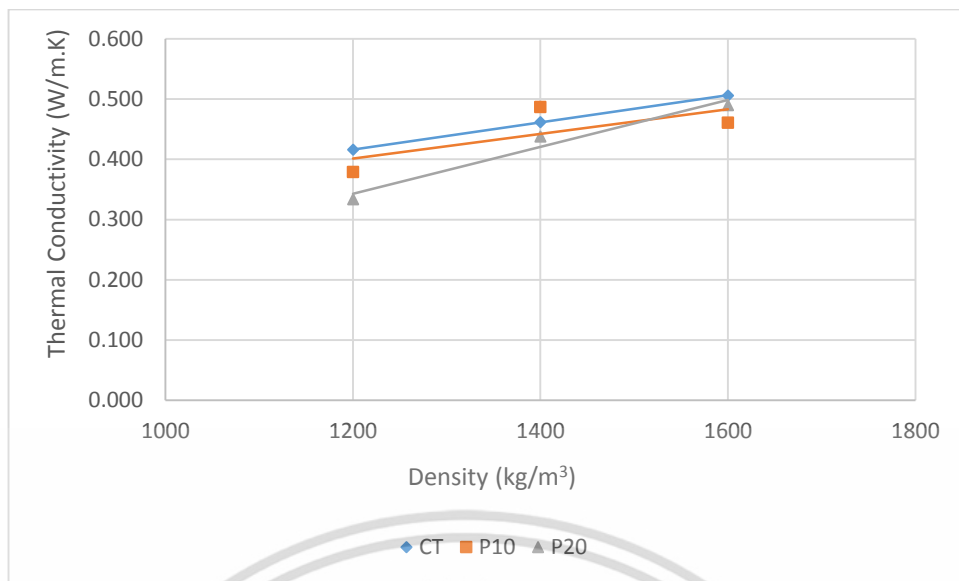


รูปที่ 4.10 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา (P10)



รูปที่ 4.11 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา (P20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท

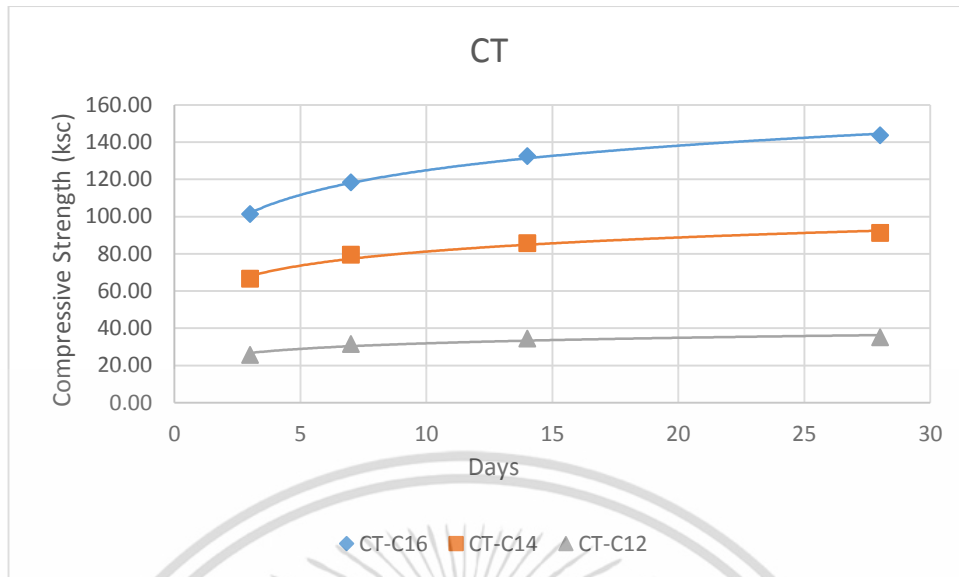
วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (k) ยิ่งมีค่ามากยิ่งนำความร้อนได้ดี แต่ไม่เหมาะนำมาเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้าง เพราะถ้าความสามารถในการนำความร้อนได้น้อย จะทำให้ภายในอาคารมีอุณหภูมิต่ำลงจึงช่วยประหยัดพลังงานแก่อาคารนั้น พิจารณารูปที่ 4.9 – 4.11 ค่าการนำความร้อน(k) มีค่าน้อยลงเมื่อความหนาแน่นคอนกรีตมวลเบา มีค่าน้อยลงด้วย เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาประเภทเดียวกัน นั่นคือ ความหนาแน่นที่เบาจะช่วยให้อุณหภูมิภายในอาคารต่ำและประหยัดพลังงานกว่า และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 เปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท (CT, P10 และ P20) แนวโน้มที่ควรจะเป็น (P10-C14 และ P10-C16 คลาสเคลื่อน) คือ คอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20) มีค่าการนำความร้อน (k) น้อยที่สุด ถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) และสูงสุดเป็นคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)

4.3 การทดสอบสมบัติทางกล

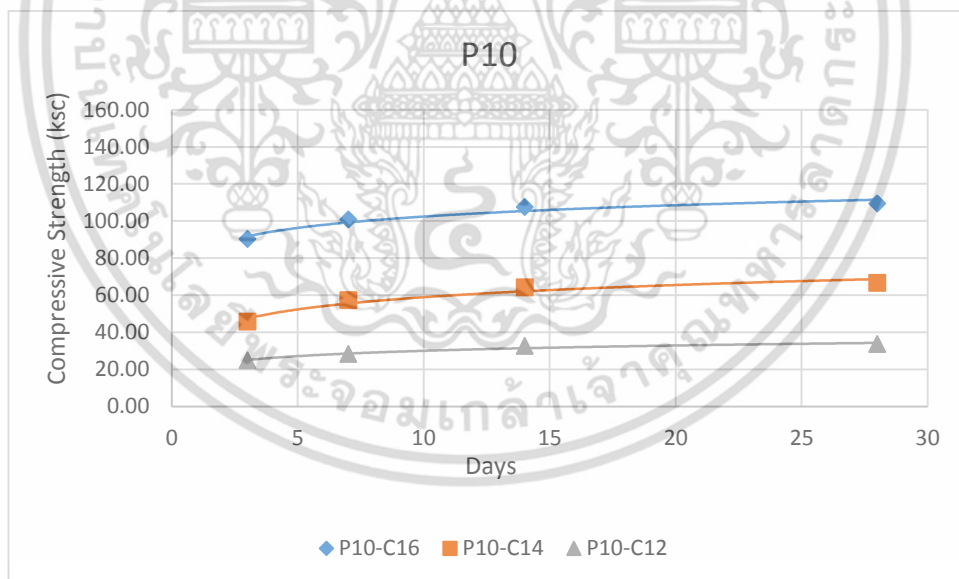
4.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท (CT, P10 และ P20) รูปที่ 4.13–4.15 และการเปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่นเดียวกัน (C12, C14 และ C16) รูปที่ 4.16 – 4.18 ที่อายุคอนกรีต 3, 7, 14 และ 28 วัน มาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) กำหนดกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไว้ตามตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

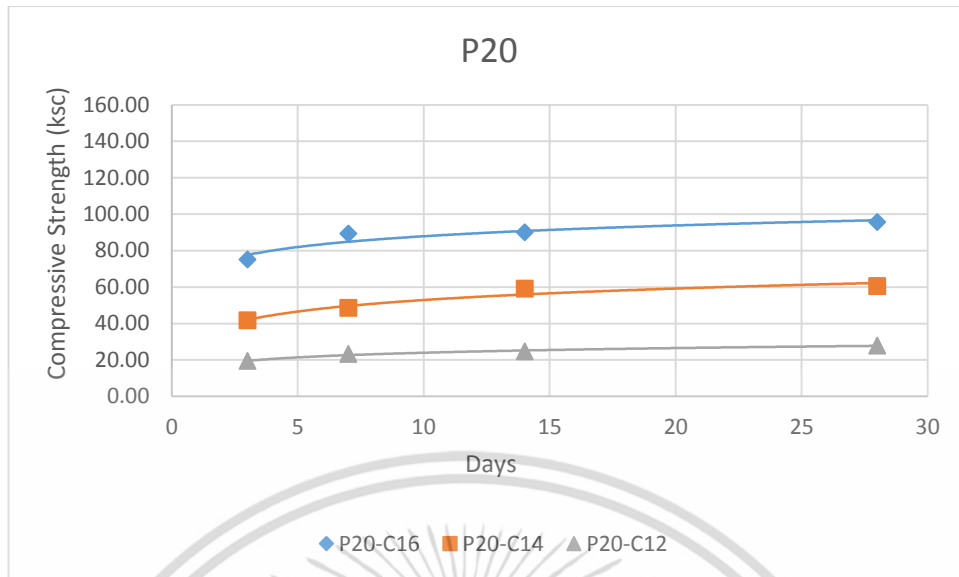


รูปที่ 4.13 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท CT ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

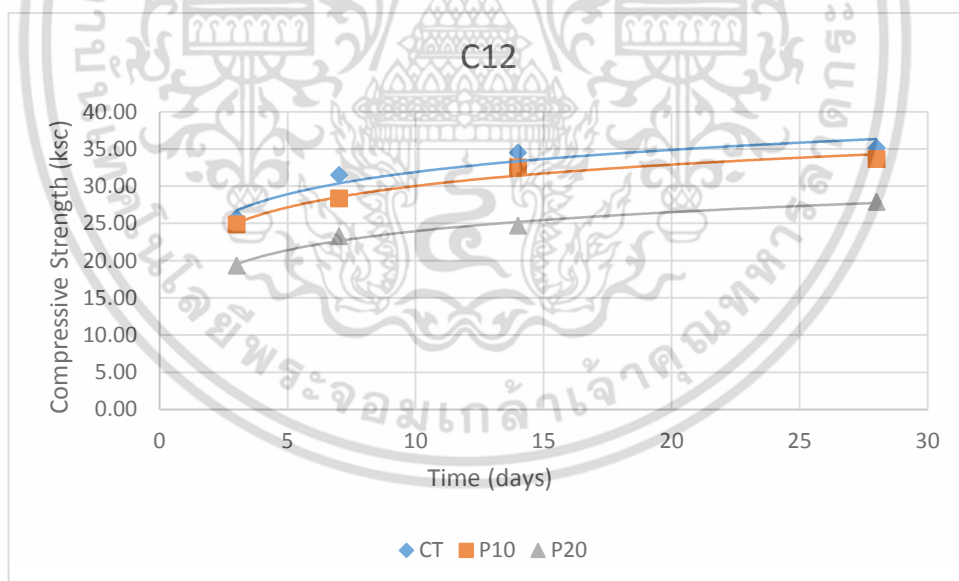


รูปที่ 4.14 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท P10 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

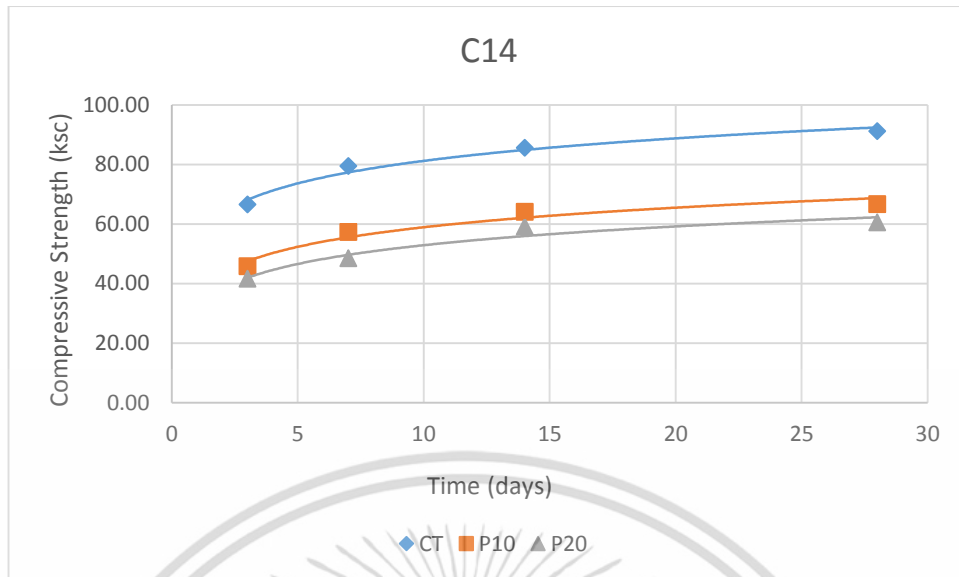


รูปที่ 4.15 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท P20 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

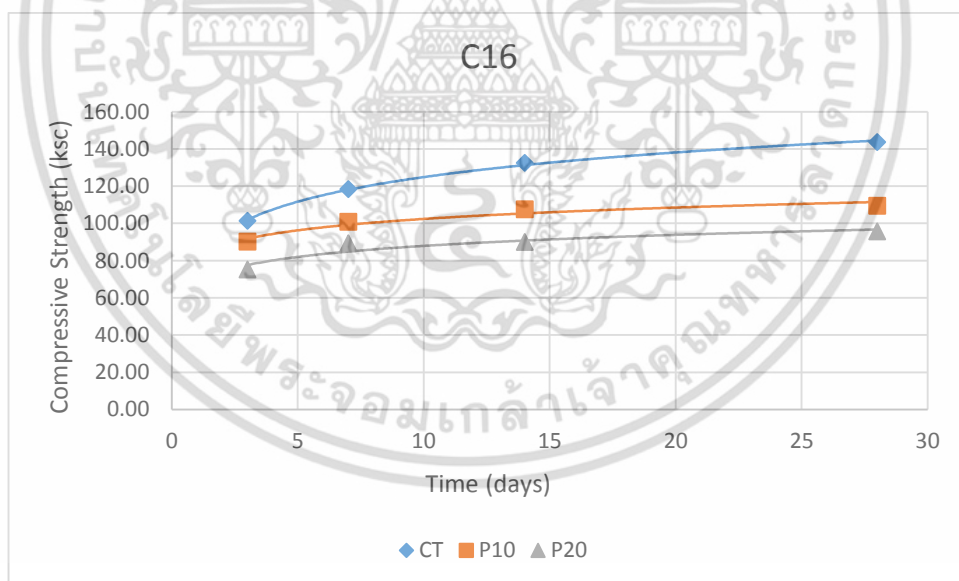


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1200 kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1400 kg/m³

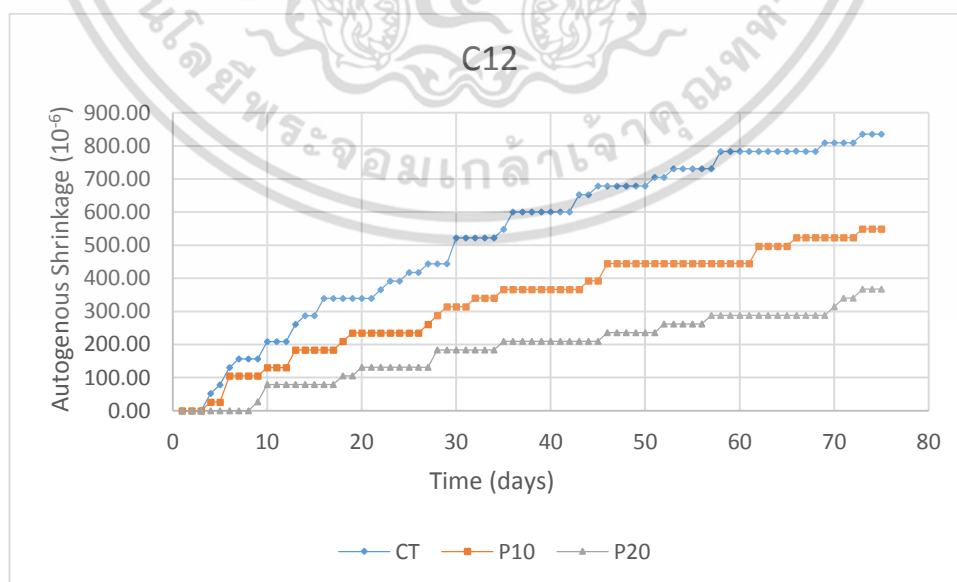


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1600 kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

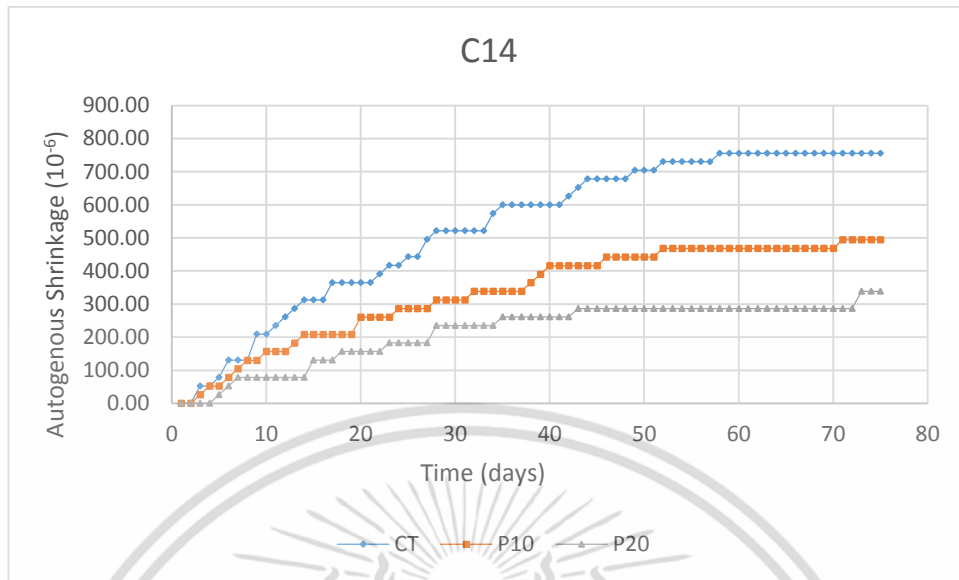
พิจารณารูปที่ 4.13–4.15 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาแปรผันตรงกับความหนาแน่นที่ลดลง เมื่อความหนาแน่นลดลงเนื่องจากความหนาแน่นภายในตัวคอนกรีต จะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยเกี่ยวกับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ก็ให้ผลไปในทางเดียวกัน จุดสำคัญของงานวิจัยนี้คือ การเปรียบเทียบกำลังอัดที่ความหนาแน่นหนักเดียวกัน (C12, C14 และ C16) เพื่อดูผลจากการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่โดยน้ำหนักวัสดุประสานร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) ตามรูปที่ 4.16-4.18 โดยการเปรียบเทียบนี้ต้องคำนึงถึง มอก. 2601-2556 ที่กำหนดกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาขั้นต่ำที่อายุ 28 วันไว้ว่า เกรด C12 ต้องไม่น้อยกว่า 25.5 ksc. เกรด C14 และ C16 ต้องไม่น้อยกว่า 51 ksc. และจากการสำรวจผู้ประกอบการ ส่วนใหญ่รับว่าปมคอนกรีตมวลเบาไม่ถึง 28 วัน โดยมากที่สุดคือ 14 วัน ด้วยเหตุผลเชิงพาณิชย์ ทั้งปริมาณการส่งจองที่สูง กับพื้นที่บ่อปมที่มีไม่สัมพันธ์กัน แต่ทั้งนี้ทั้งนี้ กำลังอัดที่ 14 วันก็มากพอเกินกว่า มอก. 2601-2556 ที่กำหนดไว้ 28 วัน และเมื่อกลับมาพิจารณารูปที่ 4.16 – 4.18 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) มีกำลังอัดสู้คอนกรีตควบคุม (CT) ไม่ได้ และคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20) เกรด C12 มีกำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์ตอนอายุคอนกรีต 14 วัน ก็เนื่องมาจากปริมาณซิลิกาและอลูมิน่า มีไม่พอจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพื่อเป็นตัวยึดประสานที่ดี ถ้าวัดกันที่อายุคอนกรีต 28 วัน ถือว่าผ่านเกณฑ์ มอก.2601-2556 ทุกค่า แต่ในทางปฏิบัติ ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นเอาไปใช้งานได้จริง ก็ต้องนึกถึงผู้ประกอบการจะสามารถนำไปใช้ได้ด้วย การจะนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในคอนกรีตมวลเบา เพื่อคุณสมบัติทางด้านกำลังอัด ควรใช้แทนที่โดยน้ำหนักซีเมนต์ร้อยละ 10 กำลังอัดจึงจะผ่านเกณฑ์ มอก.2601-2556 ตอนอายุ 14 วัน

4.3.2 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

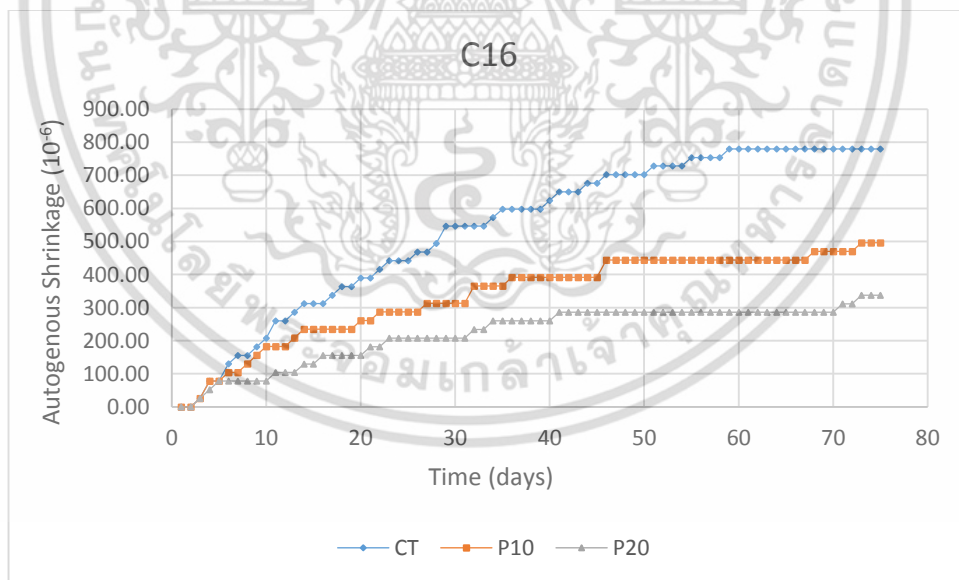


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C14



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19–4.21 การทดสอบค่าการหดตัวที่อายุคอนกรีต 75 วัน เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นในช่วง 1200 kg/m^3 ถึง 1600 kg/m^3 (เกรด C12–C16) ค่าการหดตัวของคอนกรีตควบคุม (CT) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ ในทุกชั้นคุณภาพ(เกรด C12–C16) อธิบายได้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดไปอุดรูพรุนระหว่างซีเมนต์ จึงลดช่องว่างระหว่างการยึดเกาะของซีเมนต์ จึงทำให้การหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโพลีผสมเถ้าปาล์มน้ำมันประกอบไปด้วยการทดสอบ 4 อย่างที่เป็นใจความสำคัญของงานวิจัยนี้ คือ

- 5.1.1 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- 5.1.2 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
- 5.1.3 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
- 5.1.4 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

โดยจะนำผลจากการทดสอบในบทที่ 4 มาสรุป ส่วนการทดสอบนอกเหนือจากนี้ เป็นการทดสอบเพื่อการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมากใช้กับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศซึ่งผลที่ได้ ดังแสดงในบทที่ 4

5.1.1 อัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) พิจารณามาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) โดยหน่วยน้ำหนัก 1200 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 23% ส่วนหน่วยน้ำหนัก 1400 kg/m^3 และ 1600 kg/m^3 ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 20% ผลการทดสอบบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาซึ่งหน่วยน้ำหนักน้อย ร้อยละการดูดซึมน้ำจะมาก หรือแปรผกผันกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) กับคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่เติมเถ้ามาก จะให้ค่าน้อยละการดูดซึมน้ำสูงที่สุด เพราะค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) สูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นถ่านดูดน้ำมาก เมื่อทำการอบแห้งคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันตามวิธีทดสอบ (มอก.2601-2556) แล้วนำไปบ่ม คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูญเสียน้ำ (จากการอบแห้ง) ก็จะดูดน้ำมากกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)

5.1.2 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) จากผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (k) คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ดีคือ เป็นฉนวนกันร้อน (ค่าการนำความร้อนต่ำ) จึงจะทำให้ภายในที่อยู่อาศัยอุณหภูมิไม่สูงและประหยัดพลังงาน วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (k) ยิ่งมีค่ามากยิ่งนำความร้อนก็จะสูง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตมวลเบาซึ่งหน่วยน้ำหนักน้อย ค่าการนำความร้อน (k) ก็จะน้อยลงด้วย เพราะค่าการนำความร้อนจะถ่ายโอนจากที่อุณหภูมิสูงไปต่ำ โดยโมเลกุลที่ได้รับความร้อนจะสั่นสะเทือนไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ความหนาแน่นมาก) กันไปเรื่อยๆ แต่ถ้าภายในมีความหนาแน่นน้อยอย่างกรณีโพรงในคอนกรีตมวลเบา การส่งถ่ายก็จะน้อยลง เป็นผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่า (โพรงเยอะ) จะเป็นฉนวนกันร้อนดีกว่า (นำความร้อนได้น้อย) คอนกรีตมวลเบาที่หน่วยน้ำหนักมากกว่า และเมื่อเทียบที่หน่วยน้ำหนักเดียวกันกับคอนกรีตทั้ง 3 ประเภท คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20) มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด ถัดมาเป็น คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) และคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) ซึ่งเถ้าโดยทั่วไปเป็นฉนวนกันร้อนอยู่แล้ว เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตมวลเบาก็ยิ่งทำให้คุณสมบัติด้านนี้เด่นขึ้นอีก

5.1.3 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 เกรด (C12, C14 และ C16) จะพิจารณาประกอบกับมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.2601-2556) เกรด C16 ได้ค่ากำลังอัดสูงสุด ถัดมาเป็นเกรด C14 และ C12 ตามลำดับ เพราะโพรงภายในคอนกรีตยิ่งมากความหนาแน่นจะน้อย ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงตาม เมื่อเทียบที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) มีค่ากำลังอัดสูงสุด ถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) กับร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ แม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันละเอียดจะไปอุดช่องว่างระหว่างซีเมนต์แต่เพราะองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน (ซิลิกาและอลูมินา) มีไม่มากพอจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ประกอบองค์ประกอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) มีค่าสูง จึงทำให้เถ้าดูดน้ำมาก เป็นผลให้กำลังอัดลดลง แต่เมื่อพิจารณาตาม มอก.2601-2556 กำหนดกำลังอัดขั้นต่ำตามตารางที่ 2.6 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ถือว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันสูงถึงร้อยละ 20 สามารถนำไปใช้ได้

5.1.4 อัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage) ผลการทดสอบวัดค่าการหดตัวเป็นเวลา 75 วัน ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกันค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20) มีอัตราการหดตัว ต่ำสุด ถัดมาเป็น คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) และคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) ตามลำดับ นั่นเพราะเถ้าปาล์มน้ำมันละเอียดจะไปอุดช่องว่างระหว่างซีเมนต์จึงทำให้ช่องว่างระหว่างซีเมนต์น้อยลงเป็นผลให้การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาลดลง ผกผันกับปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในซีเมนต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบผู้วิจัย ได้มองเห็นข้อควรระวัง ข้อต่อ และแนวทางในการพัฒนาจากการศึกษาข้อมูลเพื่อทำวิจัย โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ควรมีการตรวจสอบองค์ประกอบเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันชนิดเปียก(Wet Ash) ก่อนนำมาใช้ แม้ว่าในงานวิจัยจะมีการตรวจสอบองค์ประกอบเคมีแล้ว แต่เมื่อเทียบกับเถ้าลอยชนิดอื่น เช่นเถ้าลอยจากแม่เมาะ ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิในการเผา รวมทั้งตรวจสอบองค์ประกอบเคมีอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจำ จึงทำให้คุณภาพของเถ้าลอยอยู่ในเกณฑ์เดียวกัน ทั้งองค์ประกอบทางเคมีก็มีความเป็นวัสดุ
ปอซโซลานสูง

5.2.2 การบดเถ้าปาล์มให้ละเอียดควรใช้ตะแกรงร่อน ร่อนแยกสิ่งเจอบนที่มีขนาดใหญ่
เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออกโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 10 หรือที่ละเอียดกว่า เพราะสแลก(Slag)
จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีปริมาณมาก เมื่อจับตัวเป็นก้อนใหญ่จะมีความแข็งมากและต้องใช้เวลา
ในการบดนานขึ้น

5.2.3 การควบคุมความชื้นของทราย โดยทั่วไปทรายละเอียดที่สั่งซื้อมาจะมีความชื้นสูงมาก
การใช้ทรายโดยไม่ลดความชื้นจะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) สูงกว่าค่าที่หาได้จากการ
ทดสอบการไลแฉ่

5.2.4 การศึกษาเพิ่มเติมในด้านคุณสมบัติสำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ยัง
สามารถทำได้อีก เช่น การทดสอบทนไฟ หรือการทดสอบทนซัลเฟต ที่หน่วยน้ำหนักต่ำ

5.2.5 จากการศึกษาเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกาสูง แต่มีปริมาณปูนขาวอิสระ(CaO) ไม่เพียงพอ
ต่อการทำปฏิกิริยา ถ้านำมาใช้ร่วมกับเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งมีปูนขาวอิสระ(CaO) สูงในอัตราส่วนที่
พอเหมาะ อาจเป็นการใช้ประโยชน์สูงสุดจากเถ้าปาล์มอีกทางหนึ่ง



เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. “สถิติการเกษตรของประเทศไทย.” 2557. หน้า 57
- [2] American Society for Testing and Materials, **ASTM C618-15** (Approved Aug. 1, 2015.) “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.”
- [3] American Society for Testing and Materials, **ASTM C311/C311M-13** (Approved Feb. 1, 2013.) “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete1”
- [4] สุวัฒน์ งามจันทร์. “ผลกระทบของเถ้าขานอ้อย เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบต่อปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2556. หน้า 6-7.
- [5] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 7. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย(ส.ค.ท.). มีนาคม 2555. หน้า 333
- [6] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, ตุลาคม-ธันวาคม 2546. หน้า 459-474.
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มอก.2601-2556** “คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ.” 26 กรกฎาคม 2556
- [8] J.H. Tay. “Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material.” **Journal of Material in Civil Engineering, ASCE**, 1990, Vol.2, 94-105
- [9] Hussin, M.W. and Awal. “Palm Oil Fuel Ash A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction.” **Proceeding of the Interantional Conference on Urban Engineering in Asian Cities in 21st Century**, 1996, Bangkok, Thailand. D361-D366.
- [10] Vanchai Sata, Chai Jaturapitakkul and Kraiwood Kiattikomol. “Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete.” **Journal of Material in Civil Engineering, ASCE**, 2004, Vol.16, 623-628
- [11] Weerachart Tangchirapat, Tirasit Saeting and Chai Jaturapitakkul. “Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash.” **Construction and Building Materials**, 2007, Vol. 21, 1399-1405
- [12] ศิวะ วาสาลา. “การศึกษาผลของฟองอากาศในมวลเบาแบบ CLC ที่มีต่อแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] สุเมธ สันต์วัฒนา. “การทำนายคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [14] วัชรพงษ์ วงศ์เชียว. “การนำเถ้าหินมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตมวลเบา : สมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2551.
- [15] ประชุม คำพุ่ม และกิตติพงษ์ สุวีโร. “การศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบเสริมแผ่นยางธรรมชาติ.” รายงานการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2553.
- [16] ปณชัย โตวิชา. “ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อสภาพนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2551.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

- ก-1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition ; LOI)
- ก-2 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- ก-3 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
- ก-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)
- ก-5 ผลการทดสอบอัตราการหดตัว (Autogenous Shrinkage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

Eval2 V2.5.500 Admin 11/3/2015 10:03:01 AM
Sample: 583742-No.2
Measured on 11/2/2015 11:18:48 AM
Sample measured by Admin
Measurement method: Best Detection-Vac34mm

SiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl	MnO	TiO ₂
399.5 KCps	207.8 KCps	153.0 KCps	50.6 KCps	35.2 KCps	187.3 KCps	14.0 KCps	10.5 KCps	11.3 KCps	8.2 KCps	1.8 KCps
47.6 %	11.9 %	6.96 %	4.55 %	4.53 %	2.37 %	1.66 %	0.835 %	0.595 %	0.130 %	0.113 %
Na ₂ O	CuO	Cr ₂ O ₃	ZnO	Rb ₂ O	SrO	ZrO ₂	NiO	Br	V ₂ O ₅	CoO
0.4 KCps	12.4 KCps	1.3 KCps	7.3 KCps	23.7 KCps	20.7 KCps	15.1 KCps	0.7 KCps	0.9 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps
789 PPM	644 PPM	361 PPM	295 PPM	290 PPM	245 PPM	118 PPM	47.3 PPM	16.1 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM
Y ₂ O ₃	MoO ₃	Rh	Pd	Sb ₂ O ₃	GeO ₂	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	WO ₃	Sum	Compton
5.2 KCps	2.0 KCps	187.0 KCps	0.4 KCps	3.3 KCps	2.6 KCps	1.9 KCps	0.5 KCps	0.6 KCps		187.0 KCps
0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	02 %	79 %

Loss on Ignition (LOI) = 14.2%

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

Chemical Composition (%)	เถ้าปาล์มน้ำมัน
Silicon Dioxide (SiO ₂)	47.6
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	1.66
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	2.37
Calcium Oxide (CaO)	11.9
Potassium Oxide (K ₂ O)	6.96
Magnesium Oxide (MgO)	4.55
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.84
Manganese(II) oxide (MnO)	0.13
Titanium Oxide (TiO ₂)	0.11
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0
Loss On Ignition (LOI)	14.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก-2 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ตารางที่ ก-2.1 CT

CT							
Density	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก อบแห้ง	น้ำหนักบ่ม 1 คืน (หลังอบแห้ง)	Real density	การดูดซึมน้ำ (%)
1600	150.480	150.140	150.400	5.157	5.779	1517.659	12.061
	150.100	151.340	149.620	5.179	5.796	1523.778	11.913
	150.280	150.600	150.520	5.171	5.788	1517.938	11.932
	150.287	150.693	150.180	5.169	5.788	1519.777	11.969
1400	150.320	149.760	151.060	4.471	5.001	1314.748	11.854
	150.700	150.500	150.200	4.462	4.997	1309.815	11.990
	150.420	150.360	151.380	4.476	5.023	1307.325	12.221
	150.480	150.207	150.880	4.470	5.007	1310.616	12.022
1200	150.480	150.940	149.960	3.985	4.479	1169.957	12.396
	150.560	150.280	150.700	3.986	4.441	1168.997	11.415
	150.840	151.140	150.160	3.981	4.486	1162.899	12.685
	150.627	150.787	150.273	3.984	4.469	1167.273	12.165



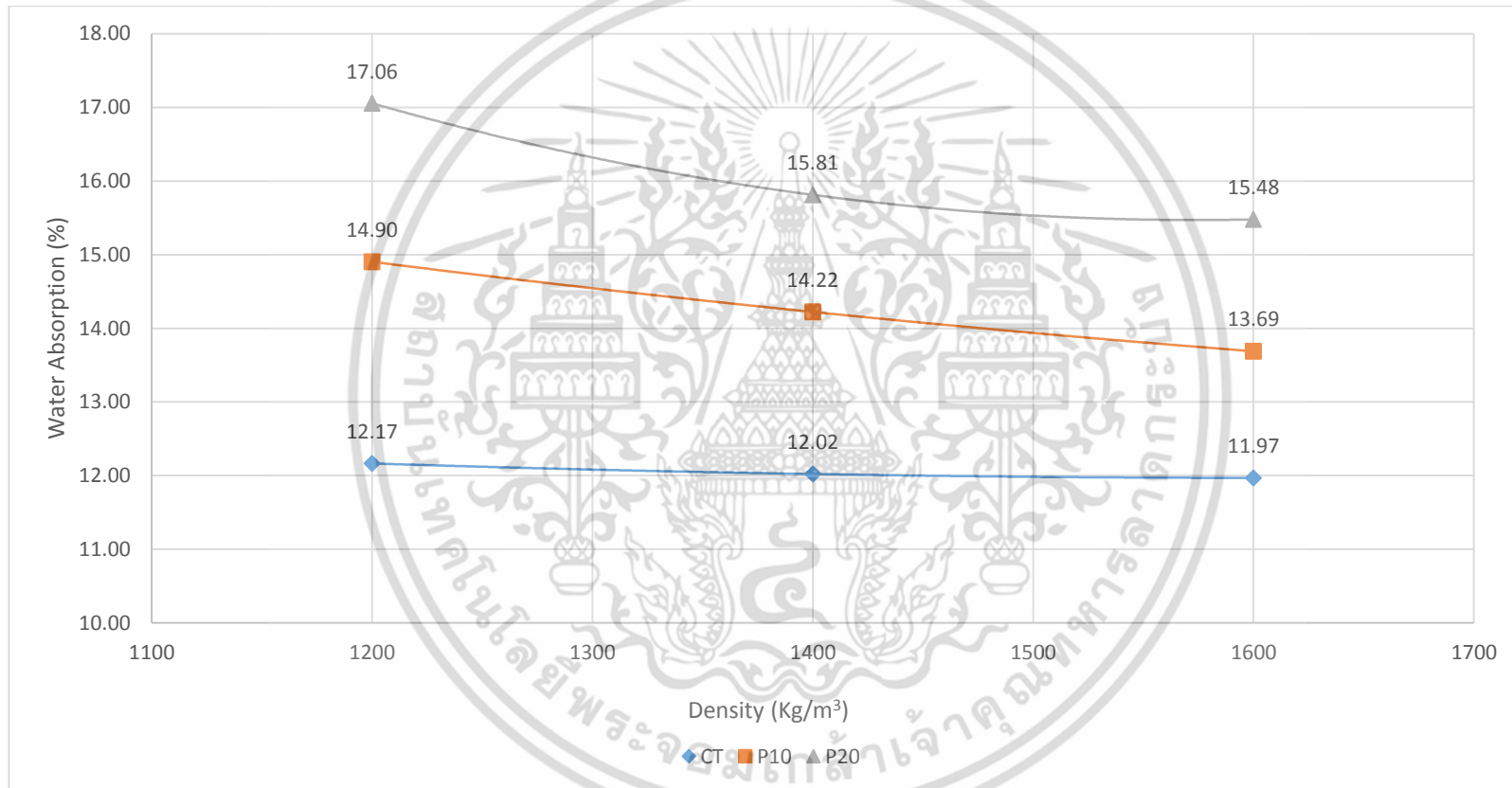
ตารางที่ ก-2.2 P10

P10							
Density	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก อบแห้ง	น้ำหนักบ่ม 1 คืน (หลังอบแห้ง)	Real density	การดูดซึ่ม (%)
1600	149.400	150.100	150.900	5.153	5.857	1522.789	13.662
	149.820	150.160	150.640	5.162	5.866	1523.188	13.638
	149.960	150.420	150.760	5.172	5.884	1520.867	13.766
	149.727	150.227	150.767	5.162	5.869	1522.280	13.689
1400	149.800	150.300	150.760	4.572	5.164	1346.943	12.948
	149.600	150.220	150.600	4.532	5.225	1339.077	15.291
	150.240	150.520	150.480	4.515	5.167	1326.781	14.441
	149.880	150.347	150.613	4.540	5.185	1337.590	14.223
1200	150.300	150.700	150.100	3.930	4.577	1155.952	16.463
	150.200	150.740	150.280	3.924	4.505	1153.266	14.806
	150.200	151.300	150.060	3.902	4.426	1144.230	13.429
	150.233	150.913	150.147	3.919	4.503	1151.142	14.903



ตารางที่ ก-2.3 P20

P20							
Density	กว้าง	ยาว	สูง	น้ำหนัก อบแห้ง	น้ำหนักบ่ม 1 คืน (หลังอบแห้ง)	Real density	การดูดซึม (%)
1600	149.280	150.600	149.820	5.086	5.868	1510.010	15.376
	149.300	150.600	150.240	5.083	5.866	1504.699	15.404
	149.120	150.120	150.820	5.084	5.880	1505.817	15.657
	149.233	150.440	150.293	5.084	5.871	1506.833	15.479
1400	149.820	150.700	150.060	4.480	5.186	1322.300	15.759
	149.600	151.400	149.300	4.474	5.183	1323.057	15.847
	150.340	149.820	151.680	4.485	5.195	1312.773	15.831
	149.920	150.640	150.347	4.480	5.188	1319.326	15.812
1200	149.920	149.980	150.740	3.886	4.570	1146.519	17.602
	149.880	150.800	150.200	3.875	4.545	1141.450	17.290
	149.600	150.680	150.520	3.866	4.495	1139.411	16.270
	149.800	150.487	150.487	3.876	4.537	1142.454	17.055



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท



ก-3 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)



ที่ วท 0307/ 5529

ถึง นายกฤตวิทย์ กันทะวงศ์

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ ตัวอย่าง คอนกรีตมวลเบา (CT) คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10) และคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20) หมายเลขปฏิบัติการ L59/02241.1 - L59/02241.9 จำนวน 9 ตัวอย่าง ตามคำร้อง เลขรับ L59/02241 วันที่ 10 พฤษภาคม 2559

พร้อมนี้ได้แนบผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ มาเพื่อทราบ

โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
โทร: 0 2201 7130
โทรสาร 0 2201 7127
E-mail : physics@dss.go.th

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
1 เมษายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบ วศ.1



กรมวิทยาศาสตร์บริการ

รายงานการทดสอบ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง	เครื่องหมาย / ตรา	หมายเลขปฏิบัติการ
คอนกรีตมวลเบา (CT) C12	-	L59/02241.1
คอนกรีตมวลเบา (CT) C14	-	L59/02241.2
คอนกรีตมวลเบา (CT) C16	-	L59/02241.3
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10) C12	-	L59/02241.4
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10) C14	-	L59/02241.5
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% (P10) C16	-	L59/02241.6
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20) C12	-	L59/02241.7
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20) C14	-	L59/02241.8
คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% (P20) C16	-	L59/02241.9

ผลการทดสอบ

โปรดดูหน้า 3/4 - 4/4

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

หมายเลขปฏิบัติการ L59/02241.1 - L59/02241.9

หมายเลขปฏิบัติการ	อุณหภูมิเฉลี่ย, องศาเซลเซียส	สภาพนำความร้อน, วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน
L59/02241.1	23.8	0.416
L59/02241.2	24.1	0.462
L59/02241.3	24.3	0.506
L59/02241.4	24.1	0.379
L59/02241.5	23.1	0.487
L59/02241.6	23.8	0.461
L59/02241.7	24.0	0.334
L59/02241.8	24.2	0.438
L59/02241.9	24.4	0.490

ชื่อผู้ให้บริการ นายกฤตวิทย์ กันทะวงศ์
ที่อยู่ผู้ให้บริการ 142/1 ม.11 ต.แม่คำ อ.แม่จัน จ.เชียงราย 57240
ลักษณะตัวอย่าง L59/02241.1 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 295 มม. x 195 มม. x 82 มม. และคอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 82 มม.
L59/02241.2 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 298 มม. x 194 มม. x 82 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 82 มม.
L59/02241.3 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 297 มม. x 194 มม. x 79 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 197 มม. x 79 มม.
L59/02241.4 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 296 มม. x 190 มม. x 81 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 81 มม.
L59/02241.5 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 299 มม. x 198 มม. x 81 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 299 มม. x 81 มม.
L59/02241.6 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 298 มม. x 194 มม. x 81 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 81 มม.
L59/02241.7 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 295 มม. x 195 มม. x 81 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 81 มม.
L59/02241.8 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชั้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 296 มม. x 190 มม. x 82 มม. และ คอนกรีตประกบด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 300 มม. x 82 มม.

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง ห้ามคัดลอกหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

หมายเลขปฏิบัติการ L59/02241.1 - L59/02241.9

ลักษณะตัวอย่าง L59/02241.9 คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ชิ้น โดยขึ้นทดสอบ ขนาด 295 มม. x 195 มม. x 81 มม. และ คอนกรีตประเภทด้านข้างทั้งสองด้าน ขนาด 50 มม. x 295 มม. x 81 มม.
วันที่ทดสอบ 11-18 พฤษภาคม 2559
วิธีทดสอบ ASTM C518-10

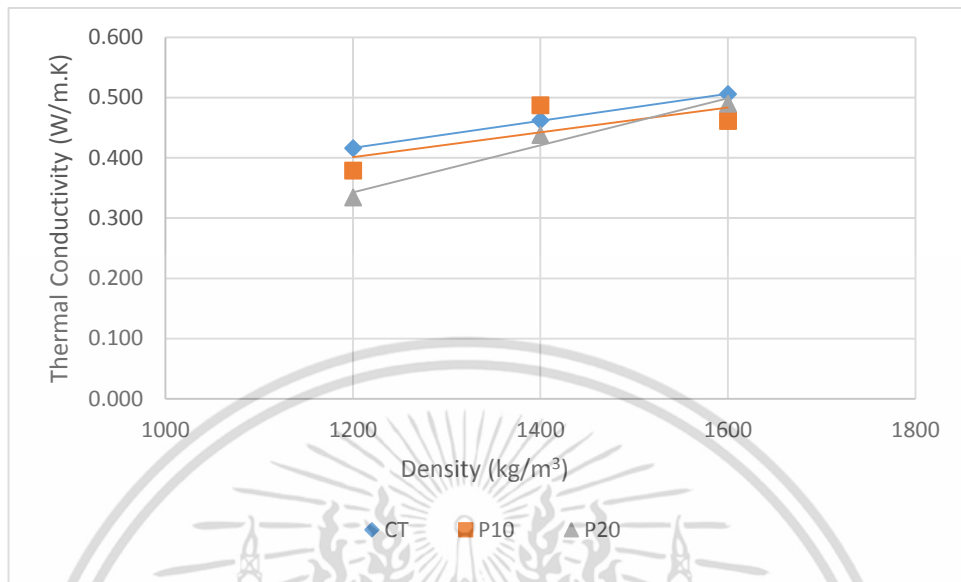
ผู้รับรอง
Asst. Donkhin
(นายสายัณห์ สุขพงษ์พันธ์)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

ผู้รายงาน
Asst
(นางสาวกรองทิพย์ เต็มเกาะ)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ



รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในกรณีใดๆอย่างถึง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ค่าการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ตารางที่ ก-4.1 CT-C16

CT-C16							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	150.400	151.080	150.000	5.186	1521.551	224.910	100.90
	150.900	150.800	150.720	5.206	1517.898	226.220	101.34
	150.380	150.180	149.980	5.276	1557.648	225.550	101.81
	150.560	150.687	150.233	5.223	1532.292	225.560	101.35
7	151.080	150.060	150.880	5.232	1529.552	270.510	121.63
	151.000	150.020	150.600	5.234	1534.202	252.560	113.65
	150.200	150.240	150.920	5.268	1546.833	265.420	119.90
	150.760	150.107	150.800	5.245	1536.846	262.830	118.39
14	150.780	150.100	150.400	5.205	1529.144	292.690	131.83
	150.540	150.440	150.600	5.211	1527.851	285.180	128.36
	150.360	151.340	149.720	5.213	1530.107	305.940	137.05
	150.560	150.627	150.240	5.210	1529.019	294.603	132.42
28	150.940	149.680	151.180	5.208	1524.785	314.940	142.10
	151.180	150.720	150.420	5.222	1523.583	323.950	144.93
	150.880	150.600	150.680	5.212	1522.272	320.520	143.79
	151.000	150.333	150.760	5.214	1523.536	319.803	143.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.2 CT-C14

CT-C14							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	151.380	150.420	150.420	4.684	1367.531	151.070	67.63
	151.380	150.580	150.200	4.696	1371.584	151.300	67.66
	150.900	150.800	150.140	4.698	1375.074	143.740	64.39
	151.220	150.600	150.253	4.693	1371.391	148.703	66.56
7	151.280	150.360	150.720	4.527	1320.462	172.430	77.27
	150.960	150.300	150.700	4.524	1323.087	176.930	79.49
	150.960	150.520	150.560	4.526	1322.966	181.440	81.40
	151.067	150.393	150.660	4.526	1322.170	176.933	79.39
14	151.180	150.140	150.600	4.494	1314.672	187.000	83.98
	151.200	150.500	150.200	4.474	1308.994	188.920	84.63
	150.880	149.960	150.700	4.482	1314.472	195.630	88.14
	151.087	150.200	150.500	4.483	1312.709	190.517	85.58
28	151.180	150.680	150.220	4.661	1362.076	215.960	96.64
	151.200	150.460	150.240	4.646	1359.317	198.010	88.72
	151.320	149.640	151.840	4.667	1357.399	195.700	88.10
	151.233	150.260	150.767	4.658	1359.575	203.223	91.16

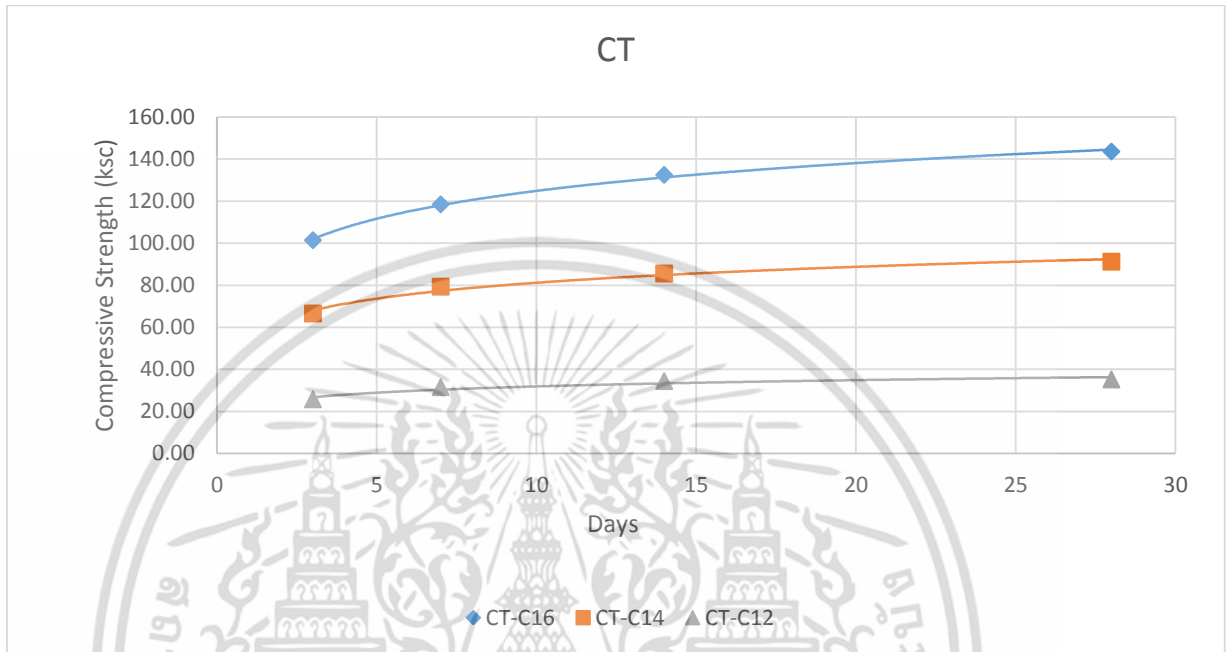
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.3 CT-C12

CT-C12							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	151.460	150.600	149.740	3.985	1166.722	58.220	26.02
	151.640	150.640	150.800	4.015	1165.548	56.220	25.09
	150.600	151.140	150.300	4.005	1170.683	57.940	25.95
	151.233	150.793	150.280	4.002	1167.643	57.460	25.68
7	151.080	150.480	150.500	4.081	1192.736	63.570	28.50
	151.180	150.400	151.100	4.084	1188.719	72.600	32.55
	151.160	150.280	150.400	4.069	1190.973	74.360	33.37
	151.140	150.387	150.667	4.078	1190.807	70.177	31.47
14	151.880	150.980	149.820	4.054	1180.032	74.950	33.32
	151.500	150.340	150.680	4.048	1179.499	79.040	35.37
	150.060	150.400	150.720	4.023	1182.678	76.830	34.70
	151.147	150.573	150.407	4.042	1180.720	76.940	34.46
28	150.860	151.280	150.020	3.984	1163.629	74.830	33.42
	150.560	150.840	150.260	3.984	1167.481	78.170	35.09
	151.280	150.520	150.400	3.990	1165.063	82.420	36.90
	150.900	150.880	150.227	3.986	1165.385	78.473	35.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท CT ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.4 P10-C16

P10-C16							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	149.900	150.200	150.420	5.258	1552.542	196.760	89.08
	150.200	150.680	150.000	5.257	1548.536	200.500	90.31
	150.900	150.060	151.020	5.314	1553.935	202.300	91.07
	150.333	150.313	150.480	5.276	1551.675	199.853	90.15
7	150.100	150.500	150.200	5.200	1532.556	222.870	100.57
	149.600	150.600	150.440	5.211	1537.451	227.240	102.82
	149.560	150.600	150.540	5.261	1551.586	218.320	98.81
	149.753	150.567	150.393	5.224	1540.527	222.810	100.73
14	150.300	150.120	150.700	5.207	1531.358	232.590	105.08
	150.540	151.300	150.000	5.222	1528.462	238.480	106.73
	149.960	150.800	150.340	5.212	1533.039	245.850	110.82
	150.267	150.740	150.347	5.214	1530.940	238.973	107.54
28	150.900	150.660	150.660	5.180	1512.323	236.250	105.93
	150.300	150.760	150.400	5.161	1514.401	254.170	114.34
	151.280	150.100	150.940	5.159	1505.217	240.470	107.95
	150.827	150.507	150.667	5.167	1510.634	243.630	109.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.5 P10-C14

P10-C14							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	150.840	151.020	150.100	4.498	1315.491	103.350	46.25
	151.000	150.160	150.640	4.563	1335.915	103.760	46.65
	150.500	150.500	150.800	4.556	1333.857	98.690	44.42
	150.780	150.560	150.513	4.539	1328.409	101.933	45.77
7	150.840	150.400	150.380	4.533	1328.713	130.970	58.85
	150.740	150.880	149.980	4.535	1329.486	130.680	58.57
	150.240	150.480	151.280	4.569	1335.904	120.690	54.42
	150.607	150.587	150.547	4.546	1331.361	127.447	57.28
14	150.780	150.520	150.400	4.507	1320.389	136.950	61.51
	150.900	149.840	150.800	4.508	1322.104	151.750	68.41
	151.400	150.780	150.020	4.492	1311.659	139.840	62.44
	151.027	150.380	150.407	4.502	1318.035	142.847	64.11
28	150.880	150.600	150.380	4.500	1316.939	159.230	71.43
	150.740	150.900	150.140	4.480	1311.789	142.880	64.03
	151.540	149.580	151.980	4.502	1306.827	143.270	64.43
	151.053	150.360	150.833	4.494	1311.817	148.460	66.63

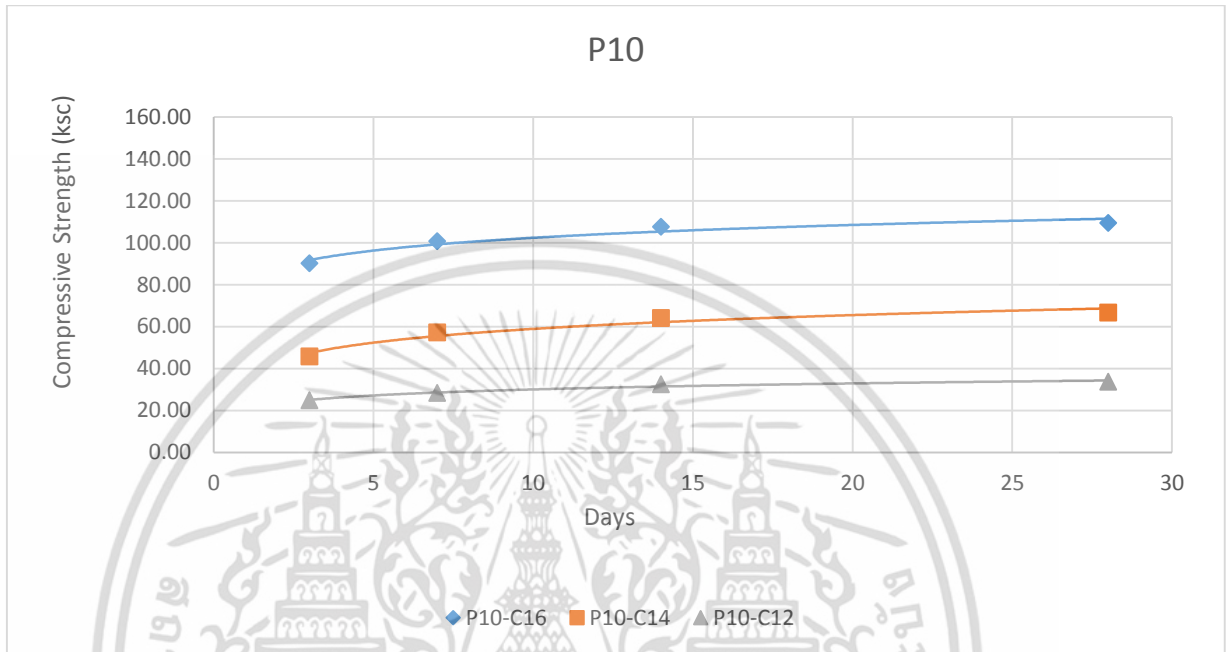
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.6 P10-C12

P10-C12							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	150.700	150.700	150.400	3.984	1166.393	53.670	24.09
	150.360	150.700	151.180	4.036	1178.179	56.610	25.47
	151.200	150.280	150.740	4.014	1171.914	55.630	24.96
	150.753	150.560	150.773	4.011	1172.162	55.303	24.84
7	151.040	150.700	150.300	4.031	1178.280	63.220	28.31
	150.700	150.200	150.900	4.033	1180.744	61.970	27.91
	151.300	150.080	151.040	4.018	1171.538	64.010	28.74
	151.013	150.327	150.747	4.027	1176.843	63.067	28.32
14	150.480	150.900	149.980	4.022	1180.975	70.240	31.53
	150.100	150.400	150.520	4.004	1178.342	69.960	31.59
	150.440	150.600	150.600	4.018	1177.597	76.460	34.40
	150.340	150.633	150.367	4.015	1178.969	72.220	32.51
28	151.100	150.760	150.520	3.943	1149.958	70.200	31.41
	151.300	150.580	150.500	3.956	1153.755	77.550	34.70
	151.440	150.420	150.660	3.955	1152.398	77.690	34.77
	151.280	150.587	150.560	3.951	1152.036	75.147	33.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท P10 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.7 P20-C16

P20-C16							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	149.000	150.260	150.920	5.219	1544.582	163.880	74.62
	149.840	150.980	150.420	5.239	1539.556	166.680	75.10
	149.740	151.100	150.200	5.235	1540.439	167.960	75.67
	149.527	150.780	150.513	5.231	1541.514	166.173	75.13
7	150.040	150.260	150.140	5.008	1479.509	194.650	88.01
	149.920	150.600	150.280	5.011	1476.858	196.680	88.80
	149.940	150.600	150.380	5.024	1479.507	201.240	90.85
	149.967	150.487	150.267	5.014	1478.624	197.523	89.22
14	149.320	150.420	150.340	5.036	1491.378	195.340	88.65
	149.700	151.260	150.100	5.063	1489.640	204.360	92.00
	149.200	150.080	151.000	5.064	1497.701	196.120	89.28
	149.407	150.587	150.480	5.054	1492.893	198.607	89.98
28	149.500	150.400	150.380	5.113	1512.156	210.020	95.21
	149.880	150.500	150.700	5.133	1510.003	210.870	95.29
	149.020	150.680	150.500	5.124	1516.256	211.990	96.24
	149.467	150.527	150.527	5.123	1512.800	210.960	95.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.8 P20-C14

P20-C14							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	150.600	150.620	150.380	4.508	1321.558	92.320	41.49
	150.380	150.120	150.680	4.542	1335.251	92.670	41.84
	149.960	150.200	150.640	4.513	1330.086	91.890	41.59
	150.313	150.313	150.567	4.521	1328.956	92.293	41.64
7	150.820	150.960	149.820	4.410	1292.850	111.450	49.90
	150.520	150.700	150.000	4.406	1294.928	106.770	47.98
	150.700	150.580	151.060	4.428	1291.747	106.180	47.70
	150.680	150.747	150.293	4.415	1293.168	108.133	48.53
14	150.440	149.800	151.480	4.424	1295.939	126.260	57.11
	149.400	149.700	150.860	4.419	1309.717	135.560	61.79
	150.500	150.440	150.440	4.418	1297.067	129.850	58.46
	150.113	149.980	150.927	4.420	1300.878	130.557	59.11
28	150.420	150.640	150.340	4.396	1290.438	137.550	61.88
	150.460	151.080	149.940	4.413	1294.757	131.870	59.14
	150.040	150.000	151.900	4.403	1287.931	133.470	60.45
	150.307	150.573	150.727	4.404	1291.014	134.297	60.49

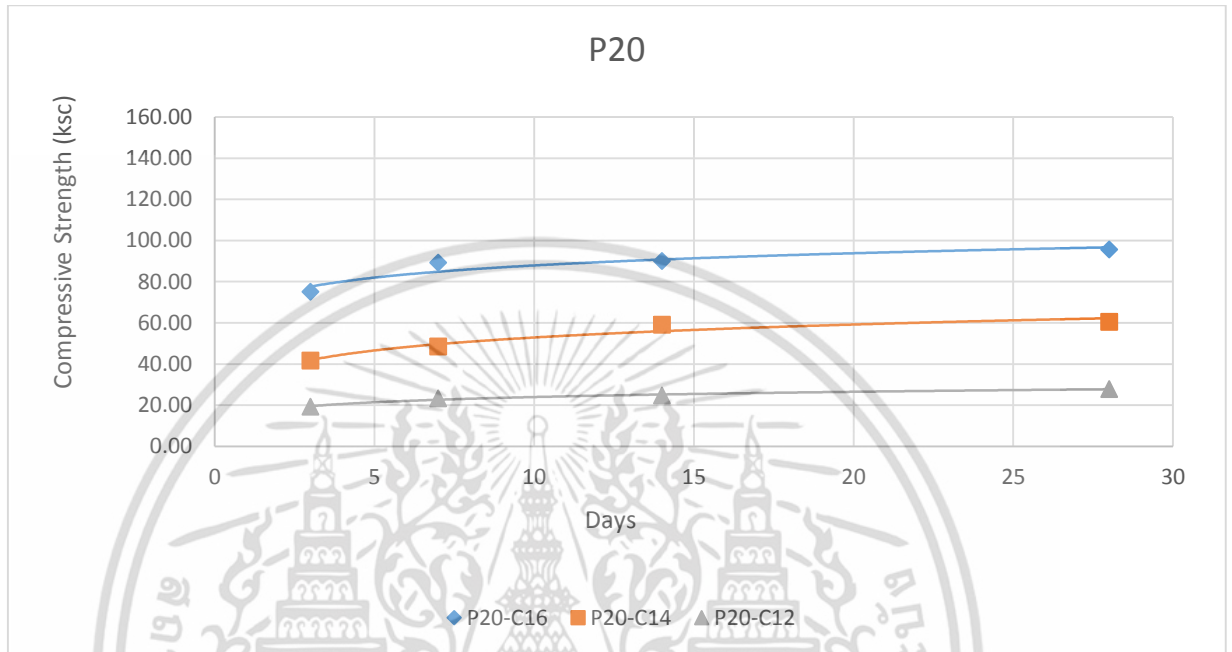
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-4.9 P20-C12

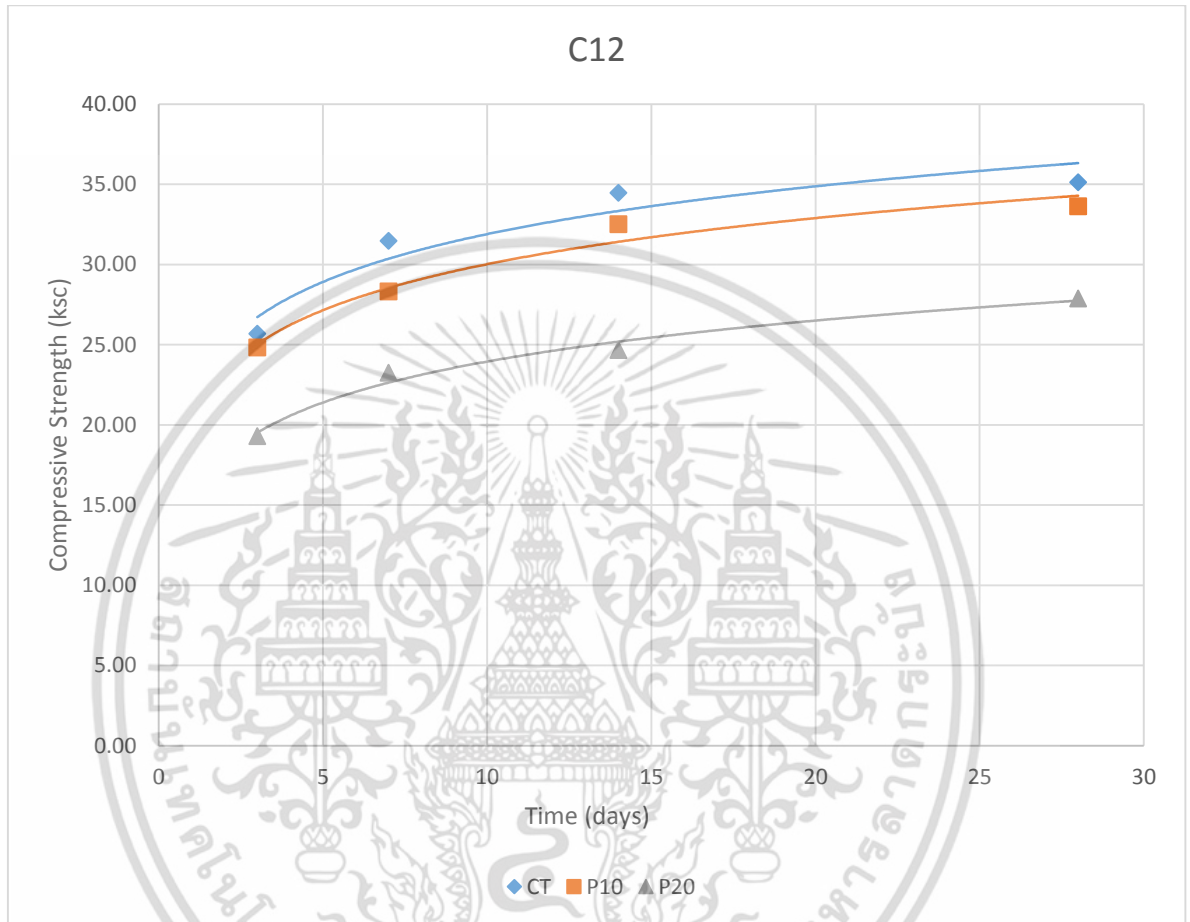
P20-C12							
อายุ	กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	หนา (mm.)	น้ำหนัก (kg)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	รับแรงกด (kN)	กำลังอัด (ksc)
3	150.240	150.400	151.000	3.992	1169.985	43.470	19.61
	150.600	149.780	151.520	3.984	1165.656	41.550	18.78
	151.000	150.520	150.400	3.983	1165.175	43.460	19.49
	150.613	150.233	150.973	3.986	1166.927	42.827	19.29
7	151.000	150.600	150.660	3.935	1148.537	49.910	22.37
	151.100	150.520	150.520	3.931	1148.286	52.780	23.66
	150.900	151.000	150.040	3.898	1140.167	53.020	23.72
	151.000	150.707	150.407	3.921	1145.664	51.903	23.25
14	150.600	150.380	150.380	3.886	1141.032	56.630	25.49
	150.840	149.880	151.080	3.871	1133.329	52.290	23.58
	150.800	150.700	150.540	3.877	1133.259	55.620	24.95
	150.747	150.320	150.667	3.878	1135.863	54.847	24.67
28	150.200	150.360	150.640	3.952	1161.648	61.210	27.63
	149.980	150.360	150.800	3.918	1152.119	62.590	28.29
	149.740	150.800	150.520	3.889	1144.207	61.370	27.70
	149.973	150.507	150.653	3.920	1152.658	61.723	27.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



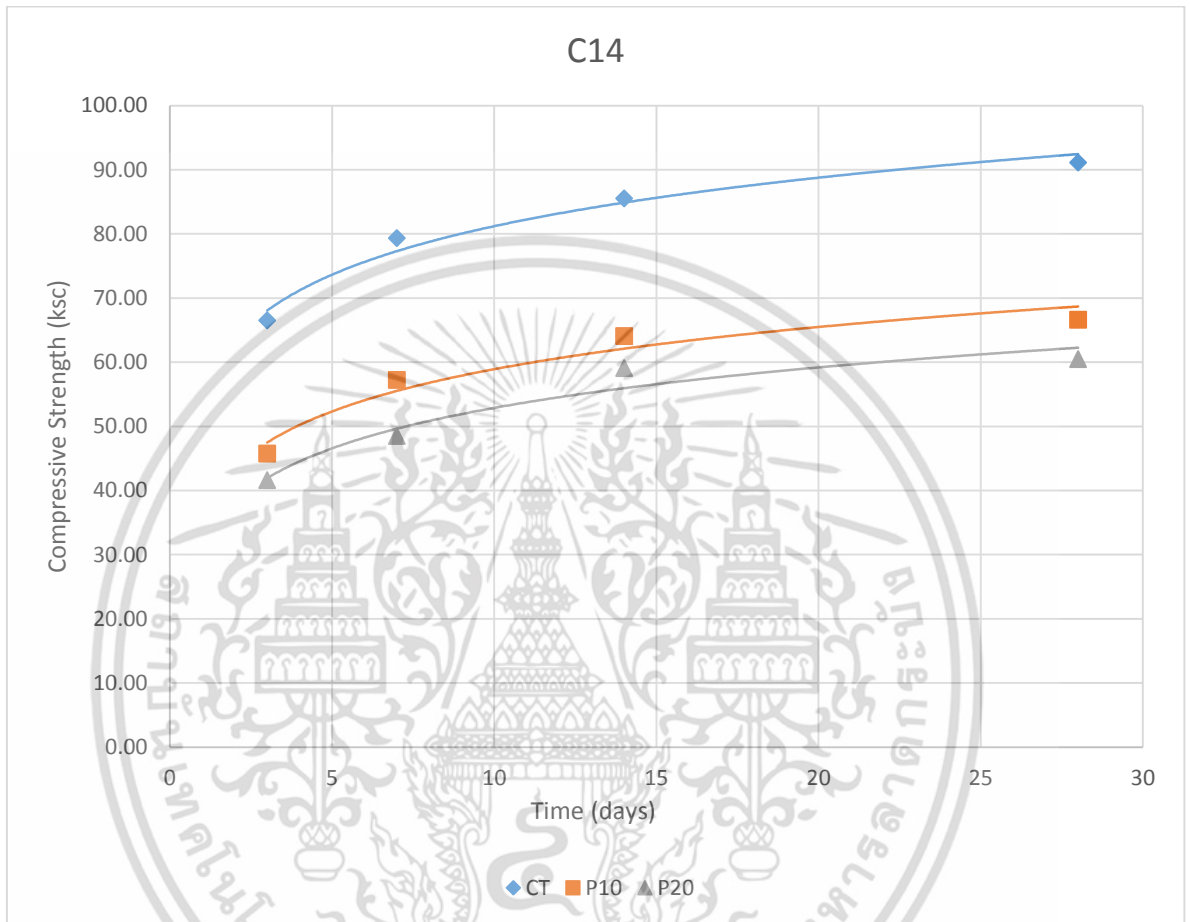
รูปที่ 4.15 กำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาประเภท P20 ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



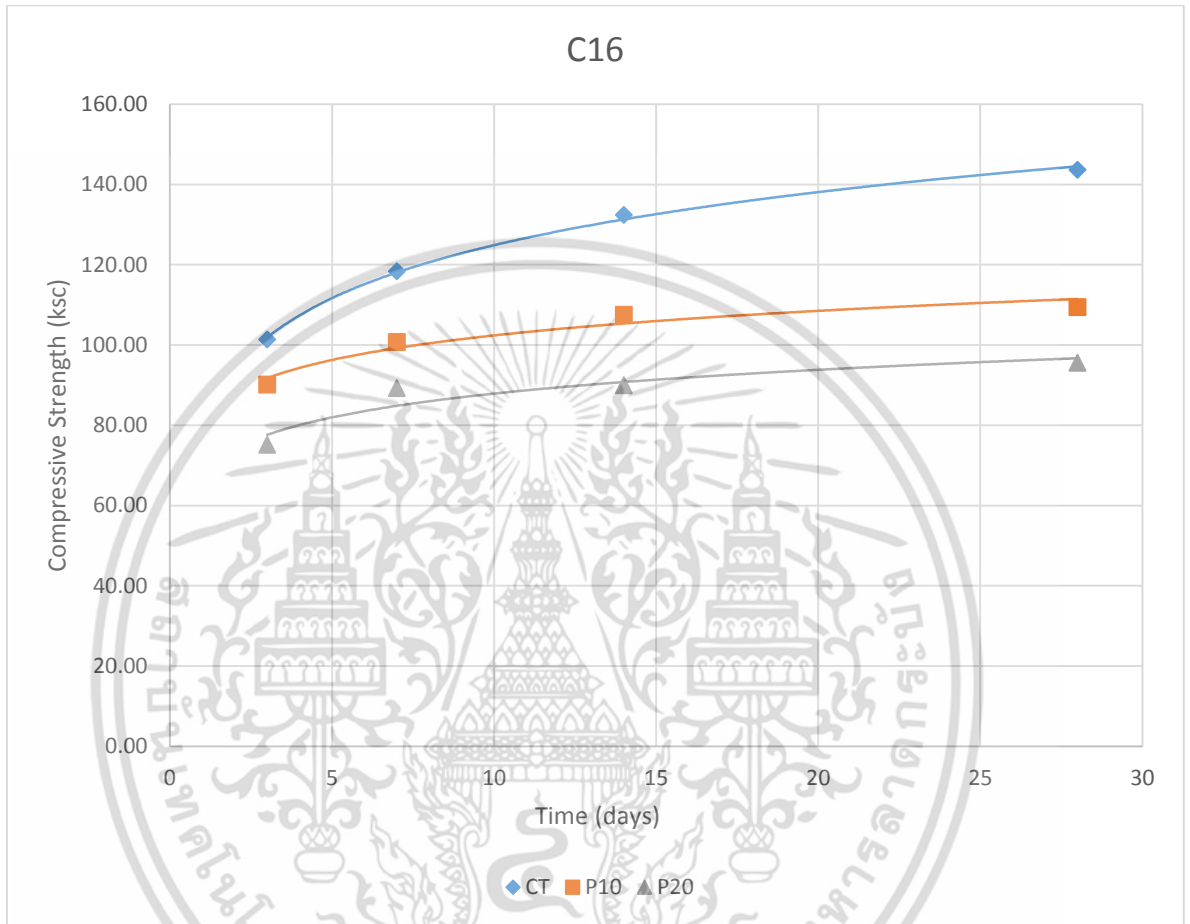
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1200 kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1400 kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังอัด (ksc) คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1600 kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก-5

ผลการทดสอบอัตราการหดตัว

(Autogenous Shrinkage)

ตารางที่ ก-5.1 CT-C16

CT-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	2.21	1.32	1.70	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2.21	1.32	1.70	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2.20	1.32	1.70	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	77.69	0.00	0.00	25.90
4	2.20	1.31	1.69	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	77.69	78.28	78.02	78.00
5	2.20	1.31	1.69	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	77.69	78.28	78.02	78.00
6	2.19	1.30	1.69	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	155.38	156.57	78.02	129.99
7	2.19	1.30	1.68	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	155.38	156.57	156.03	155.99
8	2.19	1.30	1.68	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	155.38	156.57	156.03	155.99
9	2.19	1.29	1.68	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	155.38	234.85	156.03	182.09
10	2.18	1.29	1.68	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	233.06	234.85	156.03	207.98
11	2.18	1.28	1.67	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	233.06	313.14	234.05	260.08
12	2.18	1.28	1.67	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	233.06	313.14	234.05	260.08
13	2.17	1.28	1.67	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	310.75	313.14	234.05	285.98
14	2.17	1.28	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	310.75	313.14	312.06	311.98
15	2.17	1.28	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	310.75	313.14	312.06	311.98
16	2.17	1.28	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	310.75	313.14	312.06	311.98
17	2.16	1.28	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	388.44	313.14	312.06	337.88
18	2.16	1.27	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	388.44	391.42	312.06	363.97
19	2.16	1.27	1.66	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	388.44	391.42	312.06	363.97
20	2.16	1.27	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	388.44	391.42	390.08	389.98
21	2.16	1.27	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	388.44	391.42	390.08	389.98
22	2.15	1.27	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	391.42	390.08	415.87
23	2.15	1.26	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	469.70	390.08	441.97
24	2.15	1.26	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	469.70	390.08	441.97
25	2.15	1.26	1.65	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	469.70	390.08	441.97
26	2.15	1.26	1.64	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	469.70	468.09	467.97
27	2.15	1.26	1.64	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	469.70	468.09	467.97
28	2.15	1.25	1.64	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	466.13	547.99	468.09	494.07
29	2.14	1.25	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	547.99	546.11	545.97
30	2.14	1.25	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	547.99	546.11	545.97
31	2.14	1.25	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	547.99	546.11	545.97
32	2.14	1.25	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	547.99	546.11	545.97
33	2.14	1.25	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	547.99	546.11	545.97
34	2.14	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	543.82	626.27	546.11	572.07
35	2.13	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	546.11	597.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	2.13	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	546.11	597.96
37	2.13	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	546.11	597.96
38	2.13	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	546.11	597.96
39	2.13	1.24	1.63	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	546.11	597.96
40	2.13	1.24	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	626.27	624.12	623.97
41	2.13	1.23	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	704.56	624.12	650.06
42	2.13	1.23	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	704.56	624.12	650.06
43	2.13	1.23	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	621.50	704.56	624.12	650.06
44	2.12	1.23	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	624.12	675.96
45	2.12	1.23	1.62	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	624.12	675.96
46	2.12	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	702.14	701.96
47	2.12	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	702.14	701.96
48	2.12	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	702.14	701.96
49	2.12	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	702.14	701.96
50	2.12	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	699.19	704.56	702.14	701.96
51	2.11	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	702.14	727.86
52	2.11	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	702.14	727.86
53	2.11	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	702.14	727.86
54	2.11	1.23	1.61	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	702.14	727.86
55	2.11	1.23	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	780.15	753.86
56	2.11	1.23	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	780.15	753.86
57	2.11	1.23	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	780.15	753.86
58	2.11	1.23	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	704.56	780.15	753.86
59	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
60	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
61	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
62	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
63	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
64	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
65	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
66	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
67	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
68	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
69	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
70	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
71	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
72	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
73	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
74	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96
75	2.11	1.22	1.60	2.21	1.32	1.70	128.72	127.74	128.18	776.88	782.84	780.15	779.96



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-5.2 CT-C14

CT-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
1	1.51	1.02	1.82	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.51	1.02	1.82	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.50	1.02	1.81	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	78.13	0.00	78.02	52.05
4	1.50	1.02	1.81	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	78.13	0.00	78.02	52.05
5	1.50	1.01	1.81	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	78.13	78.52	78.02	78.22
6	1.49	1.01	1.80	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	156.25	78.52	156.03	130.27
7	1.49	1.01	1.80	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	156.25	78.52	156.03	130.27
8	1.49	1.01	1.80	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	156.25	78.52	156.03	130.27
9	1.48	1.00	1.79	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	234.38	157.04	234.05	208.49
10	1.48	1.00	1.79	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	234.38	157.04	234.05	208.49
11	1.48	0.99	1.79	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	234.38	235.55	234.05	234.66
12	1.48	0.99	1.78	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	234.38	235.55	312.06	260.66
13	1.47	0.99	1.78	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	312.50	235.55	312.06	286.70
14	1.47	0.99	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	312.50	235.55	390.08	312.71
15	1.47	0.99	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	312.50	235.55	390.08	312.71
16	1.47	0.99	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	312.50	235.55	390.08	312.71
17	1.46	0.98	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	314.07	390.08	364.92
18	1.46	0.98	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	314.07	390.08	364.92
19	1.46	0.98	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	314.07	390.08	364.92
20	1.46	0.98	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	314.07	390.08	364.92
21	1.46	0.98	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	314.07	390.08	364.92
22	1.46	0.97	1.77	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	392.59	390.08	391.10
23	1.46	0.97	1.76	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	392.59	468.09	417.10
24	1.46	0.97	1.76	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	390.63	392.59	468.09	417.10
25	1.45	0.97	1.76	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	468.75	392.59	468.09	443.14
26	1.45	0.97	1.76	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	468.75	392.59	468.09	443.14
27	1.45	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	468.75	471.11	546.11	495.32
28	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
29	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
30	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
31	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
32	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
33	1.44	0.96	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	546.88	471.11	546.11	521.36
34	1.43	0.95	1.75	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	546.11	573.58
35	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
36	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
37	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
38	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
39	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
40	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
41	1.43	0.95	1.74	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	624.12	599.58
42	1.43	0.95	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	625.00	549.62	702.14	625.59
43	1.42	0.95	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	549.62	702.14	651.63
44	1.42	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	628.14	702.14	677.80
45	1.42	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	628.14	702.14	677.80
46	1.42	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	628.14	702.14	677.80
47	1.42	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	628.14	702.14	677.80
48	1.42	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	703.13	628.14	702.14	677.80
49	1.41	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	702.14	703.84
50	1.41	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	702.14	703.84
51	1.41	0.94	1.73	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	702.14	703.84
52	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
53	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
54	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
55	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
56	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
57	1.41	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	781.25	628.14	780.15	729.85
58	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
59	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
60	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
61	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
62	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
63	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
64	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
65	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
66	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
67	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
68	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
69	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
70	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
71	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
72	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
73	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89
75	1.40	0.94	1.72	1.51	1.02	1.82	128.00	127.36	128.18	859.38	628.14	780.15	755.89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

ตารางที่ ก-5.3 CT-C12

CT-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1.41	1.20	1.08	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.41	1.20	1.08	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.41	1.20	1.08	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.40	1.19	1.08	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	78.31	78.35	0.00	52.22
5	1.40	1.19	1.07	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	78.31	78.35	78.42	78.36
6	1.39	1.18	1.07	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	156.62	156.69	78.42	130.58
7	1.39	1.18	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	156.62	156.69	156.84	156.72
8	1.39	1.18	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	156.62	156.69	156.84	156.72
9	1.39	1.18	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	156.62	156.69	156.84	156.72
10	1.38	1.17	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	234.93	235.04	156.84	208.93
11	1.38	1.17	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	234.93	235.04	156.84	208.93
12	1.38	1.17	1.06	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	234.93	235.04	156.84	208.93
13	1.37	1.17	1.05	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	313.23	235.04	235.26	261.18
14	1.37	1.16	1.05	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	313.23	313.38	235.26	287.29
15	1.37	1.16	1.05	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	313.23	313.38	235.26	287.29
16	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
17	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
18	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
19	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
20	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
21	1.36	1.16	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	313.38	313.68	339.53
22	1.36	1.15	1.04	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	391.73	313.68	365.65
23	1.36	1.15	1.03	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	391.73	392.10	391.79
24	1.36	1.15	1.03	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	391.54	391.73	392.10	391.79
25	1.35	1.15	1.03	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	469.85	391.73	392.10	417.89
26	1.35	1.15	1.03	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	469.85	391.73	392.10	417.89
27	1.35	1.15	1.02	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	469.85	391.73	470.51	444.03
28	1.35	1.15	1.02	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	469.85	391.73	470.51	444.03
29	1.35	1.15	1.02	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	469.85	391.73	470.51	444.03
30	1.34	1.14	1.01	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	548.93	522.39
31	1.34	1.14	1.01	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	548.93	522.39
32	1.34	1.14	1.01	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	548.93	522.39
33	1.34	1.14	1.01	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	548.93	522.39
34	1.34	1.14	1.01	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	548.93	522.39
35	1.34	1.14	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	548.16	470.07	627.35	548.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
37	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
38	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
39	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
40	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
41	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
42	1.33	1.13	1.00	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	626.47	548.42	627.35	600.75
43	1.32	1.13	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	548.42	705.77	652.99
44	1.32	1.13	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	548.42	705.77	652.99
45	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
46	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
47	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
48	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
49	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
50	1.32	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	704.78	626.76	705.77	679.10
51	1.31	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	705.77	705.21
52	1.31	1.12	0.99	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	705.77	705.21
53	1.31	1.12	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	784.19	731.35
54	1.31	1.12	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	784.19	731.35
55	1.31	1.12	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	784.19	731.35
56	1.31	1.12	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	784.19	731.35
57	1.31	1.12	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	783.09	626.76	784.19	731.35
58	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
59	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
60	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
61	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
62	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
63	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
64	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
65	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
66	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
67	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
68	1.30	1.11	0.98	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	784.19	783.56
69	1.30	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	862.61	809.70
70	1.30	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	862.61	809.70
71	1.30	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	862.61	809.70
72	1.30	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	861.39	705.11	862.61	809.70
73	1.29	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	939.70	705.11	862.61	835.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

CT-C12													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.29	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	939.70	705.11	862.61	835.81
75	1.29	1.11	0.97	1.41	1.20	1.08	127.70	127.64	127.52	939.70	705.11	862.61	835.81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-5.4 P10-C16

P10-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
1	1.26	1.12	1.53	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.26	1.12	1.53	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.26	1.12	1.52	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	0.00	0.00	78.15	26.05
4	1.25	1.11	1.52	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	78.30	78.42	78.15	78.29
5	1.25	1.11	1.52	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	78.30	78.42	78.15	78.29
6	1.25	1.11	1.51	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	78.30	78.42	156.30	104.34
7	1.25	1.11	1.51	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	78.30	78.42	156.30	104.34
8	1.24	1.11	1.51	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	156.59	78.42	156.30	130.44
9	1.24	1.10	1.51	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	156.59	156.84	156.30	156.58
10	1.24	1.10	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	156.59	156.84	234.45	182.63
11	1.24	1.10	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	156.59	156.84	234.45	182.63
12	1.24	1.10	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	156.59	156.84	234.45	182.63
13	1.23	1.10	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	156.84	234.45	208.73
14	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
15	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
16	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
17	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
18	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
19	1.23	1.09	1.50	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	234.45	234.86
20	1.23	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	312.60	260.91
21	1.23	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	234.89	235.26	312.60	260.91
22	1.22	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	313.19	235.26	312.60	287.01
23	1.22	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	313.19	235.26	312.60	287.01
24	1.22	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	313.19	235.26	312.60	287.01
25	1.22	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	313.19	235.26	312.60	287.01
26	1.22	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	313.19	235.26	312.60	287.01
27	1.21	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	235.26	312.60	313.11
28	1.21	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	235.26	312.60	313.11
29	1.21	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	235.26	312.60	313.11
30	1.21	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	235.26	312.60	313.11
31	1.21	1.09	1.49	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	235.26	312.60	313.11
32	1.21	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	313.68	390.75	365.30
33	1.21	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	313.68	390.75	365.30
34	1.21	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	313.68	390.75	365.30
35	1.21	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	391.48	313.68	390.75	365.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
36	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
37	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
38	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
39	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
40	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
41	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
42	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
43	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
44	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
45	1.20	1.08	1.48	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	313.68	390.75	391.40
46	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
47	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
48	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
49	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
50	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
51	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
52	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
53	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
54	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
55	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
56	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
57	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
58	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
59	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
60	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
61	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
62	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
63	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
64	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
65	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
66	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
67	1.20	1.07	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	392.10	468.90	443.59
68	1.20	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	470.51	468.90	469.73
69	1.20	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	470.51	468.90	469.73
70	1.20	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	470.51	468.90	469.73
71	1.20	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	470.51	468.90	469.73
72	1.20	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	469.78	470.51	468.90	469.73
73	1.19	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	548.07	470.51	468.90	495.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C16													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.19	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	548.07	470.51	468.90	495.83
75	1.19	1.06	1.47	1.26	1.12	1.53	127.72	127.52	127.96	548.07	470.51	468.90	495.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-5.5 P10-C14

P10-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
1	1.98	1.01	2.11	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.98	1.01	2.11	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.98	1.01	2.10	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	0.00	0.00	77.81	25.94
4	1.97	1.01	2.10	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	77.89	0.00	77.81	51.90
5	1.97	1.01	2.10	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	77.89	0.00	77.81	51.90
6	1.97	1.00	2.10	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	77.89	78.49	77.81	78.07
7	1.96	1.00	2.10	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	78.49	77.81	104.03
8	1.96	1.00	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	78.49	155.62	129.97
9	1.96	1.00	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	78.49	155.62	129.97
10	1.96	0.99	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	156.99	155.62	156.13
11	1.96	0.99	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	156.99	155.62	156.13
12	1.96	0.99	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	155.79	156.99	155.62	156.13
13	1.95	0.99	2.09	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	155.62	182.09
14	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
15	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
16	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
17	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
18	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
19	1.95	0.99	2.08	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	156.99	233.43	208.03
20	1.95	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	235.48	311.24	260.13
21	1.95	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	235.48	311.24	260.13
22	1.95	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	235.48	311.24	260.13
23	1.95	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	233.68	235.48	311.24	260.13
24	1.94	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	235.48	311.24	286.10
25	1.94	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	235.48	311.24	286.10
26	1.94	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	235.48	311.24	286.10
27	1.94	0.98	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	235.48	311.24	286.10
28	1.94	0.97	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	311.24	312.26
29	1.94	0.97	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	311.24	312.26
30	1.94	0.97	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	311.24	312.26
31	1.94	0.97	2.07	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	311.24	312.26
32	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20
33	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20
34	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20
35	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20
37	1.94	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	311.58	313.97	389.04	338.20
38	1.93	0.97	2.06	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	313.97	389.04	364.16
39	1.93	0.97	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	313.97	466.85	390.10
40	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
41	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
42	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
43	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
44	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
45	1.93	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	389.47	392.46	466.85	416.26
46	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
47	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
48	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
49	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
50	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
51	1.92	0.96	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	392.46	466.85	442.23
52	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
53	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
54	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
55	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
56	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
57	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
58	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
59	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
60	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
61	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
62	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
63	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
64	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
65	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
66	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
67	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
68	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
69	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
70	1.92	0.95	2.05	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	466.85	468.39
71	1.92	0.95	2.04	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	544.66	494.33
72	1.92	0.95	2.04	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	544.66	494.33
73	1.92	0.95	2.04	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	544.66	494.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
74	1.92	0.95	2.04	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	544.66	494.33
75	1.92	0.95	2.04	1.98	1.01	2.11	128.38	127.40	128.52	467.36	470.96	544.66	494.33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ก-5.6 P10-C12

P10-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Average
1	1.25	0.71	1.32	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.25	0.71	1.32	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.25	0.71	1.32	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.25	0.70	1.32	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	0.00	78.64	0.00	26.21
5	1.25	0.70	1.32	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	0.00	78.64	0.00	26.21
6	1.24	0.69	1.31	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	78.28	104.61
7	1.24	0.69	1.31	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	78.28	104.61
8	1.24	0.69	1.31	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	78.28	104.61
9	1.24	0.69	1.31	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	78.28	104.61
10	1.24	0.69	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	156.57	130.71
11	1.24	0.69	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	156.57	130.71
12	1.24	0.69	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	78.27	157.28	156.57	130.71
13	1.23	0.68	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	156.57	183.01
14	1.23	0.68	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	156.57	183.01
15	1.23	0.68	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	156.57	183.01
16	1.23	0.68	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	156.57	183.01
17	1.23	0.68	1.30	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	156.57	183.01
18	1.23	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	156.54	235.92	234.85	209.11
19	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
20	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
21	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
22	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
23	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
24	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
25	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
26	1.22	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	234.82	235.92	234.85	235.20
27	1.21	0.68	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	235.92	234.85	261.29
28	1.21	0.67	1.29	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	314.56	234.85	287.50
29	1.21	0.67	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	314.56	313.14	313.60
30	1.21	0.67	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	314.56	313.14	313.60
31	1.21	0.67	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	314.56	313.14	313.60
32	1.21	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	393.21	313.14	339.81
33	1.21	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	393.21	313.14	339.81
34	1.21	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	313.09	393.21	313.14	339.81
35	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
37	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
38	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
39	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
40	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
41	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
42	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
43	1.20	0.66	1.28	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	313.14	365.90
44	1.20	0.66	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	391.42	391.99
45	1.20	0.66	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	391.36	393.21	391.42	391.99
46	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
47	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
48	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
49	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
50	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
51	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
52	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
53	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
54	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
55	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
56	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
57	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
58	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
59	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
60	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
61	1.19	0.65	1.27	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	469.63	471.85	391.42	444.30
62	1.18	0.65	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	471.85	469.70	496.48
63	1.18	0.65	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	471.85	469.70	496.48
64	1.18	0.65	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	471.85	469.70	496.48
65	1.18	0.65	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	471.85	469.70	496.48
66	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
67	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
68	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
69	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
70	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
71	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
72	1.18	0.64	1.26	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	469.70	522.70
73	1.18	0.64	1.25	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	547.99	548.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P10-C12													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.18	0.64	1.25	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	547.99	548.79
75	1.18	0.64	1.25	1.25	0.71	1.32	127.76	127.16	127.74	547.90	550.49	547.99	548.79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

ตารางที่ ก-5.7 P20-C16

P20-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1.91	1.24	2.16	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.91	1.24	2.16	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.91	1.24	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	0.00	0.00	77.76	25.92
4	1.91	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	0.00	78.30	77.76	52.02
5	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
6	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
7	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
8	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
9	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
10	1.90	1.23	2.15	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	77.76	77.98
11	1.90	1.23	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	155.52	103.90
12	1.90	1.23	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	155.52	103.90
13	1.90	1.23	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	77.89	78.30	155.52	103.90
14	1.89	1.23	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	78.30	155.52	129.87
15	1.89	1.23	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	78.30	155.52	129.87
16	1.89	1.22	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	155.52	155.97
17	1.89	1.22	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	155.52	155.97
18	1.89	1.22	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	155.52	155.97
19	1.89	1.22	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	155.52	155.97
20	1.89	1.22	2.14	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	155.52	155.97
21	1.89	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	233.28	181.89
22	1.89	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	155.79	156.59	233.28	181.89
23	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
24	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
25	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
26	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
27	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
28	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
29	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
30	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
31	1.88	1.22	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	156.59	233.28	207.85
32	1.88	1.21	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	233.28	233.95
33	1.88	1.21	2.13	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	233.28	233.95
34	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
35	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P20-C16													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
37	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
38	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
39	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
40	1.88	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	233.68	234.89	311.04	259.87
41	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
42	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
43	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
44	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
45	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
46	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
47	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
48	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
49	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
50	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
51	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
52	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
53	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
54	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
55	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
56	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
57	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
58	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
59	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
60	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
61	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
62	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
63	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
64	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
65	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
66	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
67	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
68	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
69	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
70	1.87	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	311.58	234.89	311.04	285.84
71	1.86	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	389.47	234.89	311.04	311.80
72	1.86	1.21	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	389.47	234.89	311.04	311.80
73	1.86	1.20	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	389.47	313.19	311.04	337.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P20-C16													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.86	1.20	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	389.47	313.19	311.04	337.90
75	1.86	1.20	2.12	1.91	1.24	2.16	128.38	127.72	128.60	389.47	313.19	311.04	337.90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

ตารางที่ ก-5.8 P20-C14

P20-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1.51	0.94	1.79	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.51	0.94	1.79	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.51	0.94	1.79	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.51	0.94	1.79	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.51	0.93	1.79	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	78.52	0.00	26.17
6	1.51	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	0.00	78.52	77.97	52.16
7	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
8	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
9	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
10	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
11	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
12	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
13	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
14	1.50	0.93	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	78.15	78.52	77.97	78.21
15	1.49	0.92	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	77.97	130.43
16	1.49	0.92	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	77.97	130.43
17	1.49	0.92	1.78	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	77.97	130.43
18	1.49	0.92	1.77	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	155.93	156.42
19	1.49	0.92	1.77	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	155.93	156.42
20	1.49	0.92	1.77	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	155.93	156.42
21	1.49	0.92	1.77	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	155.93	156.42
22	1.49	0.92	1.77	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	155.93	156.42
23	1.49	0.92	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	233.90	182.41
24	1.49	0.92	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	233.90	182.41
25	1.49	0.92	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	233.90	182.41
26	1.49	0.92	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	233.90	182.41
27	1.49	0.92	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	156.30	157.04	233.90	182.41
28	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
29	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
30	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
31	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
32	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
33	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
34	1.48	0.91	1.76	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	233.90	234.63
35	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P20-C14													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
37	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
38	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
39	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
40	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
41	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
42	1.48	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	234.45	235.55	311.87	260.62
43	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
44	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
45	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
46	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
47	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
48	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
49	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
50	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
51	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
52	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
53	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
54	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
55	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
56	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
57	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
58	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
59	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
60	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
61	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
62	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
63	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
64	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
65	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
66	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
67	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
68	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
69	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
70	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
71	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
72	1.47	0.91	1.75	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	312.60	235.55	311.87	286.67
73	1.46	0.91	1.74	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	390.75	235.55	389.83	338.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P20-C14													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.46	0.91	1.74	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	390.75	235.55	389.83	338.71
75	1.46	0.91	1.74	1.51	0.94	1.79	127.96	127.36	128.26	390.75	235.55	389.83	338.71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

ตารางที่ ก-5.9 P20-C12

P20-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
6	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1.22	0.42	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.22	0.41	0.72	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	0.00	78.81	0.00	26.27
10	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
11	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
12	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
13	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
14	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
15	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
16	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
17	1.21	0.41	0.71	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	78.63	78.58
18	1.21	0.41	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	157.26	104.79
19	1.21	0.41	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	78.81	157.26	104.79
20	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
21	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
22	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
23	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
24	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
25	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
26	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
27	1.21	0.40	0.70	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	78.31	157.63	157.26	131.07
28	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
29	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
30	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
31	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
32	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
33	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
34	1.20	0.40	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	157.63	235.89	183.38
35	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

P20-C12													
Time (Days)	X _n			X ₀			L ₀			(X ₀ -X _n)/(L ₀ *10 ⁻⁶)			ΔL/L ₀ (10 ⁻⁶) Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
36	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
37	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
38	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
39	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
40	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
41	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
42	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
43	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
44	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
45	1.20	0.39	0.69	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	235.89	209.65
46	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
47	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
48	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
49	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
50	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
51	1.20	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	156.62	236.44	314.51	235.86
52	1.19	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	236.44	314.51	261.96
53	1.19	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	236.44	314.51	261.96
54	1.19	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	236.44	314.51	261.96
55	1.19	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	236.44	314.51	261.96
56	1.19	0.39	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	236.44	314.51	261.96
57	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
58	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
59	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
60	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
61	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
62	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
63	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
64	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
65	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
66	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
67	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
68	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
69	1.19	0.38	0.68	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	314.51	288.23
70	1.19	0.38	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	234.93	315.26	393.14	314.44
71	1.18	0.38	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	313.23	315.26	393.14	340.55
72	1.18	0.38	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	313.23	315.26	393.14	340.55
73	1.18	0.37	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	313.23	394.07	393.14	366.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

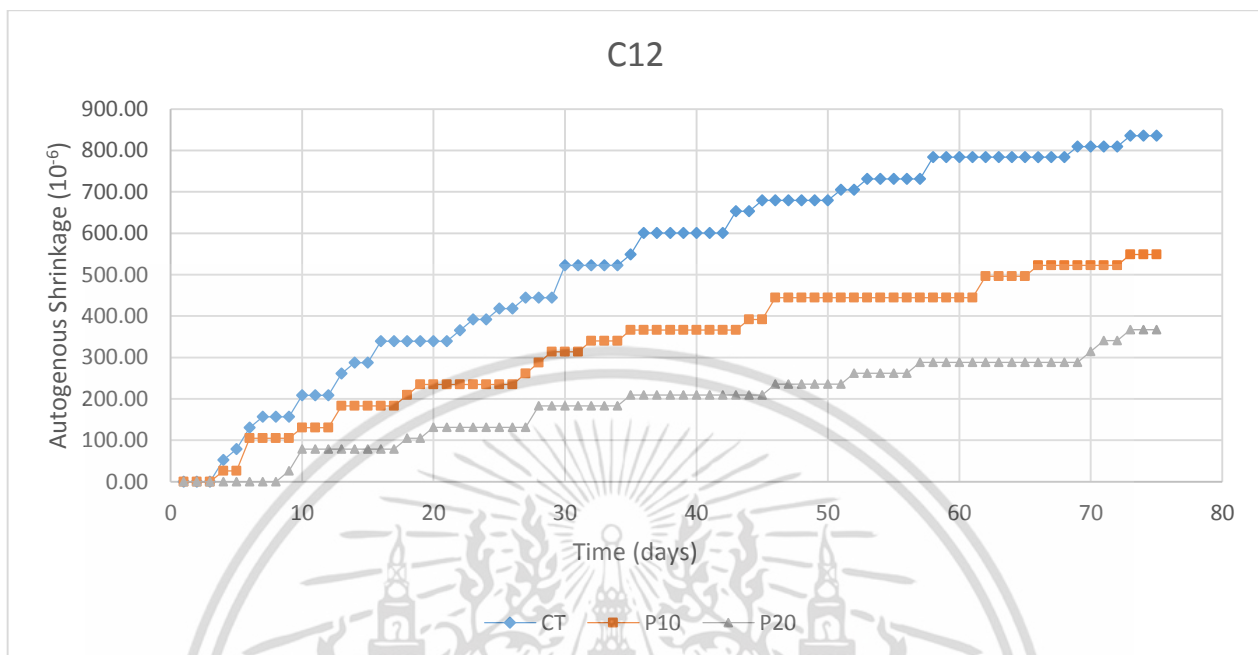


DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG BANGKOK THAILAND

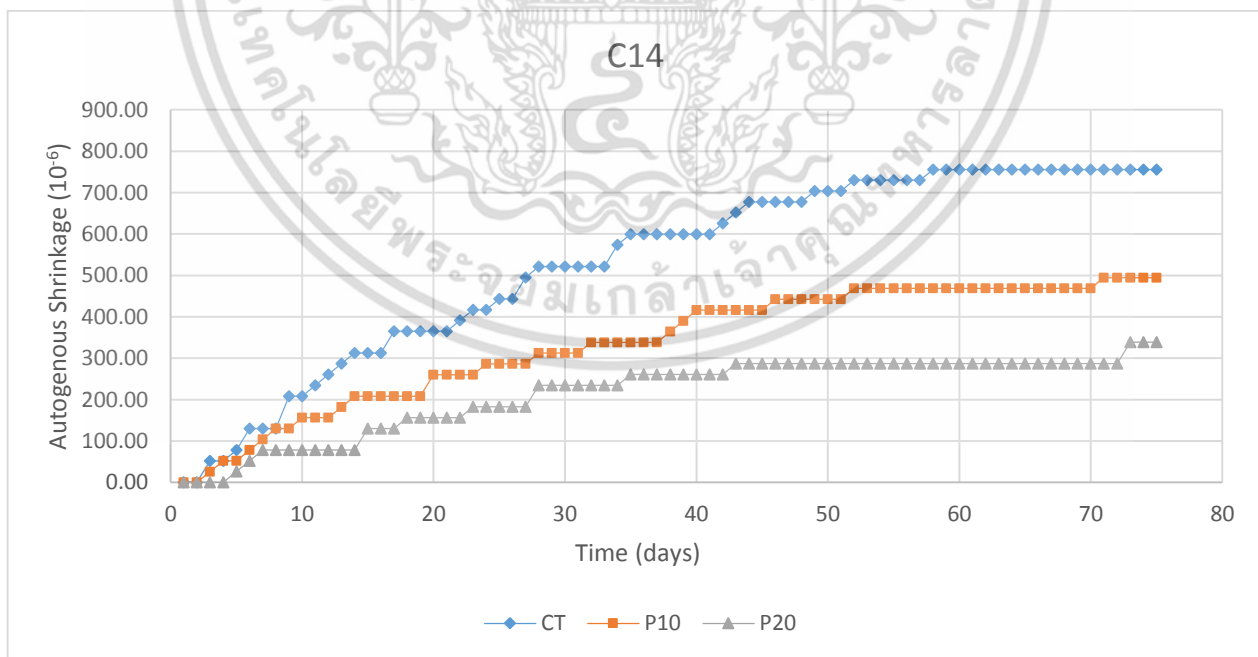
P20-C12													
Time (Days)	X_n			X_0			L_0			$(X_0 - X_n)/(L_0 * 10^{-6})$			$\Delta L/L_0(10^{-6})$ Average
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	1.18	0.37	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	313.23	394.07	393.14	366.82
75	1.18	0.37	0.67	1.22	0.42	0.72	127.70	126.88	127.18	313.23	394.07	393.14	366.82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

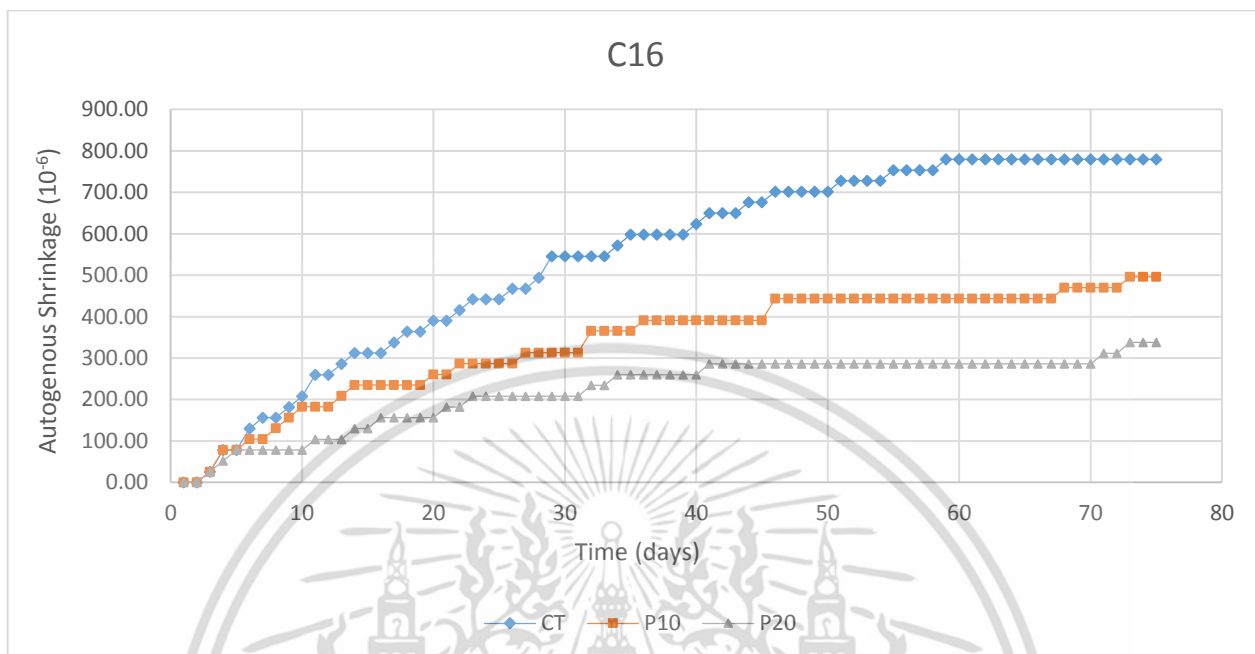


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C12



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบความหนาแน่นกับการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาเกรด C16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-1 ทราย์อิมตัวผิวแห้ง

โดยทั่วไปทราย์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต จะใช้ทราย์ที่อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง แต่ทราย์ที่ซื้อมาส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่เปียกถึงเปียกมาก ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างจะให้ความสำคัญกับการควบคุมทราย์ให้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง เพราะหากทราย์เปียกเกินไปก็จะทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติต่างๆ เปลี่ยนไป หรือถ้าแห้งไปซีเมนต์ในส่วนผสมก็จะไปดูดน้ำจากน้ำยาโพมทำให้ต้องฉีดยาโพมมากกว่าปกตินั้นก็ทำให้สิ้นเปลือง โดยวิธีการดังนี้

วัสดุอุปกรณ์

1. ทราย์ละเอียดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100
2. น้ำ
3. กรวยปากตัดขนาดด้านบนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 ± 3 mm. ด้านล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 90 ± 3 mm. สูง 75 ± 3 mm.
4. Tamper สำหรับกระทุ้ง
5. เครื่องชั่ง
6. เครื่องผสมมอร์ตาร์
7. ตู้อบ



ทราย์ละเอียดผ่านเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 กรวยปากตัด+ Tamper



เครื่องชั่ง



เครื่องผสมมอร์ตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน

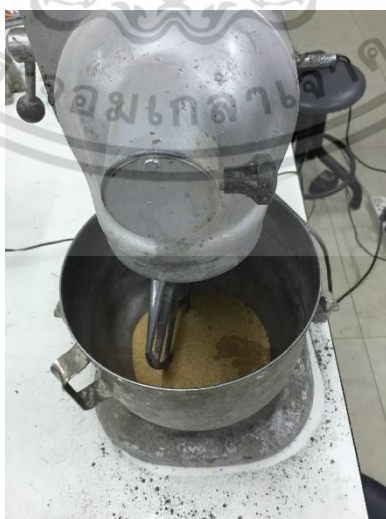
1. อบทรายละเอียด ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชม. หรือจนกว่าจะแห้งสนิท



2. นำทรายออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 4 ชม. เป็นอย่างน้อย แล้วหาภาชนะมิดชิดเก็บไว้
3. ร่อนทรายผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 ส่วนที่ผ่านเบอร์ 100 และค้างเบอร์ 16 ให้ทิ้ง



4. ชั่งน้ำต่อทราย 1 : 250 แล้วนำไปใส่เครื่องผสมมอร์ตาร์ ให้เครื่องคนให้เข้ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

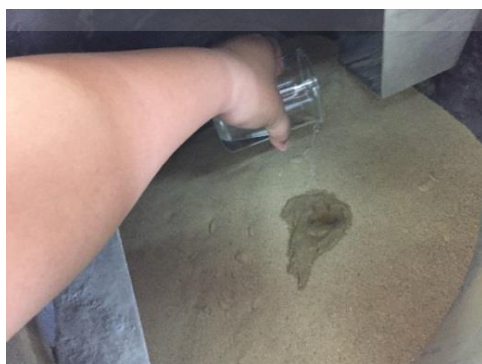
5. นำทรายที่ได้ตักใส่กรวยแล้วกระทุ้งด้วย Tamper



6. ยกกรวยขึ้นตรงๆ ถ้าทรายคงสภาพเดิมแสดงว่าขึ้น แต่ผู้วิจัยทำการทดสอบหลายๆ ครั้ง ลักษณะที่ได้คือผิวนอกไหลมากองที่ฐาน ตรงกลางยังคงรูปเจดีย์ ลักษณะดังกล่าวนี้คือทรายอิมตัวผิวแห้ง



การนำไปใช้ เนื่องจากว่าอัตราส่วนน้ำต่อทราย 1 : 250 นี้หากใช้กำลังผสม ไม่มีทางจะให้น้ำทั่วทรายได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ไม่ช่วยกวน เพื่อให้ง่ายต่อการผสมและน้ำกระจายอย่างทั่วถึง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 ค่าความชื้นเหลวและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตกันในท้องตลาดทั่วไปจะหล่อเป็นก้อนขนาดใหญ่ แล้วตัดแบ่งเป็นชิ้น โดยเวลาที่ดียิ่งที่สุดในการตัดแบ่งก็คือระยะเวลาก่อตัวปลาย เพราะคอนกรีตขึ้นรูปและไม่แข็งจนเกินไป



การเทคอนกรีตมวลเบาใส่แบบหล่อ

การถอดแบบหล่อ(ระยะเวลาก่อตัวปลาย)



การตัดแบ่งคอนกรีตมวลเบา(ระยะเวลาก่อตัวปลาย)

อุปกรณ์ ทดสอบความชื้นเหลว (ASTM C187-11)

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
2. น้ำ
3. ถ้ำปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่คาร์บอนค้ำงบนตะแกรงร่อนเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 5
4. อุปกรณ์ไวแคท (Vicat Apparatus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ขั้นตอน

1. ผสมปูนครึ่งละ 500 กรัม กับน้ำร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์



ปูน 500 กรัม



น้ำร้อยละ 27 โดยน้ำหนักปูน

2. คนให้เข้ากันป็นเป็นลูกกลมๆ โยนไปมาระหว่างมือ 5-6 ครั้ง แล้วบรรจุลงในกรวยไวกแคท ตั้งค่าแท่งเหล็ก ปล่อยให้จมโดยน้ำหนักตัวมันเอง ค่าความชันเหลวที่พอเหมาะคือแท่งเหล็กจม 10 ± 1 mm. ในเวลา 30 วินาที ส่วนวิธีทดสอบความชันเหลวโดยมีเก้าอี้ปาล์มน้ำมัน เพียงแค่แทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แล้วทำเหมือนกัน



ตั้งค่าแท่งเหล็ก



เข็มจม 10 ± 1 mm. ในเวลา 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทมอร์ตาร์	ค่าความชื้นเหลือ (%)	ระยะห่างเหล็กจมใน 30 วินาที (mm.)
CT	27	11
P10	28	9
P20	30	10

อุปกรณ์ ระยะเวลาก่อตัว (ASTM 191-13)

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)
2. น้ำ
3. เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่ค่าร้อยละข้างบนตะแกรงร่อนเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 5
4. อุปกรณ์ไวแคท (Vicat Apparatus)

ขั้นตอน

1. ทำการผสมเหมือนขั้นตอนการหาความชื้นเหลือซีเมนต์เพสต์
2. ตั้งเข็มไวแคทที่ 0 โดยค่าระยะเวลาก่อตัวต้นคือ ระยะที่เข็มจมลงไป 25 ± 2 mm. ในเวลา 30 วินาที ส่วนระยะเวลาก่อตัวปลายคือเวลาที่เข็มไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ได้



เวลาก่อตัวต้นเข็มจม 25 ± 2 mm.



เวลาก่อตัวปลายเข็มไม่จม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทมอร์ตาร์	ค่าความชื้น เหลว(%)	ระยะเข็มจม (ก่อดัวต้น)	ระยะเวลาก่อดัว ต้น	ระยะเวลาก่อดัว ปลาย
CT	27	23	100	140
P10	28	22	110	150
P20	30	26	115	170

***ค่าสำคัญจากการทดลองนี้คือระยะเวลาก่อดัวปลาย เพราะจะนำไปใช้ตัดแบ่งคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวไว้ข้างต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการ 21
ครั้งที่ 21
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ
The 21st National Convention on Civil Engineering

“วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต”
“Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers”

www.ncce21.org

28-30 มิถุนายน 2559
โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา
28 - 30 June 2016
BP Samila Beach Hotel, Songkhla

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceeding
 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
 The 21st National Convention on Civil Engineering



ณ โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา
 วันที่ 28 – 30 มิถุนายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND




สารอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

การวิจัยมีความสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาการศึกษาและดาราพัฒนาประเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย มีความตระหนักถึงความสำคัญของการวิจัย โดยมีนโยบายส่งเสริม สนับสนุน และกระตุ้นให้บุคลากรผลิตผลงานวิจัยอย่างต่อเนื่องโดยเน้นการวิจัยเชิงพื้นที่ การวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ และการวิจัยเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยี ปี 2559 นี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยได้รับมอบหมายให้เป็นเจ้าภาพในการจัดประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 (The 21st National Convention on Civil Engineering) ซึ่งถือเป็นเกียรติและน่านาคภูมิใจอย่างยิ่ง

การจัดประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 ประจำปี 2559 ถือเป็นช่องทางสำคัญในการสร้างความเข้มแข็ง และเพิ่มขีดความสามารถในการวิจัยทางด้านวิศวกรรมโยธาทุกๆ ด้าน ตลอดจนการสร้างเครือข่ายทางวิศวกรรมโยธา และสาขาที่เกี่ยวข้อง และยังเป็นเวทีสำหรับการแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย ผู้นำเสนอผลงาน คณะอาจารย์ นักศึกษา และผู้เข้าร่วมประชุม ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ประโยชน์และการขยายเครือข่ายและความร่วมมือในการวิจัยให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

ขออวยพรให้การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 ประจำปี 2559 สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ทุกประการ และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ คณะกรรมการดำเนินงาน คณะอาจารย์ บุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ร่วมแรง ร่วมใจ ในการจัดงานครั้งนี้


ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุจา ทิพย์วารี)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สสงขลา จังหวัดสงขลา

+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

กำหนดการ
การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
ระหว่างวันที่ 28 - 30 มิถุนายน 2559
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา

วันอังคารที่ 28 มิถุนายน 2559

08.30 - 10.00 น. ลงทะเบียน

10.00 - 10.30 น. กล่าวรายงาน

โดยประธานจัดการประชุม คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รศ.จรูญ เจริญนครกุล

กล่าวต้อนรับผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 21
โดย ผศ.รุจา ทัพยวรี อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
และ ศ.ดร. สุชีขันธ์ สุวรรณสวัสดิ์ นายกสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

กล่าวเปิดการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

โดย ดร.อรรชกา สีบุญเรือง

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

10.30 - 12.00 น. การบรรยายพิเศษ เรื่อง "วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต"

Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers

โดย ดร.อรรชกา สีบุญเรือง

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

12.00 - 13.00 น. พักรับประทานอาหารกลางวัน

13.00 - 17.15 น. ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

19.00 - 22.00 น. งานเลี้ยงรับรองและพิธีมอบโล่ขอบคุณผู้สนับสนุนการประชุม

วันพุธที่ 29 มิถุนายน 2559

08.30 - 12.00 ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

12.00 - 13.00 น. พักรับประทานอาหารกลางวัน

13.00 - 17.15 น. ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการนำเสนอบทความทางวิชาการ

วันพฤหัสบดีที่ 30 มิถุนายน 2559

08.30 - 12.00 ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

12.00 - 13.00 น. พักรับประทานอาหารกลางวัน

13.00 - 17.15 น. ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการนำเสนอบทความทางวิชาการ

หมายเหตุ	พักรับประทานอาหารว่างช่วงเช้า	เวลา	10.30 - 10.45 น.
	พักรับประทานอาหารว่างช่วงบ่าย	เวลา	14.30 - 14.45 น.
	พักรับประทานอาหารกลางวัน	เวลา	12.00 - 13.00 น.

วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา
-XXV-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโฟมผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
A STUDY ON FOAM CONCRETE PROPERTIES WITH
PALM OIL FUEL ASH

ฤทธิวิทย์ กันทะวงษ์ (Krittawit Kantawong)¹

รศ. อำนวย พานิชกุลพงษ์ (Assoc.Prof. Amnour Panitkulpong)²

¹ นักศึกษาปริญญาโท, Krittawit.ce@gmail.com

² อาจารย์, ksmanee@kmitl.ac.th

มหาวิทยาลัยวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเบรชบับ CLC หรือคอนกรีตโฟมชนิดเต็มฟองอากาศที่มีหน่วยน้ำหนักในช่วง 1200 ถึง 1600 kg/m^3 (เกรด C12, C14, และ C16 ตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ มอก.2601-2556) ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) เป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) โดยน้ำหนักเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) จะศึกษาคุณสมบัติต่างกึ่งอัด อัดรวมการหดตัว การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลที่ได้ คือ ด้านกำลังรับแรงอัด(ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน) ของคอนกรีตควบคุม (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ด้านการหดตัว(ที่อายุ 75 วัน) ของคอนกรีตโฟม (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตโฟมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ ด้านการดูดซึมน้ำ(ที่อายุ 14 วัน) คอนกรีตโฟม (CT) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตโฟมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ตามลำดับ และค่าการนำความร้อนคอนกรีตโฟม (CT) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตโฟมที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ตามลำดับ ทั้งนี้ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทั้ง 4 จะเป็นผลควรรับรองเมื่อมีการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตโฟม ทั้งร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) ที่หน่วยน้ำหนัก 1200 ถึง 1600 Kg/m^3

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ, เถ้าปาล์มน้ำมัน, กึ่งอัด, อัดรวมการหดตัว, ค่าการนำความร้อน

Abstract

This research study the properties of Cellular Lightweight Concrete (CLC) or Foam Concrete with unit weight during 1200 to 1600 Kg/m^3 (type C12, C14, and C16 TIS. 2601-2556). Using Palm Oil Fuel Ash (POFA) from Chumporn Palm Oil industry

Public Company Limited is a mixture of cement 10% (P10) and 20% (P20) to improve Cellular Lightweight Concrete (CLC) by weight. Compared with Lightweight Control Concrete (CT) to study the properties of strength, autogenous shrinkage of water absorption and thermal conductivity. The result is the compressive strength (3, 7, 14 and 28 days) of Lightweight Control Concrete (CT) is higher than Foam Concrete with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The autogenous shrinkage (at 75 days) of Control Concrete (CT) is higher than Foam Concrete with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The water absorption (at 14 days) Lightweight Control Concrete (CT) is lower than Foam Concrete with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. And Thermal Conductivity Lightweight Control Concrete (CT) is higher than Foam Concrete with Palm Oil Fuel Ash 10% (P10) and 20% (P20) respectively. The results of all properties, it is certified when using Palm Oil Fuel Ash (POFA) to replace cement 10% (P10) and 20% (P20) in Foam Concrete at the unit weighs 1200 to 1600 Kg/m^3 .

Keywords: Cellular Lightweight Concrete, palm oil fuel ash, compressive strength, absorption, autogenous shrinkage, Thermal Conductivity

1. บทนำ

ปัจจุบันมีนโยบายจากภาครัฐในการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น เพราะน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ ในกระบวนการสกัดเอาน้ำมันปาล์ม เปลือกกะลา และเส้นใย จะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงและจะมีกากปาล์มคละคณเถ้าปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมาก หากต้องการกำจัด การนำมาใช้งานคอนกรีต จึงเป็นหนทางที่ใช้ประโยชน์ได้ง่ายและปลอดภัยที่สุด เนื่องจากเนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอซโซลาน คือ มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าปาล์ม

น้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตยังมีน้อย ผู้ใช้งานหรือผู้ดูแลส่วนผสมคอนกรีตก็ไม่ค่อยจะสนใจที่จะนำเอาปาล์มน้ำมันไปใช้งาน หรืออาจเข้าใจผิดถึงผลของการนำเอาปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีต แต่ยังไม่มีความวิจัยที่ศึกษาผลกระทบในระยะยาวออกมารองรับมากนัก ดังนั้นการส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาการให้นำเอาปาล์มน้ำมันในส่วนผสมคอนกรีต จึงยังคงดำเนินการอย่างต่อเนื่องและเพิ่มจำนวนมากขึ้น เพราะเอาปาล์มน้ำมันเป็นผลผลิตที่ได้ดีมากในบ้านเรา มีจำนวนมากขึ้นทุกปี หากไม่สามารถนำมาใช้ได้อีกก็นำไปทิ้ง แต่ถ้าหากนำมาใช้ได้จะเป็นการกำจัดทั้งเอาปาล์มน้ำมันและลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทิ้งเอาปาล์มน้ำมันได้อย่างเป็นรูปธรรมที่สุด ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยการนำเอาปาล์มน้ำมัน ในส่วนผสมคอนกรีตจะเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะจะเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมเรื่องการนำเอาปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นวัสดุปอลิโอสถานในงานคอนกรีต ถ้าหากประเทศไทยสามารถมีมาตรฐานอุตสาหกรรมการนำเอาปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเกิดขึ้น ย่อมเป็นแนวทางที่สำคัญในการนำเอาปาล์มน้ำมันไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม และสร้างความเชื่อมั่นในการนำเอาปาล์มน้ำมันไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตต่อไป

เอาปาล์มน้ำมัน มีองค์ประกอบเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอลิโอสถาน Class N โดยทั่วไปวัสดุปอลิโอสถานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ตัววัสดุปอลิโอสถานมีความละเอียดขนาดและพื้นที่หรือความชื้นเพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เนื่องจากปูนขาวยังไม่มีการกำหนด หรือมาตรฐานสำหรับกำหนดคุณสมบัติของเอาปาล์มน้ำมัน เพราะยังเป็นวัสดุใหม่ ไม่มีการวิจัยยังไม่แพร่หลายเมื่อเทียบกับเอาถ่านหิน ดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณมากและรวดเร็ว จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ร่วมกับคอนกรีตโฟมชนิดเดิมเพื่ออากาศ เพราะคอนกรีตโฟมไม่ได้นำไปใช้กับโครงสร้างยก (เสา, คาน, พื้น และฐานราก) แต่นำไปใช้กับโครงสร้างที่ไม่รับน้ำหนักหรือแรงกระทำไม่มาก เช่นผนัง แต่ก็มีความสำคัญคืออาศัยสาร คือช่วยแบ่งสัดส่วนพื้นที่ใช้งาน ทั้งยังมีควมรวดเร็วในการก่อสร้าง และลดปริมาณเอาปาล์มได้ปริมาณมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์ ขอบเขตและทฤษฎี

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC (Cellular Lightweight Concrete) ในด้านกำลัง, การซึมซับ, การหดตัว และการนำความร้อน โดยใช้เอาปาล์มน้ำมัน

2.1.2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตโฟมชนิดเดิมเพื่อ

2.1.3 เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและมลภาวะเนื่องจากเอาปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่นน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย

2.2 ขอบเขตการศึกษา

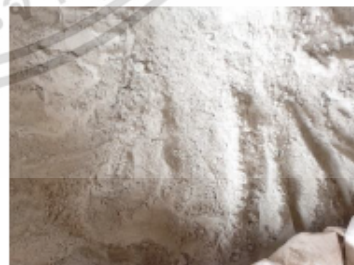
เอาปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) ที่ใช้ เป็นเอาปาล์มน้ำมันที่ได้จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จากการเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แบ่งได้ 2 ชนิด คือ ชนิดเถ้าลอย (Fly Ash) และชนิดเถ้าเปียก (Wet Ash) ปริมาณเถ้าลอยต่อเอาเปียกใน 1 วันเท่ากับ 1:10 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเอาเปียกมาทำการวิจัยเพราะมีปริมาณมากกว่า แต่องค์ประกอบทางเคมีของเอาปาล์มน้ำมันชนิดเปียก มีค่าองค์ประกอบหลักของวัสดุปอลิโอสถาน เพราะซิลิกา (SiO₂) หรือซังซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) รวมกัน ซึ่งค่าที่ได้ตามตารางที่ 1 ไม่ถึงเกณฑ์ในการนำไปใช้เป็นวัสดุยึดประสานของงานโครงสร้างที่ที่กำหนดไว้ขั้นต่ำ ร้อยละ 70 (ASTM C618)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเอาปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าเปียก (Wet Ash)

Chemical Composition (%)	เอาปาล์มน้ำมัน
Silicon Dioxide (SiO ₂)	47.6
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	1.66
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	2.37
Calcium Oxide (CaO)	11.9
Magnesium Oxide (MgO)	4.55
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0
Potassium Oxide (K ₂ O)	6.96
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.84
Loss On Ignition (LOI)	14.2

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำมาใช้กับคอนกรีตโฟมชนิดเดิมเพื่ออากาศ (Cellular Lightweight Concrete ; CLC) เพื่อใช้เป็นโครงสร้างในส่วนหนึ่งของผนัง เพราะเป็นส่วนที่ไม่รับน้ำหนักมากนัก แต่มีความสำคัญต่อองค์อาคาร คือ ใต้แปงสัดส่วนและป้องกันต่างๆ จากภายนอกไม่ให้เข้ามาในอาคาร เช่น ฝน, แสงแดด, และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ โดยในงานวิจัยจะนำเอาปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าเปียก มาทำการบดที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดละเอียดด้วยหม้อบดความเร็วสูง (Pot Mill) เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ที่ต้องใช้เวลานานเพราะเอาเปียกมีก้อนเล็ก (Slag) ที่เกิดจากการเผาเอาปาล์ม (รูปที่ 2 จะเห็นเป็นก้อนๆ) จนค่าร้อยละที่คำนวณจะลดลงรอบเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 5 (จึงนำไปใช้)

คอนกรีตโฟมเป็นชนิดเดิมเพื่ออากาศ (Cellular Lightweight Concrete ; CLC) ใช้โครงสร้าง ปูน : ทราย เท่ากับ 1 : 2.5 โดยน้ำหนัก ที่หนวยน้ำหนัก 1200 ถึง 1600 Kg/ก³ (ชนิด C12, C14, และ C16 ตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเดิมเพื่ออากาศ มอก. 2601-2556) ในการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลัง, การหดตัว, การดูดซึม และการนำความร้อน จะทำการเปรียบเทียบคอนกรีตโฟมที่ไม่ผสมเอาปาล์มน้ำมันเลย (Lightweight Control Concrete ; CT) กับ คอนกรีตโฟมชนิดเดิมเพื่ออากาศที่ผสมเอาปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) และร้อยละ 20 (P20) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio ; w/b) ที่ค่าความชื้นแฉะปกติ (ความสามารถเพื่อเข้าแบบได้ของวัสดุ) โดยใช้วิธีทดสอบการไหล (ASTM C230) เพื่อให้เกิดความสอดคล้องในการใช้งานจึงได้ทำการทดสอบโดยอ้างอิงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ในการทดสอบกำลังอัดกับการดูดซึม (มอก. 2601-2556) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS) ในการทดสอบการหดตัว (JIS A 1129) และมาตรฐาน ASTM C518 ในการทดสอบค่าการนำความร้อน



รูปที่ 1 เอาปาล์มน้ำมันชนิดเถ้าลอย (Fly Ash)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 เถ้าปลาน้ำมันชนิดเปียก(Wet Ash)

2.3 ทฤษฎีคานวอร์ชัน

2.3.1 กำลังรับแรงอัด

คอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มห้องอากาศหรือคอนกรีตโฟม จะมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 10 ถึง 140 ksc. (kg/cm²) ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมเบาสำหรับโครงสร้าง ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงอัด 100 ถึง 400 ksc. กำลังรับนี้สามารถทำให้สูงขึ้นโดยการใส่ทรายแอมมอลรวมน้ำหนักเบา แต่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า

2.3.2 การหดตัวของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีตส่วนใหญ่ได้รับไปซีเมนต์ไฮเดรต และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวได้ด้วยการยึดรั้ง การหดตัวของคอนกรีตมักพบได้โดยทั่วไปและจำเป็นต้องคำนึงถึงการออกแบบคอนกรีตด้วย ได้แก่การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง ในหลายกรณีการหดตัวทั้งสองนี้มักจะเกิดขึ้นไปด้วยกัน แต่มีกลไกและสาเหตุต่างกัน โดยการหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดขึ้นเร็วและมักจะเกิดมากในช่วงอายุต้น แต่การหดตัวแบบแห้งจะเกิดขึ้นช้ากว่า คอนกรีตที่สัมผัสอากาศจึงมีการถ่ายไอออนความชื้น ในงานวิจัยมีผู้ศึกษาเฉพาะการหดตัวแบบออโตจีนัสเพราะมีฤทธิ์คล้ายคลึงกับตัวพลาสติกห่อคอนกรีตเพื่อป้องกันผิวหน้าคอนกรีตมวลเบาระหว่างการบ่มและสูญเสียความถ่ายไอออนความชื้น

- การหดตัวแบบออโตจีนัส(Autoogenous Shrinkage)

คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ไม่มีการถ่ายไอออนความชื้นให้สภาพแวดล้อม เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมกับการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างแคปิลลารีในซีเมนต์ไฮเดรต ทำให้เกิดแรงดึงแคปิลลารี(Capillary Tension) ส่งผลให้คอนกรีตหดตัว

- การหดตัวแบบแห้ง(Drying Shrinkage) เกิดเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของช่องว่างและโพรงอากาศของคอนกรีตทำให้บริเวณผิวสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมและเกิดการหดตัว โดยการหดตัวที่เกิดขึ้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมแม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีช่องว่างคาปิลลารี(Capillary Pores) และปริมาณน้ำอิสระมาก ทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวกและมาก ดังนั้นจึงมีการหดตัวแบบแห้งที่สูง

คอนกรีตหรือซีเมนต์ไฮเดรตเมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวหรือการบวม (swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ซึมเข้าไปในซีเมนต์ไฮเดรตทำให้เกิดแรงดันแรงยึดเกาะกันและทำให้แรงดึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลงจึงทำให้คอนกรีตขยายตัว ซีเมนต์ไฮเดรตมีการขยายตัวสูงมากประมาณ 2000x10⁻⁶ ต้องใส่เซลเซียส คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำมากคือประมาณ 200x10⁻⁶ ต้องใส่เซลเซียส เพราะคอนกรีต

ประกอบด้วยมวลรวมกว่าร้อยละ 70 ของปริมาตรทั้งหมด ส่วนคอนกรีตมวลเบามีค่าประมาณ 7x10⁻⁶ ถึง 14x10⁻⁶ ต้องใส่เซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา การขยายตัวของคอนกรีตจึงเกิดจากการออกหรือเข้าของความชื้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามคอนกรีตจะไม่ขยายตัวสู่ปริมาณเต็มเมื่อน้ำหนักถึงที่สุดแล้ว และได้รับความชื้นกลับมา

3. การทดลอง

3.1 ก่อนการทดสอบคุณสมบัติ

ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตโฟมระบบ CLC ทั้ง 3 ประเภท คือ คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT), คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปลาน้ำมัน ร้อยละ 10(P10), คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปลาน้ำมันร้อยละ 20(P20) ต้องหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(Water to Binder Ratio ; w/b) ที่ความชื้นแฉะปกติ(ความสามารถในการดูดน้ำโดยธรรมชาติ) จากการใช้โต๊ะทดสอบการไหล(Flow Table) ได้ค่าตารางที่ 2 ค่าที่ได้จากตารางที่ 2 นี้เป็นค่าความชื้นแฉะของคอนกรีต จากนั้นทำการผสม ปูน : ทราย 1 : 2.5 ลงไปในไม้และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากตารางที่ 2 แล้วจึงอัดโฟมลงไปผสมเพื่อให้ได้หน่วยน้ำหนักตามต้องการโดยต้องใช้ลักษณะที่สามารถหาปริมาณได้แน่นอน โดยสามารถหาหน่วยน้ำหนักดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

โดยที่ ρ = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา (kg/m³)
 m = มวลของคอนกรีตมวลเบา (kg.)
 V = ปริมาตรความจุของภาชนะ (m³)

ต้องมีการใช้หน่วยน้ำหนักหลักของออกซิเจนแบบ (Mold) ด้วย ทั้งนี้ใช้หลักการเผื่อน้ำหนักที่ปกติอีก 150 kg/m³ เพราะมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มห้องอากาศ (มยท. 2601-2556) กำหนดให้ใช้หน่วยน้ำหนักคอนกรีตมวลเบาตอนอบแห้งเป็นเกณฑ์ในการแบ่งเกรดของคอนกรีตมวลเบา (C12,C14,C16) ซึ่งหน่วยน้ำหนักหลังจากอบแห้งจะหายไป 150 - 200 Kg/m³ เช่น ในการออกแบบคอนกรีตมวลเบาหน่วยน้ำหนัก 1600 Kg/m³ ตามตารางที่ 2 ค่าจะอยู่ในช่วง 1401 - 1600 kg/m³ ผู้วิจัยจะใช้ค่า 1500 Kg/m³ เพราะเป็นค่ากลางในช่วงดังกล่าว แล้วบวกหน่วยน้ำหนักไปอีก 150 kg/m³ จะได้ค่าที่ใช้ ออกแบบคือ 1500+150 = 1650 kg/m³ เมื่อทำการอบแห้งก่อนการทดสอบ การทดสอบกำลังรับแรง, อัตราการดูดซึม และค่าการนำความร้อน หน่วยน้ำหนักดังกล่าวก็จะอยู่ในช่วง 1550 -1600 kg/m³ ค่าที่ได้จะง่ายต่อการนำมาเปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักเดียวกัน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมและหน่วยน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ

ประเภท	ปูน : ทราย	w/b	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	เกรด
CT	1 : 2.5	0.64	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16
P10	1 : 2.5	0.67	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16
P20	1 : 2.5	0.69	1001 - 1200	C12
			1201 - 1400	C14
			1401 - 1600	C16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีดูอุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ไม้ปาล์มไม้ฉนวนเบดเสียดปริมาณที่ข้างแรงเบอร์ 325 ต่ำกว่าร้อยละ 5
3. น้ำ
4. พรายละเอียด(ผ่านตะแกรงเบอร์ 20)
5. สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent)
6. เครื่องผสมคอนกรีต
7. บีมลม
8. เครื่องฉีดโฟม
9. เครื่องเพิ่มแรงดันน้ำ
10. เครื่องชั่ง
11. แบบหล่อด้วยยางคอนกรีตขนาด 15 cm.
12. แบบหล่อคอนกรีต 4 x 4 x 16 cm.
13. ไม้แบบหล่อคอนกรีต 30 x 30 x 8 cm.
14. พลาสติคห่อคอนกรีต

3.3 วิธีผสมคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ

- 1.ผสมปูนและพรายละเอียด อัตราส่วน 1 : 2.5 (ไม่มีมวลรวมพราย) ลงในเครื่องผสมหรือมี โดยในส่วนของปูนจะใช้ไม้ปาล์มไม้ฉนวนแทนพรายละ 0 ร้อยละ 10 กับร้อยละ 20 กวนให้เข้ากันในเครื่องผสม ใส่ไม้ในอัตราส่วนที่ได้จากการหาค่าความชื้นเหลว (Consistency) ลงในไม้
- 2.ผสมน้ำยาในอัตราส่วน น้ำยา : น้ำ เท่ากับ 1 : 25 สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง 300 - 1600 กก./ลบ.ม. เพื่อให้เหมาะสมตามการใช้งาน
- 3.ติดตั้งเครื่องกำเนิดใหม่กับบีมลม จากนั้นเติมน้ำที่ผสมไว้ใส่ห้อยด้านบนของเครื่องกำเนิดโฟม
- 4.เปิดวาล์วที่ต่อกับบีมลมให้ได้อัตรา 4-6 บาร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 2-3 นาที
- 5.ทดสอบน้ำยาโฟม เมื่อเป็นถ้าฟองแล้วฉีดใส่ไม้ได้เลย แต่หากยังเป็นน้ำให้ทำขั้นตอน 4-5 ใหม่

3.4 ทดสอบกำลังอัด(Compressive Strength)

ใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาด 150 X 150 X 150 mm. มีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มม. ให้เป็นไปตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) เก็บตัวอย่างในแต่ละประเภทจากรางที่ 3 ประเภทละ 3 หน่วยน้ำหนัก ในการรับแรงอัดที่ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน(4 ค่า) ใช้วิธีการบดด้วยมือ โดยต้องใช้เครื่องกดที่อ่านละเอียดถึง 100 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราแรงอัดได้ 1.125 - 4.5 กิโลนิวตัน/วินาที

ตารางที่ 3 ทดสอบกำลังอัด

ประเภท	หน่วยน้ำหนัก (C12,C14,C16)	วัน (3,7,14,28)	w/b	จำนวน	รวม
CT	3	4	1 ค่า (0.64)	3	36
P10	3	4	1 ค่า (0.67)	3	36
P20	3	4	1 ค่า (0.69)	3	36
					108

3.5 อัตราการดูดซึมน้ำ

ใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาด 150 X 150 X 150 มม. มีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 มม. ให้เป็นไปตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) เก็บตัวอย่างในแต่ละประเภทจากรางที่ 4 จะได้ทั้งหมด 27 ตัวอย่าง โดยให้อบชิ้นทดสอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชม. และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชม.

ตารางที่ 4 ทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

ประเภท	หน่วยน้ำหนัก (C12,C14,C16)	วัน (14)	w/b	จำนวน	รวม
CT	3	1	1 ค่า (0.64)	3	9
P10	3	1	1 ค่า (0.67)	3	9
P20	3	1	1 ค่า (0.69)	3	9
					27

จากนั้นชั่งมวลทดสอบแต่ละก้อนเป็นมวลเมื่อแห้ง จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำสะอาด 24 ชม. แล้วยกออก ให้น้ำแห้งน้ำออกก่อนชั่งใหม่ภายใน 3 นาที มวลที่ได้ถือเป็นมวลของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก กรณีไม่ผ่านให้นำไปอบอีกครั้งแล้วทำเหมือนเดิม

วิธีคำนวณ

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \tag{2}$$

โดยที่ A = อัตราการดูดซึมน้ำ เป็นร้อยละ (เศษส่วนโดยมวล)
 m_1 = มวลของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง เป็นกรัม
 m_2 = มวลของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก เป็นกรัม

3.6 อัตราการหดตัว(Autogenous Shrinkage)

ใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 4 x 4 x 16 cm. เก็บตัวอย่างในแต่ละประเภทจากรางที่ 5 จะได้ 27 ชิ้นทดสอบ ใช้พลาสติกห่อหุ้มเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ทำการวัดขนาดตัวอย่างทดสอบทั้งหมดทุกวันโดยเครื่องมือวัด Autogenous Shrinkage

ตารางที่ 5 ทดสอบอัตราการหดตัว

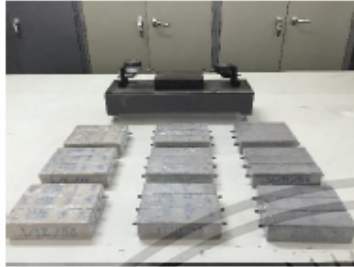
ประเภท	หน่วยน้ำหนัก (C12,C14,C16)	w/b	จำนวน	รวม
CT	3	1 ค่า (0.64)	3	9
P10	3	1 ค่า (0.67)	3	9
P20	3	1 ค่า (0.69)	3	9
				27

สามารถคำนวณหาการยิดหดตัวได้จากสมการ

$$\text{Autogenous Shrinkage} = \frac{(X_0 - X_n)}{L_0} \tag{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ X_0 = ระยะเริ่มต้นที่อายุ 1 วันหลังถอดแบบ (mm.)
 X_n = ระยะที่อายุ n วัน (mm.)
 L_0 = ระยะห่างของหัวเกจปลั๊ก (mm.)



รูปที่ 3 เครื่องมือวัด Autogenous Shrinkage

3.7 การหาค่าการคายน้ำความชื้น

เป็นการสังเกตอย่างซ้ดทดสอบขนาด 30 x 30 x 8 cm. อังกรม
 วิทยาศาสตร์บริการ เนื่องจากเครื่องมือไม่สามารถหาได้จากห้องปฏิบัติการ
 คอนกรีตทั่วไป โดยวิธีการทดสอบ อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C518 จึงจำนวน
 ที่ทดสอบตามตารางที่ 6

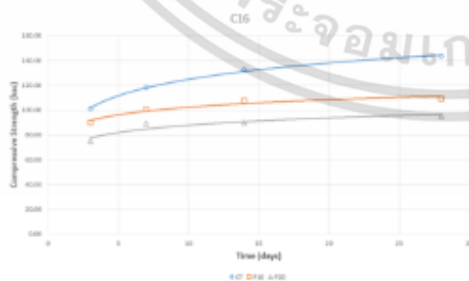
ตารางที่ 6 ทดสอบค่าการคายน้ำความชื้น

ประเภท	หน่วยน้ำหนัก (C12,C14,C16)	วัน (28)	w/b	จำนวน	รวม
CT	3	1	1 ค้า (0.64)	2	6
P10	3	1	1 ค้า (0.67)	2	6
P20	3	1	1 ค้า (0.69)	2	6
					18

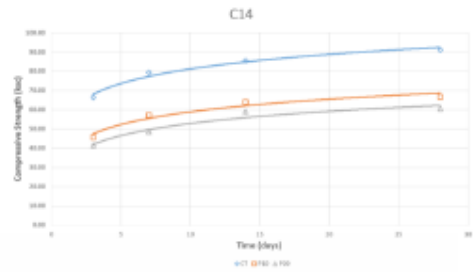
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

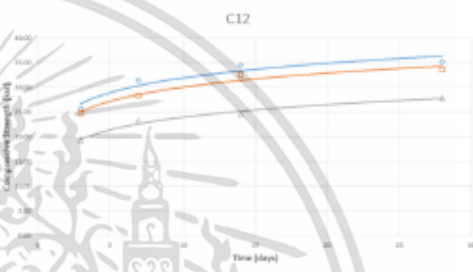
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาทั้ง 3 ประเภท(CT,
 P10, P20) เกรดเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา(CT, P10, P20)เกรด C16



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา(CT, P10, P20)เกรด C14

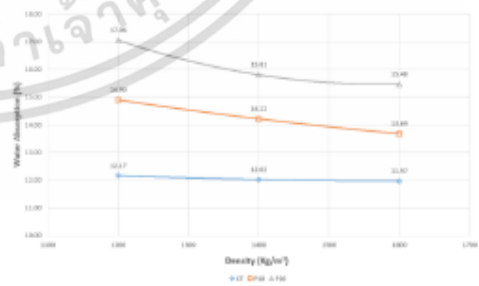


รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา(CT, P10, P20)เกรด C12

มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ (มอก. 2601-2556)
 กำหนดให้กำลังรับแรงอัดขั้นต่ำสำหรับคอนกรีตมวลเบาเกรด C12 ต้องไม่
 น้อยกว่า 25.5 ksc. และเกรด C14, C16 ต้องไม่น้อยกว่า 51 ksc. ที่อายุ
 คอนกรีต 28 วัน แม้ว่าคอนกรีตมวลเบา P10 และ P20 จะมีค่ากำลังรับ
 แรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตโฟมควบคุม (CT) ทั้ง 3 เกรด (C12, C14, C16) แต่ค
 ็นี้อาจผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556)
 กำหนดในเรื่องกำลังรับแรงอัด

4.2 ผลการวัดสมบัติการดูดซึมน้ำ

การทดสอบจะอ้างอิงจากมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็ม
 ฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) ทั้งหมดได้ค่าดังกราฟรูปที่ 7



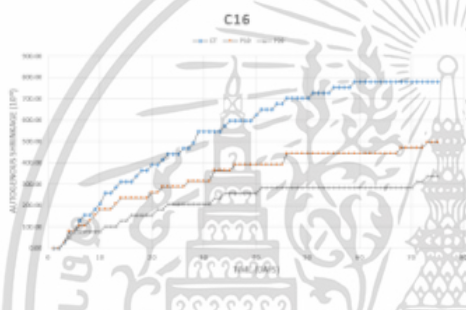
รูปที่ 7 ค่าอัตราการดูดซึมน้ำกับหน่วยน้ำหนักคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานกำหนดให้อัตราส่วนการดูดซึมสำหรับคอนกรีตโพลีเมอร์ C12 ต้องไม่เกินร้อยละ 23 และเกรด C14, C16 ต้องไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบผ่านเกณฑ์ทุกหน่วยน้ำหนัก ทุกประเภทคอนกรีตโพลีเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ตามกราฟรูปที่ 7 จะเห็นว่าค่าการดูดซึมของคอนกรีตโพลีเมอร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมาก อัตราการดูดซึมน้ำก็จะมากไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) สูง เพราะค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ในเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่ติดน้ำมาก ทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตหรือมวลตัวมากขึ้น ดังนั้นเมื่ออบแห้งแล้วนำไปบ่มน้ำอีก คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่สูญเสียน้ำ (จากการอบแห้ง) ก็จะดูดน้ำมากกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT)

4.3 ผลการทดสอบการหดตัว

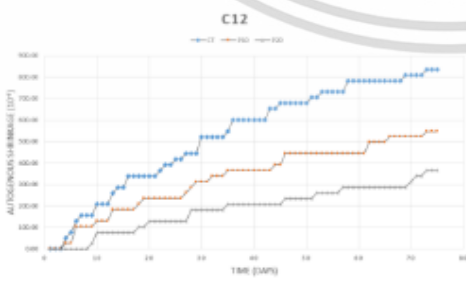
การทดสอบการหดตัว จะอ้างอิงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนปูน (IS A 1129) ในการทดสอบการหดตัว จะแสดงผลดังรูปที่ 8-10



รูปที่ 8 อัตราการหดตัวเกรด C16 ทั้ง 3 ประเภท ในหน่วย μm.



รูปที่ 9 อัตราการหดตัวเกรด C14 ทั้ง 3 ประเภท ในหน่วย μm.

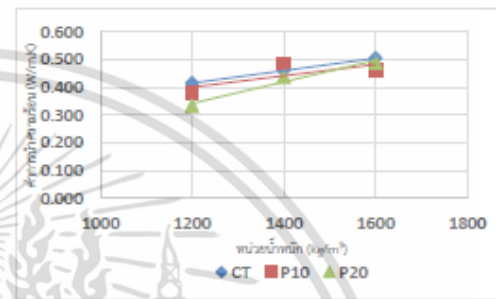


รูปที่ 10 อัตราการหดตัวเกรด C12 ทั้ง 3 ประเภท ในหน่วย μm.

การทดสอบคุณสมบัติด้านการหดตัวทำการวัดตัวอย่างทดสอบทุกวัน เป็นเวลา 2 เดือนครึ่ง (75 วัน) ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติด้วยวิธีนี้ ทั้ง 3 เกรดคอนกรีต (C12, C14, C16) คอนกรีตมวลเบาชนิด P20 มีการหดตัวน้อยที่สุด รองลงมาเป็นชนิด P10 และคอนกรีตควบคุม CT

4.4 ผลการทดสอบหาค่าการนำความร้อน

ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ได้ค่าตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 ค่าการนำความร้อน

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 การรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจะมากกว่าหรือน้อยขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักนั้น คือ หน่วยน้ำหนักมากจะมีกำลังรับแรงอัดมาก ทั้งนี้เพราะหน่วยน้ำหนักมากจะมีรูพรุนภายในเนื้อคอนกรีตมวลเบาน้อยกว่าทำให้การยึดเกาะของวัสดุผสมยึดเกาะกันได้ดีและจะมีค่าลดลงตามความพรุนที่เพิ่มมากขึ้น หรือหน่วยน้ำหนักกลดลงนั่นเอง ถ้าเทียบกับทั้ง 3 ประเภท คอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดโดยประเภท P10 และ P20 มีค่าน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ

5.2 การดูดซึม

หน่วยน้ำหนักที่มากกว่าจะมีร้อยละของการดูดซึมน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักที่น้อยกว่า ทั้งนี้เพราะคอนกรีตโพลีเมอร์ที่มีหน่วยน้ำหนักน้อย จะมีความพรุนที่มากกว่าทำให้มีการดูดซึมน้ำได้มากกว่า และเมื่อเทียบกับทั้ง 3 ประเภท (CT, P10, P20) ประเภทที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่า จะมีร้อยละการดูดซึ่มสูงกว่า (ถือว่าแย่กว่า) ทั้งนี้เพราะปริมาณของ LOI (Loss On Ignition) หรือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้มีค่าสูงถึงร้อยละ 14.7 (ตารางที่ 1) LOI ส่วนใหญ่ที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันจะเป็นถ่านที่ติดน้ำมาก จึงทำให้อัตราส่วนน้ำต้องวัสดุประสาน (w/b) มีค่าขึ้นขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 2) ที่อัตราส่วนปูน : ทราย เท่ากัน ดังนั้น เมื่อทำการอบคอนกรีตให้แห้งแล้วนำไปบ่มน้ำ (ทดสอบการดูดซึม) เพื่อหาอัตราการดูดซึม คอนกรีตมวลเบาประเภทที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าแต่ทั้งนี้ทั้งนี้ค่าที่ได้ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเดิมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) ของการทดสอบอัตราการดูดซึม

5.3 การหดตัว

ในเรื่องการหดตัว พิจารณาจากส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาชนิดเดิมฟองได้แก่ ปูนซีเมนต์, ทรายละเอียด (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 20), น้ำ, ฟองโพลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเถ้าปาล์มน้ำมัน(P10, P20) รวมรวม(ทรายละเอียด)เรียกได้ว่าแทบจะไม่มีการหดตัวเลย ฉะนั้น การหดตัวจะเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุผสมเท่านั้น คือ ปูน+น้ำ+ฟองโฟม(CT) หรือ ปูน+เถ้าปาล์มน้ำมัน+น้ำ+ฟองโฟม(P10, P20) ผลจากการทดลอง(รูปที่ 8-10) จะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาเกรดเดียวกัน(C12, C14, C16) ประเภทที่มีเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมมากที่สุดจะมีอัตราการหดตัวน้อยสุด โดยอัตราการหดตัวจะเป็น P20 ถัดมาเป็น P10 และ CT ตามลำดับ นั่นคือคอนกรีตมวลเบาที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมจะช่วยลดการหดตัวแบบ Autogenous shrinkage

5.4 ค่าการนำความร้อน

คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ดีคือ เป็นฉนวนกันร้อน (ค่าการนำความร้อนต่ำ) จึงจะทำให้ภายในที่อยู่อาศัยอุณหภูมิไม่สูงและประหยัดพลังงาน วัสดุใดจะนำความร้อนหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (k) ยิ่งมีค่ามากยิ่งนำความร้อนก็จะสูง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตมวลเบาถึงหน่วยน้ำหนักน้อย ค่าการนำความร้อน (k) ก็จะไม่ยิ่งยวดด้วย เพราะค่าการนำความร้อนจะถ่ายโอนจากที่อุณหภูมิสูงไปต่ำ โดยไม่แสดงที่ได้รับความร้อนจะผันสลับไปจนกับไม่แสดงที่อยู่ข้างเคียง (ความหนาแน่นมาก) กันไปเรื่อยๆ แต่ถึงภายในมีความหนาแน่นน้อยอย่างกรณีโพรงในคอนกรีตมวลเบา การส่งถ่ายก็จะน้อยลง เป็นผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่า (โพรงเยอะ) จะเป็นฉนวนกันร้อนดีกว่า (นำความร้อนได้น้อย) คอนกรีตมวลเบาที่หน่วยน้ำหนักมากกว่า และเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนักก็เหมือนกันกับคอนกรีตทั้ง 3 ประเภท คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 (P20) มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด ถัดมาเป็นคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 (P10) และคอนกรีตมวลเบาควบคุม (CT) ซึ่งถ้าโดยทั่วไปเป็นฉนวนกันร้อนอยู่แล้ว เมื่อนำมาผสมกับคอนกรีตมวลเบาถึงทำให้อุณหภูมิที่ด้านในเย็นขึ้นอีก

ข้อแนะนำ

การนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ควรมีการตรวจสอบองค์ประกอบเคมีเป็นอันดับแรก ถ้ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยมีถือว่าสามารถนำไปใช้ได้ ผู้วิจัยแนะนำว่าควรวีซีที่ร้อยละ 10 (P10) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพราะจากการสอบถามผู้ประกอบการ พบไม่มีรายใดมีถึง 28 วัน ส่วนมากจะนับ 10-14 วัน แต่อัตราส่วนผสมและการควบคุมกระบวนการผลิตก็ทำให้กำลังอัดผ่านเกณฑ์เมื่อเทียบกับกำลังอัดชั้นค่าที่ 28 วัน ก็ทำให้กำลังอัดและกระบวนการผลิตไม่มีการควบคุมที่ดีเหมือนการฟิวรี่จ้อ เช่น ผู้วิจัยจะใช้ทรายที่สภาพอื่นด้วยแห้งโดยการอบทรายให้แห้งแล้วผสมน้ำในอัตราส่วนน้ำ : ทรายละเอียด(ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 20) เท่ากับ 1 : 250 ใช้กรวยปากคัสสูง 7.5 cm. ตรวจสอบสภาพพร้อมด้วยแห้ง เมื่อเทียบกับผู้ประกอบการจะใช้วัดน้ำเนื่องจากทรายละเอียดที่ซื้อมามีความชื้นสูง ถ้าส่วนผสมโดยน้ำหนักแล้วจะทำให้ได้ครึ่งส่วนน้ำด้วยวัสดุผสมสูงชัน จะทำให้กำลังอัดลดลง เมื่อพิจารณาจากราฟที่กำลังรับแรงอัด(รูปที่ 4-6)ที่อายุคอนกรีต 14 วัน แม้ว่าจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิดเต็มฟองอากาศ(มอก. 2601-2556) แต่ถือว่าใกล้เคียงมาก และถ้าใช้วิธีควบคุมไม่ติดตั้งวาล์ว ก็จะส่งผลต่อกำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุในการทำวิจัย รวมถึง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดส่งเถ้าปาล์มน้ำมันให้

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00: Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.
- [2] ACI. "Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete" ACI209.1R-05., 2005.
- [3] Price, W.H. "Factors Influencing Concrete Strength". Proc. ACI, vol. 47, 1951, pp. 417-432.
- [4] Davis, R.E., and H.E. Davis. "Flow of concrete under the action of Sustained Loads". Proc. ACI, vol. 27, 1931, pp. 837-901.
- [5] Troxell, G.E., Davis, H.E., and Kelly, J.W. Composition and Properties of Concrete. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1968, pp. 247.
- [6] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 9 ประจำเดือน เมษายน 2010.
- [7] วินัด ช่อวีเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 9. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] กวีระ วาสาธิต. 2551. "การศึกษาผลของฟองอากาศในมวลเบาแบบ CLC ที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม" วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] วิราชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาสิต, ศักดิ์สินธุ์ แวควัม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. "วัสดุโพลีโพรพิลีนใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., พ.ศ. 2546, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474
- [10] ชาดิสาช พรหมวงศ์, ศาสวีต เอี่ยมโหมดและวิไลรัตน์ สุขศรี. 2549. "อิทธิพลของสารเพิ่มฟองอากาศที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเบา". ปริทัศน์นิพนธ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกฤตวิทย์ กันทะวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด 31 มกราคม 2532
ที่อยู่ 142/1 หมู่ 11 ต.แม่คำ อ.แม่จัน
จ.เชียงราย 57240

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2547-2550 มัธยมศึกษา จุฬารัตนราชวิทยาลัย เชียงราย
พ.ศ. 2550-2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผลงานทางวิชาการ

พ.ศ. 2559 “การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ผสมเถ้าปาล์ม
น้ำมัน”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้