การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC เพื่อใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ที่ใช้ในมาตรฐานอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ของกรมทางหลวง

A STUDY ON THE PROPERTIES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE (CLC) IN REPLACING MORTAR USED IN SUBSOIL STANDARD UNDER SUBSEALING OF THE DEPARTMENT OF HIGHWAYS

ฐาปกรณ์ ตันวานิช
THAPAGORN TUNVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMITL-2018-EN-M-093-117

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC เพื่อใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ที่ใช้ในมาตรฐานอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ของกรมทางหลวง

A STUDY ON THE PROPERTIES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE (CLC) IN REPLACING MORTAR USED IN SUBSOIL STANDARD UNDER SUBSEALING OF THE DEPARTMENT OF HIGHWAYS

ฐาปกรณ์ ตันวานิช

THAPAGORN TUNVANICH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-093-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON THE PROPERTIES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE (CLC) IN REPLACING MORTAR USED IN SUBSOIL STANDARD UNDER SUBSEALING OF THE DEPARTMENT OF HIGHWAYS

THAPAGORN TUNVANICH

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
2018

KMITL-2018-EN-M-093-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC เพื่อใช้ทดแทนมอร์ต้าที่ใช้ในมาตรฐานอุดซ่อมโพรงใต้พื้นแผ่นถนนคอนกรีต (Subsealing) ของกรมทางหลวง
Thesis Title	A Study on the Properties of Cellular Lightweight Concrete (CLC) in Replacing Mortar used in Subsoil Standard under Subsealing of the Department of Highways
นักศึกษา	นายฐาปกรณ์ ตันวานิช
รหัสประจำตัว	56601224
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์	KMITL-2018-EN-M-093-117

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
รศ.ดร.คมสัน	มาลีสี	
ผศ.ดร.อำพน	จรัสจรุงเกียรติ	
รศ.สุวัฒน์	ถิรเศรษฐ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLCเพื่อใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ที่ใช้ในมาตรฐานอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ของกรมทางหลวง
นักศึกษา	นายฐาปกรณ์ ตันวานิช
รหัสประจำตัว	56601224
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์

บทคัดย่อ

การอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงเป็นวิธีซ่อมโพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต โดยวิธีการเจาะรูแผ่นพื้นให้ทะลุบริเวณที่มีโพรงอยู่ข้างใต้ แล้วฉีดด้วยมอร์ต้าร์ให้เต็มโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ที่มีคุณสมบัติของส่วนผสมภายใต้เงื่อนไขตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง โดยการหาสัดส่วนที่เหมาะสมจากปัจจัยหลัก 3 อย่างอันได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ในช่วง 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นทำการทดลองและทดสอบหากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการไหล และความสามารถรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ ซึ่งผลการการศึกษาพบว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.5 และปริมาณโฟม อยู่ที่เหมาะสมที่ 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A study on the properties of Cellular Lightweight Concrete (CLC) in replacing mortar used in subsoil standard under subsealing of the Department of Highways
Student	Mr.Thapagorn Tunvanich
Student ID.	56601224
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Suwat Teeraset

ABSTRACT

Base subsealing by the standards of the Department of Highways is one of the choices to repair cavities under concrete pavement. It was done by drilling into cavity under the paving slab and injecting with mortar to fill of the cavity. This aim of this research was to present the properties of CLC concrete with qualities of mixtures under the Department of Highway. The parameters in this study to achieve the criteria were the finding of the right proportion of three factors: the ratio of water to cement at 0.40 to 0.45, the ratio of sand-to-cement at 1.5 to 1.75, and the quantity of foams at 30% to 35%. After that, the experiment was carried out to find a predictive equation for compressive strength, workability, direct tensile strength. The result showed that the optimum ratio of water to cement and sand to cement were 0.40 to 0.45 and 1.5, respectively. The appropriate quantity by foam were 30% by volume

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะตลอดจนแนวทางในการทำวิจัยนี้ ให้คำชี้แนะในการแก้ไขปัญหา ให้ความรู้และประสบการณ์ อีกทั้งจัดหาเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับการทำวิจัยนี้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณสมบัติ คุณมานิตย์ คุณเจี๊ยบ คุณนิล ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองและอำนวยการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการอีกทั้งขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่บำรุงอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ทำให้การวิจัยนี้ให้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ฐาปกรณ์ ตันวานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญตาราง..... VI
สารบัญรูป..... VII
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 1
1.3 ขอบเขตการศึกษา..... 2
1.4 วิธีการศึกษา..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3
2.1 คอนกรีตมวลเบา..... 3
2.1.1 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC)..... 4
2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด..... 4
2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง..... 6
2.4 การทดสอบการไหล..... 7
2.5 มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing)
ของกรมทางหลวง..... 7
2.5.1 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC)..... 7
2.5.2 วัสดุ..... 7
2.5.3 คุณสมบัติของส่วนผสม..... 8
2.6 การทดลองแคลิฟอร์เนียแบริ่งเรโช (California Bearing Ratio)..... 9
2.7 การหาราคาต้นทุนคอนกรีตมวลเบา..... 9

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 11
3.1 การออกแบบการทดลอง..... 11
3.2 การออกแบบส่วนผสม..... 11
3.3 วิธีการผลิตและการทดสอบคอนกรีตมวลเบา..... 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ..... 13
3.3.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตมวลเบา..... 16
3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา..... 17

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล..... 25
4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน..... 25
4.1.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน 25
4.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน 27
4.2 ผลการทดสอบอัตราการไหล..... 29
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน..... 31
4.4 ผลการหาราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบา..... 33
4.5 ผลทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio)..... 34
4.6 ผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต..... 41

บทที่ 5 สรุป..... 42
5.1 สรุปผล..... 42
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 43

บรรณานุกรม..... 44
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก.ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน
ของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์..... 46
ภาคผนวก ข.ผลการทดสอบกำลังรับดึง
ของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์..... 51
ภาคผนวก ค.ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช(California Bearing Ratio)..... 54
ภาคผนวก ง.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23..... 67
ประวัติผู้เขียน..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมต่างๆ ด้วยท่อนเหล็กกดที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว	9
2.2 ขอบเขตของข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง	10
3.1 ขอบเขตของข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง	11
3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร	13
3.3 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้	18
3.4 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้	19
3.5 ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมต่างๆ ด้วยท่อนเหล็กกดที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว (19.35 ตาราเซนติเมตร)	21
4.1 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 7 วัน	25
4.2 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 28 วัน	27
4.3 อัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ	29
4.4 กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างรูปบริเคต ที่อายุ 28 วัน	31
4.5 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ส่วนผสมต่างๆ	33
4.6 ผลการทดสอบ C.B.R. ของคอนกรีตมวลเบา	34
5.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่เวลาและความหนาแน่นต่างกัน	5
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (%)	6
2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง กำลังรับแรงดึงผ่าซีก และการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว	6
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	14
3.2 น้ำสะอาด	14
3.3 มวลรวมละเอียด	14
3.4 น้ำยาผลิตฟองโฟม	14
3.5 เครื่องผสมคอนกรีต (Mixer)	15
3.6 ปั๊มลม	15
3.7 ปั๊มน้ำ	15
3.8 หัวฉีดฟองโฟม	15
3.9 หลอดแก้วสำหรับตวงน้ำ	15
3.10 เครื่องชั่ง	15
3.11 ตะแกรงร่อนทราย	15
3.12 แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์	15
3.13 แบบหล่อรูปทรางบริเคต	16
3.14 ฟองโฟมที่ใช้ในการผสม	17
3.15 ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน	17
3.16 การบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว	17
3.17 เครื่องทดสอบ	18
3.18 ลักษณะตัวอย่างการวิบัติ	18
3.19 ลักษณะตัวอย่างการวิบัติขาดออกจากกัน	19
3.20 กรวยทดสอบอัตราการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939	20
3.21 แบบหล่อรูปทรงปริซึม	24
3.22 เครื่องวัดเครื่องวัด Total Shrinkage	24
3.23 Digital Dial Gauge	24
3.24 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเสร็จ	24
3.25 การถอดแบบเมื่ออายุ 24 ชม	24
3.26 ตัวอย่างทดสอบทรงปริซึม	24
3.27 การบ่มในน้ำสะอาด	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 การวัดค่าการหดตัว	24
4.1 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 7 วัน	26
4.2 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุครบ 7 วัน	26
4.3 เนื้อภายในคอนกรีตมวลเบาจะมีฟองอากาศแทรกอยู่	27
4.4 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน	28
4.5 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงของอัดมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ ที่อายุครบ 28 วัน	28
4.6 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่ออัตราการไหลของโฟมคอนกรีต	30
4.7 กราฟแสดงอัตราการไหลของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ	30
4.8 ฟองอากาศขนาดเล็กแทรกภายในเนื้อคอนกรีตสด	31
4.9 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน	32
4.10 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ ที่อายุครบ 28 วัน	32
4.11 ลักษณะวิบัติแสดงให้เห็นถึงเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบารูปบริเคต ที่มีฟองอากาศแทรกอยู่	33
4.12 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 10.51 เปอร์เซ็นต์	35
4.13 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 15.01 เปอร์เซ็นต์	35
4.14 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 26.96 เปอร์เซ็นต์	36
4.15 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 32.55 เปอร์เซ็นต์	36
4.16 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 19.58 เปอร์เซ็นต์	37
4.17 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 34.34 เปอร์เซ็นต์	37
4.18 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 39.68 เปอร์เซ็นต์	38
4.19 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 56.46 เปอร์เซ็นต์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 19.08 เปอร์เซ็นต์	39
4.21 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 26.45 เปอร์เซ็นต์	39
4.22 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 40.44 เปอร์เซ็นต์	40
4.23 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 54.94 เปอร์เซ็นต์	40
4.24 ค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ถนนทางหลวงในประเทศไทย มี 2 ประเภท คือ ถนนลาดยาง (Asphalt Pavement) และถนนคอนกรีต (Concrete Pavement) และเนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันนั้นมีปริมาณการจราจรที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วประกอบกับยังคงมีผู้ประกอบการบรรทุกน้ำหนักเกินตามที่กฎหมายกำหนด จึงส่งผลให้ถนนได้รับความชำรุดเสียหายเร็วกว่าอายุการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ อีกทั้งรอยแยกเล็กๆบนพื้นถนนคอนกรีตเมื่อเวลาฝนตกน้ำจะซึมผ่านรอยแยกนั้นเมื่อมีรถบรรทุกจากการจราจรกดทับ น้ำที่อยู่ใต้แผ่นพื้นจะถูกบีบอัดออกมาพร้อมมวลรวมละเอียดกระจายอยู่บนพื้นผิวคอนกรีตหรือเรียกว่าการสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างทาง (Pumping) จึงทำให้ภายใต้พื้นผิวถนนคอนกรีตเป็นโพรงได้

ปัจจุบันการสร้างถนนใหม่ทดแทนถนนเดิมทำให้เป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณแผ่นดิน ซึ่งการซ่อมแซมน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากกว่า เพราะสามารถแก้ปัญหาได้ตรงจุด และจำกัดงบประมาณได้โดยง่าย โดยการซ่อมแซมนั้นก็มีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมกับการแก้ไขปัญหานั้นๆและปัจจัยอันจำกัดของผู้ซ่อมแซมนั้นด้วย

คอนกรีตมวลเบาในปัจจุบันนั้นมีการพัฒนาไปมากและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในวงการก่อสร้าง ด้วยส่วนผสมที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป ขั้นตอนการผสมที่ไม่ยุ่งยาก เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งคุณสมบัติเสมือนคอนกรีตสดแต่ มีความพิเศษเฉพาะตัวและน้ำหนักที่เบากว่าคอนกรีตทั่วไปเพราะมีฟองอากาศเล็กๆเข้าไปแทรกในส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์เพสต์ โดยคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้จะเรียกว่า “Foam Aerated Concrete” หรือ “Cellular Lightweight Concrete”

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าถูกพัฒนาขึ้น ณ เมืองสต๊อกโฮม ประเทศสวีเดน ราวปี ค.ศ. 1900 เดิมทีเป็นที่รู้จักในนาม “gas concrete” ซึ่งใช้มากในวัสดุอาคารในแง่ของผลิตภัณฑ์ฉนวนความร้อน หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกเผยแพร่ในหลายประเทศอย่างรวดเร็ว จุดเด่นในการพัฒนาวัสดุนี้ในด้านของวิธีการและคุณภาพ จึงทำให้เป็นที่นิยมสำหรับการใช้งานประเภท อิฐ วัสดุเติมช่องว่าง และงานถนน(Andrew & William, 1978).

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีคุณสมบัติสามารถใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ในการอุดโพรงช่องว่างใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต เพื่อเสริมความแข็งแรงของชั้นทางใต้ถนนคอนกรีตและซ่อมแซมความเสียหายที่อาจจะขยายตัวทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างแผ่นพื้นถนนคอนกรีตได้ ตามมาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) กรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม.327/2543

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่สามารถนำมาทดแทนคอนกรีตมอร์ต้าร์เพื่อใช้อุดโพรงใต้พื้นถนนคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวง
2) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและคอนกรีตมอร์ต้าร์
3) เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ใช้แทนมอร์ต้าร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1) ศึกษาและทดสอบอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย 3 ปัจจัย 2 ระดับ ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร 32 การทดลอง และตัวอย่างรูปบริเคต 16 การทดลอง การทดลองละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 144 ตัวอย่าง โดยขอบเขตปัจจัยที่ใช้ควบคุมมีดังนี้
   - อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2 ระดับ ได้แก่ 0.40 และ 0.45
   - อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 2 ระดับ ได้แก่ 1.50 และ 1.75
   - ปริมาณฟองโฟม 2 ระดับ ได้แก่ 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2) คุณสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่
   - กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน
   - การทดสอบความสามารถในการไหล (Flow Cone Method)
   - ทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength)
   - การรับกำลังกับวิธีการวัดความต้านทางแรงเฉือนของดิน (C.B.R. Test)
   - การทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์

1.4 วิธีการศึกษา

1) ทบทวนงานวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์
2) ออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์
3) ทดลองผสมคอนกรีตคอนกรีตมวลเบา และมอร์ต้าร์ในอัตราส่วนที่สามารถเปรียบเทียบกันได้
4) ผสมและทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตของกรมทางหลวงทล.ม.327/2543
5) ทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง การทดสอบการหด/ขยายตัวของคอนกรีตมวลเบา เปรียบเทียบการกับการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช
6) วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ในมาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตของกรมทางหลวง
7) เปรียบเทียบความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ หากใช้คอนกรีตมวลเบาแทนมอร์ต้าร์

1.5ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้อัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาประเภท CLC สำหรับสามารถใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ในการอุดซ่อมโพรงใต้พื้นถนนคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

2) ได้อัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาที่มีราคาถูก แต่ยังคงคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตของกรมทางหลวง

3) นำส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสมทดแทนชั้นรองพื้นทาง เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วกว่า สามารถเปิดใช้ถนนได้เร็ว ลดแรงงาน และผลกระทบต่อสังคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

การใช้คอนกรีตมวลเบาชนิดเติมอากาศหรือคอนกรีตพรุน (Aerated Concrete) สำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทยเริ่มมีบทบาทในช่วงปี พ.ศ. 2537 ภายหลังการประกาศใช้พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในปี พ.ศ. 2535 เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมอญและคอนกรีตทั่วไป จึงถูกนำมาใช้ในการผลิตบล็อกคอนกรีตสำหรับก่อผนังอาคาร อีกทั้งบล็อกคอนกรีตมวลเบายังช่วยลดน้ำหนักผนังอาคารลงได้มาก ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการก่อสร้างอาคารที่ต้องการประหยัดพลังงาน โดยคอนกรีตพรุนชนิด AAC ได้ถูกนำมาใช้ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 โดยบริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่นโปรดัคส์ จำกัด (มหาชน) สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC) ที่มีข้อได้เปรียบคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC ทั้งในแง่กระบวนการผลิตและการลงทุน ได้มีการนำมาใช้ในประเทศไทยเมื่อประมาณ 2 ปีที่ผ่านมาเท่านั้น ข้อดีอีกประการของการใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า นอกเหนือจากการประหยัดพลังงานและลดน้ำหนักสิ่งก่อสร้างคือ ไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบหรือหินในการผลิต ซึ่งในปัจจุบัน หินมีแนวโน้มที่จะขาดแคลนและราคาสูงขึ้น อีกทั้งการผลิตหินยังก่อให้เกิดมลภาวะจากฝุ่นอีกด้วย

น้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตสามารถทำได้โดยใช้คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) โดยปกติแล้ว คอนกรีตมวลเบาจะมี 2 ชนิดขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ใช้ผลิต ชนิดแรกได้แก่คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate Concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักเบาแทนการใช้มวลรวมปกติ และชนิดที่สองได้แก่คอนกรีตพรุน (Aerated Concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ใช้การเติมฟองอากาศเข้าสู่เนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบหรือหิน ข้อดีของการใช้คอนกรีตพรุนคือความเป็นฉนวนและความทนไฟของเนื้อคอนกรีตเนื่องจากโพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมากที่อยู่ภายใน ดังนั้นการใช้คอนกรีตพรุนในการทำผนังอาคารจะช่วยป้องกันปริมาณความร้อนที่จะถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคาร (มีค่า OTTV ต่ำ) เสมือนเป็นฉนวนกันความร้อนจากภายนอกอาคาร ช่วยลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศได้ ทั้งนี้ คอนกรีตพรุนยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามกรรมวิธีการผลิตกล่าวคือ ประเภทแรกจะใช้การผสมของปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว น้ำ และสารกระจายฟองอากาศ แล้วผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงด้วยเครื่องจักรที่มีมาตรฐาน (โดยคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้เรียกว่า Autoclaved Aerated Concrete หรือ AAC) ซึ่งมีค่าการลงทุนที่สูงมาก ส่วนประเภทที่สองนั้นเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete หรือ CLC) โดยใช้การผสมของปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ร่วมกับ โฟมเหลว (Pre-formed Foam) ซึ่งเป็นตัวเพิ่มฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต (คอนกรีตชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าโฟมคอนกรีต - Foamed Concrete) ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีข้อได้เปรียบคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC ในแง่ที่ไม่ต้องผ่านการอบไอน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ทำให้การลงทุนค่อนข้างต่ำอีกทั้งยังสามารถพัฒนากรรมวิธีการผลิตได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตมวลเบา คือผลิตภัณฑ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างผนัง ด้วยคุณสมบัติพิเศษที่มีน้ำหนักเบาและสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกถึง 4 เท่า และดีกว่าอิฐมอญ 6 - 8 เท่า ทำให้ประหยัดการใช้พลังงาน ทนต่อเพลิงไหม้ที่อุณหภูมิสูง สามารถกันไฟได้ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส (นิตย์รดี ดอเล๊าะ, 2552)

อิฐมวลเบาความจริงไม่ใช่อิฐ แต่เป็นคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ โดยใช้เทคนิคเติมสารเคมีให้คอนกรีตพองฟู มีรูพรุนเล็กๆ เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ทำให้มีน้ำหนักเบา และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแบบเดียวกับโฟม ซึ่งจะเรียกง่ายๆว่า “โฟมคอนกรีต”

2.1.1 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (CLC)

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete หรือ CLC) คือคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และ โฟมเหลว (Pre-formed Foam) ซึ่งเป็นตัวเพิ่มฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต โดยที่ไม่มีส่วนประกอบของมวลรวมหยาบหรือหิน ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้จะสลายไปเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตสิ้นสุดลง เหลือไว้เพียงช่องว่างอากาศขนาดเล็กสม่ำเสมอจำนวนมากมายภายในเนื้อคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตที่ได้จึงมีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบา โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งคุณสมบัติทางวิศวกรรม คุณสมบัติด้านกำลัง และคุณสมบัติด้านความคงทนจะแปรเปลี่ยนตามปริมาณช่องว่างอากาศหรือความหนาแน่นของตัวคอนกรีตนั่นเอง การประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในต่างประเทศเป็นเวลาหลายสิบปีแล้ว อย่างไรก็ตามองค์ความรู้เกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบาถูกจำกัดไว้เป็นลิขสิทธิ์เฉพาะและไม่ได้ถูกนำออกมาเปิดเผยในเชิงวิชาการสู่สาธารณะชน

คอนกรีตมวลเบาปัจจุบันนิยมใช้ในงานก่อสร้างผนังอาคารและอิฐบล็อกปูพื้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีจึงสามารถการใช้พลังงานลงได้ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC) เป็นคอนกรีตที่ผลิตโดยวิธี Pre-formed foam คือการสร้างฟองโฟมหรือฟองอากาศปริมาณสูง การค่อยฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นกระบวนการเติมฟองอากาศเข้าสู่เนื้อคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่แทนที่มวลรวม เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนมากและมีน้ำหนักเบา การผลิตคอนกรีตโดยวิธีนี้สามารถควบคุมกระบวนการเกิดโพรงอากาศที่แทรกภายในคอนกรีตได้ดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Panesar, D.K., 2013)

2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 7 และ 28 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัด สำหรับการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบากศ์ขนาด 50 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) โดยก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบให้ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง(ชื้น) เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่งที่ติดผิวมอร์ต้าร์ออก เลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ ควบคุมเครื่องทดสอบให้มีน้ำหนักด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90 - 180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังรับแรงอัดเป็นค่าที่มีบทบาทอย่าง ซึ่งกำลังอัดของของมอร์ต้าร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังมอร์ต้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลัง ลักษณะ ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

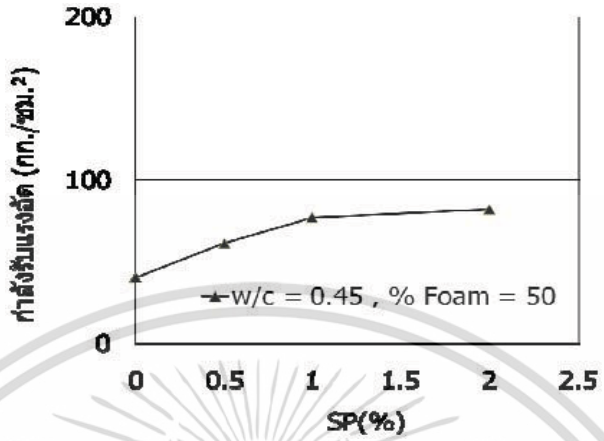
ธนภร ทวีวุฒิ และ นน แสงเทียน(2558) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800, 1000, 1200, 1400, 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแนวโน้มกำลังรับแรงอัดขอตัวอย่างทดสอบที่อายุครบ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.9 เท่า, ที่อายุ 14 วัน มีค่าประมาณ 0.8-0.99 เท่า และที่อายุ 56 วัน มีค่าประมาณ 1.03-1.25 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่อายุครบ 28 วัน โดยแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่เวลาและความหนาแน่นต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่เวลาและความหนาแน่นต่างกัน

กฤษณ์ กิ่งโก้(2553) ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ที่มีความหนาแน่นระหว่างความหนาแน่น 950 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุครบ 7 วัน กรณีที่ไม่ผสมสารซุปเปอร์ พลาสติไซเซอร์ จะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40, 70 และ 115 กก./ซม2 ที่น้ำหนัก 1,200, 1,400 และ 1,600 กก./ม3 ตามลำดับ และเมื่อผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ 1% ในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นป็น 77, 144 และ 185 กก./ซม2 โดยที่หน่วยน้ำหนัก 1,200 กก/ม3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 1.5 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 50%, หน่วยน้ำหนัก 1,400 กก/ม3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 2 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 40% และหน่วยน้ำหนัก 1,600 กก/ม3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 2.5 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 30% และผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาที่ทำการผสมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถทำงานได้ดีและส่งผลให้คุณสมบัติในการรับกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับปริมาณซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (%)

2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างรูปบริเคต อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C190 Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars โดยก่อนการทดสอบต้องเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้ผิวแห้งก่อนเข้าเครื่องทดสอบที่มีหัวจับ(Clip) จะต้องหมุนได้อิสระและได้ศูนย์กลาง เพื่อให้ได้การทดสอบแรงดึงที่แท้จริง โดยไม่มีแรงบิดหรือโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องในการทดสอบ ดึงตัวอย่างด้วยอัตรา 260 – 280 กิโลกรัมต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่าง บริเคตขาดออกจากกัน และบันทึกค่าน้ำหนักที่ทำให้ตัวอย่างขาดออกจากกัน

แก้วตา ดียิ่งและคณะ(2552) ทำการศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง (Direct Tensile Strength) กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength) และค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง กำลังรับแรงดึงผ่าซีก
และการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีความหนาแน่น 800 – 1,400 กก./ม3 มีค่า 1 – 10 กก/ซม2 ที่ความหนาแน่น 1,600 – 1,800 กก./ม3 มีค่า 14 – 21 กก/ซม2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่ความหนาแน่น 800 – 1,400 กก./ม3 มีค่า 3 – 9 กก/ซม2 ที่ความหนาแน่น 1,600 – 1,800 กก./ม3 มีค่า 11 – 19 กก/ซม2 และโมดูลัสการแตกร้าวที่ค่าความหนาแน่น 800 – 1,400 กก./ม3 มีค่า 1 – 11 กก/ซม2 ที่ความหนาแน่น 1,600 – 1,800 กก./ม3 มีค่า 12 – 16 กก/ซม2 สามารถสรุปได้ว่า กำลังรับแรงดึงโดยตรง ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.06 f'c – 0.20 f'c กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าระหว่าง 0.72√f'c – 1.55√f'c และโมดูลัสการแตกร้าวมีค่าระหว่าง 0.83√f'c – 1.55√f'c

2.4 การทดสอบการไหล

การทดสอบหาอัตราการไหลของคอนกรีตสด อ้างอิงตามมาตร ASTM C939 Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)[8] โดยการนำส่วนผสมที่ผสมแล้วเสร็จและมีสภาพข้นเหลว โดยก่อนการทดสอบให้เติมน้ำสะอาดลงในกรวยทดสอบก่อน 1 นาที จากนั้นระบายน้ำออกด้านล่างของกรวย ทำการอุดรูกรวยอีกครั้ง และนำมอร์ต้าร์ที่ผสมแล้วเสร็จใส่ลงในกรวย เปิดรูระบายด้านล่างของกรวยออกให้มอร์ต้าร์สามารถไหลอย่างอิสระ พร้อมจับเวลาที่มอร์ต้าร์ไหลจนหมด บันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลหน่วยเป็นวินาที

2.5 มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ของกรมทางหลวง

การอุดโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต หมายถึง การอุดซ่อมโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต โดยวิธีเจาะรูแผ่นพื้นถนนคอนกรีตบริเวณที่มีโพรงอยู่ข้างใต้จนทะลุแผ่นพื้น แล้วอัดฉีดด้วยวัสดุประเภท Slurry Cement Mortar หรือวัสดุอื่นใด ตามรูปแบบและข้อกำหนด โดยใช้แรงดันเพื่อเติมวัสดุดังกล่าวข้างต้นให้เต็มปริมาตรโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้น

2.5.1 การใช้งาน

ใช้ในงานซ่อมบำรุงถนนคอนกรีต ที่เกิดโพรงช่องว่างใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต ซึ่งเป็นความเสียหาย เนื่องจาก Pumping action ที่เกิดจากน้ำซึมผ่านตามแนวรอยต่อหรือรอยแตกเข้าไปสะสมในชั้นทางใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตหรือสาเหตุอื่น ถ้าหากละเลยไม่ดูแลรักษารอยต่อหรือรอยแตกและการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตแล้ว ความเสียหายอาจจะขยายตัวลุกลามจนทำให้เกิดรอยแตกโครงสร้าง (Structural Crack) กับแผ่นพื้นถนนคอนกรีตได้

2.5.2 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการอุดโพรงช่องว่างใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต จะต้องเป็นวัสดุผสม ที่ผสมเข้ากันได้ดี มีสภาพเหลว ลื่นไหล ง่ายต่อการอัดฉีดเข้าภายในช่องว่างได้อย่างทั่วถึง ภายหลังการอัดฉีด และเมื่อวัสดุผสมแข็งตัวแล้ว จะต้องไม่เกิดการละลายหายไป ไม่เกิดการหดตัว หรือยุบตัว ไม่ถูกกัดเซาะหรือพัดพาไปได้ง่าย อันจะเป็นเหตุให้ยังคงมีช่องว่างเป็นโพรงได้อีก

ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติวัสดุไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้งานควรเป็นประเภท Slurry Cement Mortar ซึ่งเป็นวัสดุผสมประกอบขึ้นด้วยวัสดุที่จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 วัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมต้องเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดได้แก่ ทรายละเอียดที่แข็ง คงทน สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรกหรือวัสดุอันไม่พึงประสงค์ใดๆ ปะปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้คุณภาพส่วนผสมด้อยลงไป

ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดไว้เป็นอย่างอื่น มวลรวมละเอียดต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) มีขนาดโตสุดไม่เกิน 2.00 มิลลิเมตร เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.205 “วิธีการทดลอง หาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ต้องผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ100 และมีส่วนผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 50

2) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.ท.203 “วิธีการทดลองหาค่า Sand Equivalent” ต้องมีค่า Sand Equivalent ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60

3) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.ท.201 “วิธีการทดลองหาค่า “Organic Impurities ในทรายสำหรับคอนกรีต” แล้วจะต้องมีสีไม่แก่กว่าสีมาตรฐาน

2.5.2.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หรือ ประเภท 3 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ มาตรฐานเลขที่ มอก.15 หรืออาจเป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษอื่นใดที่ได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อนนำมาใช้งาน

2.5.3.3 น้ำ

น้ำที่จะนำมาใช้ผสมจะต้องสะอาดปราศจากสารต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่างและอินทรีย์วัตถุ หรือสารอื่นใดในปริมาณที่ทำให้คุณภาพส่วนผสมด้อยลงไป

2.5.3 คุณสมบัติของส่วนผสม

หากไม่ได้ระบุส่วนผสมไว้เป็นอย่างอื่น ส่วนผสมจะต้งเป็นส่วนผสมประเภท Slurry Cement Mortar ที่มีปูนซีเมนต์และน้ำเป็นส่วนประกอบ สำหรับทราย สารปอซโซลานและสารผสมเพิ่ม นั้นให้เป็นไปตามวิศวกรผู้ออกแบบพิจารณาเลือกใช้ตามความเหมาะสม โดยกำหนดให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.5.3.1 ส่วนผสมเมื่ออยู่ในสภาพข้นเหลว ต้องไม่เกินการแยกตัวหรือตกตะกอน ไม่เกิดน้ำไหลเยิ้ม ต้องมีสภาพไหลลื่นได้ดี สามารถไหลเข้าอุดโพรงได้อย่างทั่วถึง เมื่อทดลองตามวิธีการทดลอง ASTM: C939 Flow of Grout for Preplaced – Aggregate Concrete (Flow Cone Method) มีค่าระหว่าง 8-16 วินาที

2.5.3.2 เมื่อแข็งตัว ต้องไม่เกิดการหดตัว และมีค่าความต้านทานแรงอัด เมื่อทดลองตามวิธีการทดลอง ASTM: C109 Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 in. or 50 mm. Cube Specimens) ไม่น้อยกว่า 5.19 เมกะพาสคัล (750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 52.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ที่อายุครบ 7 วัน หรือตามที่กำหนดไว้ในแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การทดลองแคลิฟอร์เนียแบริ่งเรโช (California Bearing Ratio)

CBR test เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือน (Shering resistance) ของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว (ส่วนมากจะทดสอบที่ Optimum moistute content) โดยการใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกด piston ขนาดเดียวกันนี้บนหินที่ compact แน่นที่ความลึกของ Penetration เท่ากัน ค่าที่นี้เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load เขียนเป็นสมการของอัตราส่วนได้ดังนี้

$$C.B.R = \frac{\text{หน่วยแรงต้านทานการกดจากการทดลอง}}{\text{หน่วยแรงต้านทานการกดมาตรฐาน}} x100 \qquad (2.1)$$

โดยค่า standard Unit load ซึ่งได้จากการทดลองกดท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมต่างๆ ด้วยท่อนเหล็กกดที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว

ระยะจม (Penetration)	น้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load)	หน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load)
0.1 นิ้ว	3,000 ปอนด์	1,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
0.2 นิ้ว	4,500 ปอนด์	1,500 ปอนด์/ตารางนิ้ว
0.3 นิ้ว	5,700 ปอนด์	1,900 ปอนด์/ตารางนิ้ว
0.4 นิ้ว	6,900 ปอนด์	2,300 ปอนด์/ตารางนิ้ว

2.7 การหาราคาต้นทุนคอนกรีตมวลเบา

ณัฐวุฒิ(2558) ได้ศึกษาการหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสม จำเป็นต้องทราบรูปแบบของสมการเป้าหมาย (Objective Function) ที่สอดคล้องกับรูปแบบของปัญหา หรืออสมการขอบเขต สำหรับงานวิจัยนี้ สมการเป้าหมายได้จากการกำหนดราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา ซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักส่วนผสมหรือปริมาตรสำหรับฟองโฟมคูณด้วยราคาต่อ 1 กิโลกรัมหรือต่อลิตรสำหรับฟองโฟม ซึ่งเป็นราคาตามท้องตลาดในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และราคารวมต่อส่วนผสม 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 ราคาต้นทุนส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา

Mix Proportion of Lightweight Concrete	Unit Cost (Bath)
Portland Cement (kg)	3.00
Water Content (kg)	0.01
Sand (kg)	0.16
Foam (liter)	0.30

หมายเหตุ : ราคานี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน Foam คือ โฟมละลายน้ำที่ผ่านกระบวนการอัดแรงดัน เกิดเป็นฟองโฟม ราคาขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยา อัตราส่วนผสมกับน้ำและเครื่องผลิตฟองโฟม

$$\text{Cost} = 3.00\ \text{Cement} + 0.01\ \text{Water} + 0.16\ \text{Sand} + 0.30\ \text{Foaming} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและวิธีดำเนินงานวิจัย เพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนการผสมอย่างละเอียด และขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ออกแบบการทดลองและคำนวณหาส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้จำนวนข้อมูล 144 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ข้อมูล
2) ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า ที่มีคุณสมบัติของส่วนผสมภายใต้เงื่อนไขตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง กำหนดสมการเป้าหมายโดยใช้ราคาส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา
3) เปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า ที่มีฟองโฟมและไม่มีฟองโฟมเป็นส่วนประกอบ
4) ทดสอบคุณสมบัติกำลังอัด กำลังแรงดึง และอัตราการไหล ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยใช้ 3 ปัจจัยหลัก อันได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2 ระดับ (0.4 และ 0.45) อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 2 ระดับ (1.0 และ 1.5) และปริมาณฟองโฟม 2 ระดับ (30 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการผสมจนครบทุกปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ 16 การทดลอง แต่ละการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ตัวอย่าง ทดสอบที่ตัวอย่างมีอายุ 7 และ 28 วัน ตัวอย่างลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5x15x15 เซนติเมตร มี 96 ตัวอย่างและตัวอย่างรูปบริเคตมี 48 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้นเท่ากับ 144 ตัวอย่าง จากนั้นจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป

ตาราง 3.1 ขอบเขตของข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่ควบคุม	1	2
น้ำต่อซีเมนต์(W/C)	0.40	0.45
ทรายต่อซีเมนต์(S/C)	1.50	1.75
ปริมาณโฟม (%)	30	35

3.2 การออกแบบส่วนผสม

ในการศึกษานี้ จะใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งจะกำหนดอัตราส่วนผสมก่อนแล้วจึงไปหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตหลังจากได้อายุตามที่ต้องการ ต่างจากการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกา (ACI) ที่เป็นการหาอัตราส่วนผสมจากค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตก่อน สำหรับสัดส่วนที่ใช้คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 และ 0.45 อัตราส่วนทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.5และ 1.75 ปริมาณฟองโฟมเท่ากับ 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การคำนวณส่วนผสมมีวิธีการดังนี้

ตัวอย่าง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.5 และปริมาณฟองโฟมเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์เท่ากับ 3.15 ความถ่วงจำเพาะของทรายเท่ากับ 2.60

1) หาปริมาตรของแต่ละส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

$$V_s + V_w + V_c + V_f = 1.00$$

โดย V_s คือปริมาตรของทราย

V_w คือปริมาตรของน้ำ

V_c คือปริมาตรของซีเมนต์

V_f คือปริมาตรของฟองโฟม

เมื่อ $V_f = 0.30$

$V_s = 3.15 \times 1.50\ V_c / 2.60 = 1.8173\ V_c$

$V_w = 3.15 \times 0.40\ V_c / 1.00 = 1.2600\ V_c$

แทนค่าต่างๆในสมการข้างต้นจะได้

$$1.82\ V_c + 1.26\ V_c + V_c + 0.3 = 1.00$$

แก้สมการจะได้ $V_c = 0.1717$, $V_s = 0.3120$, $V_w = 0.2163$

หรือสรุปได้ว่า

ปริมาตรของโฟม = 0.3000 ลูกบาศก์เมตร

ปริมาตรของซีเมนต์ = 0.1717 ลูกบาศก์เมตร

ปริมาตรของทราย = 0.3120 ลูกบาศก์เมตร

ปริมาตรของน้ำ = 0.2163 ลูกบาศก์เมตร

2) หาน้ำหนักของแต่ละส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักของซีเมนต์ = 0.1717 x 3,150 = 541 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักของทราย = 0.3120 x 2,600 = 811 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักของน้ำ = 0.2163 x 1,000 = 216 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อได้น้ำหนักส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรแล้ว ให้คำนวณหาปริมาตรของแบบหล่อที่ใช้แล้วจึงแปลงอัตราส่วนผสมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร เป็นปริมาตรตามที่ต้องการ คำนวณทุกตัวแปรจะได้อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

Mix	Mix Number	W/C ratio	S/C ratio	Foam (%)	Cement kg/m^3	Sand kg/m^3	Water kg/m^3	Foam $liter/m^3$
มอร์ต้าร์ผสมโฟม	1	0.40	1.50	30	541	811	216	300
	2	0.40	1.75	30	503	881	201	300
	3	0.45	1.50	30	521	781	234	300
	4	0.45	1.75	30	486	850	219	300
	5	0.40	1.50	35	502	753	201	350
	6	0.40	1.75	35	467	818	187	350
	7	0.45	1.50	35	483	725	218	350
	8	0.45	1.75	35	451	790	203	350
มอร์ต้าร์เปรียบเทียบ	9	0.40	1.50	/30	541	1591	216	-
	10	0.40	1.75	/30	503	1661	201	-
	11	0.45	1.50	/30	521	1561	234	-
	12	0.45	1.75	/30	486	1630	219	-
	13	0.40	1.50	/35	502	1663	201	-
	14	0.40	1.75	/35	467	1728	187	-
	15	0.45	1.50	/35	483	1635	218	-
	16	0.45	1.75	/35	451	1700	203	-

หมายเหตุ /30 และ /35 เพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ผสมโฟม

3.3 วิธีการผลิตและการทดสอบคอนกรีตมวลเบา

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1.1 วัสดุที่ใช้ มีดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในรูปที่ 3.1
2) น้ำสะอาด ปราศจากสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรีย์วัตถุ หรือสารอื่นใดในปริมาณที่ทำให้คุณภาพส่วนผสมด่อยลงไป สามารถใช้น้ำประปาทำการทดลองได้ แสดงในรูปที่ 3.2
3) วัสดุมวลรวม แสดงในรูปที่ 3.3 ต้องเป็นมวลรวมละเอียด ได้แก่ทรายละเอียดที่แข็งคงทน สะอาดปราศจากสิ่งสกปรกหรือวัสดุอันไม่พึงประสงค์ใดๆ ปะปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้คุณภาพส่วนผสมด้อยลงไป โดยจะต้องร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ 100 และมีส่วนผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 50 ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543 โดยนำทรายวางพักในร่มเพื่อสัมผัสความชื้นในอากาศเป็นระยะเวลา 1 วัน ให้มวลรวมละเอียดอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface-Dry, SSD)
4) น้ำยาผลิตฟองโฟมสำหรับผลิตอิฐมวลเบา, คอนกรีต CLC (foaming agent) แสดงในรูปที่ 3.4 เนื้อโฟมต้องมีความละเอียดความหนาแน่นสูง อัตราการขยายตัวสูง อัตราการยุบตัวต่ำ ลักษณะเนื้อโฟมที่ดีต้องไม่แยกชั้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ 15 นาที ในการทดลองควรพักโฟมไว้ให้น้อยที่สุดเพื่อคุณภาพของโฟมที่ใช้ผสมกับมอร์ต้าร์ และไม่ควรใช้เวลาในการผสมนานเพื่อป้องกันไม่ให้ฟองอากาศแตกตัวได้ ซึ่งจะทำให้ปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รูปที่ 3.2 น้ำสะอาด

รูปที่ 3.3 มวลรวมละเอียด

รูปที่ 3.4 น้ำยาผลิตฟองโฟม

3.3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

1) เครื่องผสมคอนกรีต (Mixer) ประกอบด้วยหม้อผสม และใบกวน แสดงในรูปที่ 3.5
2) ปั๊มลมสำหรับอัดอากาศเข้าไปยังตัวปืนฉีดโฟม แสดงในรูปที่ 3.6
3) ปั๊มน้ำสำหรับดูดน้ำยาผลิตฟองโฟม แสดงในรูปที่ 3.7
4) ปืนสำหรับฉีดฟองโฟม มีขนาดที่เหมาะสมในการใช้งาน ไม่มีการรั่วซึม สามารถเชื่อมต่อกับสายเครื่องปั๊มอัดอากาศและสายเครื่องปั๊มน้ำยาผลิตฟองโฟมได้ แสดงในรูปที่ 3.8
5) หลอดแก้วสำหรับตวงน้ำ สามารถวัดปริมาตรได้สูงสุด 500 มิลลิลิตร แสดงในรูปที่ 3.9
6) เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.001 กรัม แสดงในรูปที่ 3.10
7) ตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) และตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) แสดงในรูปที่ 3.11
8) แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานขนาด 5x5x5 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.12
9) แบบหล่อรูปทรงบริเคต(Briquet) ทำจากโลหะ แต่ละชุดสามารถหล่อมอร์ต้าร์ได้ 3 ตัวอย่าง ส่วนที่คอดซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดมีขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 เครื่องผสมคอนกรีต (Mixer)

รูปที่ 3.6 ปั๊มลม

รูปที่ 3.7 ปั๊มน้ำ

รูปที่ 3.8 ปืนฉีดฟองโฟ

รูปที่ 3.9 หลอดแก้วสำหรับตวงน้ำ

รูปที่ 3.10 เครื่องชั่ง

รูปที่ 3.11 ตะแกรงร่อนทราย

รูปที่ 3.12 แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 แบบหล่อรูปทรงบริเคต

3.3.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตมวลเบา

1) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้

2) ประกอบหม้อผสมและใบผสมที่แห้ง เข้ากับเครื่องผสม

3) เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลวเพื่อเป็นส่วนผสมกับมอร์ต้าร์ โดยมีเครื่องปั๊มลมและหัวฉีดโฟมเหลว โดยผสมน้ำยาโฟมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 ตามคำแนะนำของผู้ผลิต ดังแสดงในรูป 3.14

4) ใส่น้ำที่ผสมในหม้อผสมจนหมด

5) ใส่ปูนซีเมนต์ลงในหม้อผสมจนหมด จากนั้นเดินเครื่องผสมเพื่อกวนส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำให้เข้ากัน

6) เมื่อกวนปูนซีเมนต์และน้ำครบ 30 วินาที จึงใส่ทรายลงในหม้อผสมภายในเวลา 30 วินาที

7) ฉีดโฟมลงในหม้อผสม ในระหว่างการฉีดโฟมเครื่องผสมมอร์ต้าร์ต้องทำงานตลอดเวลา เพื่อให้แน่ใจว่ามอร์ต้าร์กับโฟมผสมเข้ากันได้ดีแล้วจึงหยุดเครื่องผสม ไม่ควรใช้เวลาในการผสมเกิน 5 นาที เพราะอาจจะทำให้ฟองโฟมแตกก่อนได้ ผสมจนกว่าจะเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงในรูปที่ 3.15

8) นำมอร์ต้าร์ที่ผสมเสร็จเทลงแบบหล่อโดยใช้เวลาทั้งหมดในการหล่อลงแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที ภายหลังจากการผสมมอร์ต้าร์เสร็จสิ้น เพื่อลดปัญหาการระเหยของน้ำออกจากส่วนสม ใช้เกรียงเหล็กตักมอร์ต้าร์ใส่แบบหล่อชิ้นแรกโดยมีความหนาประมาณ 25 มิลลิมตร ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่างมอร์ต้าร์

9) กระทุ้งมอร์ต้าร์ด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยแบ่งการกระทุ่งเป็น 4 รอบ ๆ ละ 8 ครั้ง แต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้ว จึงใส่มอร์ต้าร์ชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นกระทุ้งมอร์ต้าร์เช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้ว มอร์ต้าร์ควรมีความสูงกว่าขอบด้านบนของแบบเล็กน้อย ให้ใช้มือดันมอร์ต้าร์ที่ล้นแบบเข้าไอยู่ในแบบ ใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้ามอร์ต้าร์ให้เรียบ และเสมอกับขอบแบบหล่อ ซึ่งจะได้มอร์ต้าร์ที่ค่อนข้างเรียบและสูงเสมอกับแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) เมื่อมอร์ต้าร์มีอายุ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกเพื่อนำมอร์ต้าร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว ดังแสดงในรูป 3.16 เพื่อป้องกันไม่ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในมอร์ต้าร์ละลายออกมา ซึ่งจะทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลง

11) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดและทดสอบแรงดึง ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

12) นำส่วนผสมที่ผสมแล้วเสร็จ(ที่แบ่งเตรียมไว้) นำมาทดสอบหาอัตราการไหลต่อไป

รูปที่ 3.14 ฟองโฟมที่ใช้ในการผสม

รูปที่ 3.15 ส่วนผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 3.16 การบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

3.3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

การศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 7 และ 28 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัด สำหรับการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.3 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

อายุที่ทดสอบ	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้
24 ชั่วโมง	± 30 นาที
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ให้ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง(ชื้น) เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่งที่ติดผิวหน้ามอร์ต้าร์ออก ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของตัวอย่างทดสอบ เลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ หากด้านที่เลือกไม่เรียบพอ จะส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์อย่างมาก จากนั้นวางตัวอย่างทดสอบบนเครื่องทดสอบ นำแผ่นแบริ่งวางบนตัวอย่างมอร์ต้าร์ให้อยู่ตรงศูนย์กลางเครื่อง และให้แน่ใจว่าส่วนของแผ่นให้แรงที่ติดอยู่กับเครื่องทดสอบสามารถเคลื่อนไหวได้ เพื่อปรับระดับให้เป็นระนาบขณะทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.17 ตั้งค่าเครื่องให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง โดยลักษณะตัวอย่างการวิบัติของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบ

รูปที่ 3.18 ลักษณะตัวอย่างการวิบัติ

การคำนวณกำลังอัดของมอร์ต้าร์สามารถคำนวณดังสมการที่ (3.1)

$$S = P / A \qquad (3.1)$$

เมื่อ S คือกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ (กิโลกรัม/เซนติเมตร)
P คือแรงอัดประลัยที่ทำให้มอร์ต้าร์วิบัติ (กิโลกรัม)
A คือพื้นที่หน้าตัดของมอร์ต้าร์ที่รับแรง (เซนติเมตร)

รายงานผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุต่าง ๆ ว่ามีค่าเท่าใด หากมีผลการทดสอบตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งจาก 3 ตัวอย่าง มีค่าแตกต่างเกินกว่าร้อยละ 8.7 ให้ตัดผลการทดสอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างนั้นออก และใช้ 2 ตัวอย่างที่เหลือหาค่าเฉลี่ย หากผลการทดสอบจาก 2 ตัวอย่างยังเกินกว่าค่าที่ยอมให้ข้างต้น ให้ยกเลิกผลการทดสอบครั้งนี้ และทำการหล่อตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบใหม่

3.3.3.2 กำลังรับแรงดึง

การทดสอบกำลังรับแรงดึงในแต่ละอายุอย่างน้อยต้องมี 3 ตัวอย่างเพื่อหาเป็นค่าเฉลี่ย ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงใช้ 3 ตัวอย่างในการทดสอบแต่ละอายุเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทดสอบกำลังดึงของมอร์ต้าร์ที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ

ตาราง 3.4 อายุของมอร์ต้าร์และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

อายุที่ทดสอบ	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้
24 ชั่วโมง	+- 30 นาที
3 วัน	+- 1 ชั่วโมง
7 วัน	+- 3 ชั่วโมง
28 วัน	+- 12 ชั่วโมง

ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ ให้ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง(ผิวยังคงชื้น) เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่งที่ติดผิวหน้ามอร์ต้าร์ออก ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของตัวอย่างทดสอบ นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบโดยให้หัวจับ (Clip) ซึ่งหัวจับต้องสามารถหมุนได้อย่างอิสระและได้ศูนย์กลาง เพื่อให้การทดสอบการดึงเป็นการดึงอย่างแท้จริง โดยไม่มีแรงบิดหรือโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยในระหว่างการทดสอบ ตั้งค่าเครื่องทดสอบให้ดึงตัวอย่างบริเคตด้วยอัตรา 260-280 กิโลกรัมต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างบริเคตขาดออกจากกัน บันทึกค่าน้ำหนักแรงดึงที่ทำให้ตัวอย่างขาดออกจากกัน โดยลักษณะตัวอย่างขาดออกจากกันของมอร์ต้าร์ แสดงในรูปที่ 3.19

รูปที่ 3.19 ลักษณะตัวอย่างการวิบัติขาดออกจากกัน

การคำนวณกำลังดึงของมอร์ต้าร์รูปบริเคตสามารถคำนวณดังสมการที่ (3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = P / A$$

(3.2)

เมื่อ S คือกำลังดึงประลัยของมอร์ต้าร์ (กิโลกรัม/เซนติเมตร)
P คือแรงดึงประลัยที่ทำให้มอร์ต้าร์ขาดออกจากกัน (กิโลกรัม)
A คือพื้นที่หน้าตัดของมอร์ต้าร์ที่รับแรง (เซนติเมตร)

รายงานผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ต้าร์ที่อายุต่าง ๆ ว่ามีค่าเท่าใด โดยทั่วไปหากมอร์ต้าร์เป็นส่วนผสมเดียวกัน ผลการทดสอบกำลังดึงที่อายุมากกว่าจะมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่มีอายุน้อยกว่า ผลการทดสอบกำลังดึงที่มีส่วนผสมและอายุเท่ากันจำนวน 3 ตัวอย่าง กำลังดึงของแต่ละตัวอย่างต้องไม่เกินค่าเฉลี่ยของกำลังดึงทั้ง 3 ตัวอย่างมากกว่าร้อยละ 15 หากตัวอย่างใดเกินให้ตัดออก และหากตัวอย่างที่ตัดออกแล้วทำให้ค่าที่เหลืออยู่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง ให้ยกเลิกผลการทดสอบนั้น และทำการหล่อตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบใหม่

3.3.3.3 การทดสอบอัตราการไหล

การทดสอบหาอัตราการไหลของคอนกรีตสด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C939 Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method) โดยการนำส่วนผสมที่ผสมแล้วเสร็จและมีสภาพข้นเหลว โดยก่อนการทดสอบให้เติมน้ำสะอาดลงในกรวยทดสอบก่อน 1 นาที จากนั้นระบายน้ำออกด้านล่างของกรวย ทำการอุดรูกรวยอีกครั้ง และนำมอร์ต้าร์ที่ผสมแล้วเสร็จใส่ลงในกรวย เปิดรูระบายด้านล่างของกรวยออกให้มอร์ต้าร์สามารถไหลอย่างอิสระ พร้อมจับเวลาที่มอร์ต้าร์ไหลจนหมด บันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลหน่วยเป็นวินาที โดยกรวยที่ทดสอบลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.20

รูปที่ 3.20 กรวยทดสอบอัตราการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.4 การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio)

การทดสอบหาค่า C.B.R. เป็นวิธีการเปรียบเทียบกำลังต้านทานรับแรงเฉือน (Shearing Resistance) ของดินตัวอย่างบดอัดแน่น โดยใช้ค่าปริมาณน้ำที่ O.M.C. เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นสูงสุด แล้วนำค่าไปเปรียบเทียบวัสดุดินมาตรฐาน มาตรฐานที่ใช้ทดสอบคือ ASTM D 1883-99 Test Method For C.B.R. (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils โดยค่ามาตรฐานได้ถูกกำหนดโดย California Division of Highway แสดงตารางที่ 3.5

ตาราง 3.5 ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมต่างๆ ด้วยท่อนเหล็กกดที่มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว (19.35 ตารางเซนติเมตร)

ระยะจม (Penetration)	น้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load)	หน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load)
2.54 มม.(0.1 นิ้ว)	1,360.8 กก. (3,000 ปอนด์)	70.30 กก./ซม2 (1,000 ปอนด์/ นิ้ว2)
5.08 มม. (0.2 นิ้ว)	2,041.2 กก. (4,500 ปอนด์)	105.46 กก./ซม2 (1,500 ปอนด์/นิ้ว2)
7.62 มม. (0.3 นิ้ว)	2,852.5 กก. (5,700 ปอนด์)	133.59 กก./ซม2 (1,900 ปอนด์/นิ้ว2)
10.16 มม. (0.4 นิ้ว)	3,129.8 กก. (6,900 ปอนด์)	161.71 กก./ซม2 (2,300 ปอนด์/นิ้ว2)

การทดสอบหาค่า% C.B.R. มี 2 วิธีคือ

1) การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ(Unsoaked Simple) โดยชั่งน้ำหนักของโมลแล้วยึดโมลกับแผ่นฐานรองให้แน่นพอสมควรและนำ Spacer Disc มาใส่ลงในโมล หมุนเอาหูหิ้วออก นำเอากระดาษกรองมารองบน Spacer Disc พร้อมประกอบปลอกสวมให้เรียบร้อย ทำการบดอัดตามมาตรฐานโดยใช้ค้อนบดอัดขนาด 2.5 กิโลกรัม ระยะตก 12 นิ้ว ทำการบดอัดจำนวน 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง หรือใช้ค้อนบดอัดขนาด 4.54 กิโลกรัม ระยะตก 18 นิ้ว ทำการบดอัดจำนวน 3 ครั้ง ๆ ละ 56 ครั้ง หลังจากบดอัดจนตรบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้วถอดปลอกสวมออก ใช้มีดเหล็กสำหรับปาดดิน ปาดดินส่วนที่สูงเกินขอบโมลให้เรียบเสมอปากโมล ถอดแผ่นฐานรองและ Spacer Disc ออก นำโมลและดินไปชั่งหาน้ำหนักเพื่อจะนำไปหาความหนาแน่นดินเปียก จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาทดสอบโดยการวางแผ่นน้ำหนักที่มีน้ำหนักใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับน้ำหนักของวัสดุ ที่กดลงบนชั้นพื้นดินจริง แต่ต้องไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์(4.54 กิโลกรัม) ให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ แล้วให้นำไปวางบนเครื่องทดสอบแรงกด โดยการปรับแท่งกดให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนัก โดยค่อยๆปรับและสังเกตุเข็มมาตรวัด เริ่มจะหมุนเคลื่อนที่จึงหยุดปรับ จากนั้นทำการติดตั้งวงแหวนอัดแรงเพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกด แล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสอง ให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลข 0 ต่อไปให้เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ ให้อ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัดที่ระยะจมดังนี้ 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้วตามลำดับ เสร็จแล้วถอดโมลออกจากเครื่องทดลองและเก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัมหรือประมาณ 500 กรัม เพื่อจะนำไปหา % ปริมาณในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดสอบแบบแช่น้ำ(Soaked Simple) เตรียมตัวอย่างการทดสอบดังเช่นวิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้ว ให้วางกระดาษกรองลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบในโมล วางแผ่นวัดการบวมและวางแผ่นน้ำหนักลงตามลำดับ โดยแผ่นน้ำหนักต้องมีน้ำหนักใกล้เคียงหรือเท่ากับวัสดุ ที่กดลงบนชั้นพื้นดินจริง(โดยคิดน้ำหนักที่ลงบนพื้นดินจริง เท่ากับพื้นที่หน้าตัดของดินในโมล แต่ต้องไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์) นำเอาโมลทีเตรียมไว้นี้ไปแช่น้ำในภาชนะที่เตรียมไว้ให้น้ำท่วมแผ่นน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดที่อ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขาแล้ววางบนปากโมล จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านแนวัดการบวมตัว เพื่อหาค่าการบวมตัวของดิน อ่านค่าการบวมตัวของตัวอย่างทดสอบทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 96 ชั่วโมงหรือเมื่อตัวอย่างทดสอบหยุดการบวมตัว เสร็จแล้วนำขึ้นมาจากน้ำ และนำอุปกรณ์ที่ประกอบการหาค่าการบวมตัวออกให้หมด แล้วคว่ำโมล ปล่อยทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้น้ำระบายออกจากตัวอย่างทดสอบจนไม่มีน้ำขังบนผิวหน้า และระวังอย่าให้ผิวหน้าตัวอย่างทดสอบเสียหาย ถอดแบบเหล็กออกจากฐานให้หมด นำโมลพร้อมดินไปชั่ง เพื่อหาค่าน้ำหนักของตัวอย่างดินทดสอบในโมล นำน้ำหนักกดทับเดิมหรือน้ำหนักเท่ากับ 10 ปอนด์ วางลงบนตัวอย่างให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ แล้วให้นำไปวางในเครื่องทดสอบแรงกด โดยการปรับแท่งกดให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนัก โดยค่อยๆปรับและสังเกตุเข็มมาตรวัด เริ่มจะหมุนเคลื่อนที่จึงหยุดปรับ จากนั้นทำการติดตั้งวงแหวนอัดแรงเพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกด แล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสอง ให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลข 0 ต่อไปให้เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ ให้อ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัดที่ระยะจมดังนี้ 0.025, 0.05, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้วตามลำดับ เสร็จแล้วถอดโมลออกจากเครื่องทดลอง และเก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัมหรือประมาณ 500 กรัม เพื่อจะนำไปหา % ปริมาณในดิน

การคำนวณที่ได้จากผลการทดลอง C.B.R.

1) คำนวณหาค่าปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (3.3)

$$\omega = \frac{W_{wet} - W_s}{W_s} \quad (3.2)$$

เมื่อ ω คือ ปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละคิดเทียบกับมวลของดินอบแห้ง

Wwet คือ มวลของดินเปียก (กิโลกรัม)

Ws คือ มวลดินอบแห้ง (กรัม)

2) คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density) ดังสมการที่ (3.4)

$$\gamma_{wet} = \frac{W_{wet}}{V} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ γ คือ ความหนาแน่นเปียก (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
Wwet คือ มวลของดินเปียกที่บดอัดในแบบ (กิโลกรัม)
V คือ ปริมาตรของแบบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3) คำนวณหาค่าความแน่นแห้ง (Dry Density) ดังสมการที่ (3.5)

$$\gamma_d = \frac{W_{wet}}{1+\frac{w}{100}} \quad (3.5)$$

เมื่อ γ_d คือ ความหนาแน่นแห้ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
Wwet คือ มวลของดินเปียกที่บดอัดในแบบ (กิโลกรัม)
ω คือ ปริมาตรน้ำในดินเป็นร้อยละ

4) หน่วยแรงต้านการกดจากการทดลอง ดังสมการที่ (3.6)

$$\text{หน่วยแรงต้านการกดจากการทดลอง} = \frac{\text{แรงต้านทานการกด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของแท่งกด } 3 \text{ ตารางนิ้ว}} \quad (3.6)$$

5) อ่านค่าหน่วยแรงต้านทานการกดที่ค่า 0.10 นิ้ว, 0.20 นิ้ว ดังสมการที่ (3.7)

$$C.B.R = \frac{\text{หน่วยแรงต้านทานการกดจากการทดลอง}}{\text{หน่วยแรงต้านทานการกดมาตรฐาน}} x100 \quad (3.7)$$

เมื่อ หน่วยแรงต้านทานการกดมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3.5

3.3.3.5 การทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมวลเบา

การศึกษานี้ทำการทดสอบการหด/ขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เมื่อทำการผสมตัวอย่างคอนกรีตและเทลงในแบบหล่อแล้ว จากนั้นถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง และวัดการหดตัวโดยรวมของตัวอย่าง ที่เกิดขึ้นของคอนกรีตใช้ตัวอย่างทรงปริซึมเริ่มต้น จากนั้นบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำสะอาดเปรียบเทียบที่อายุ 1, 3, 5 และ 7 วัน ตามลำดับเพื่อให้ทราบแนวโน้มการหด/ขยายตัว ตามมาตรฐาน ASTM C157 (Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete) โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบ

1) แบบหล่อมาตรฐานทรงปริซึม แสดงในรูปที่ 3.21
2) เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลง แสดงในรูปที่ 3.22
3) Digital Dial Gauge แสดงในรูปที่ 3.23
4) ตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเสร็จ แสดงในรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

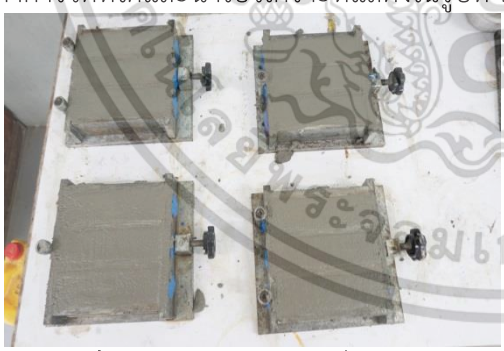
รูปที่ 3.21 แบบหล่อรูปทรงปริซึม

รูปที่ 3.22 เครื่องวัด Total Shrinkage

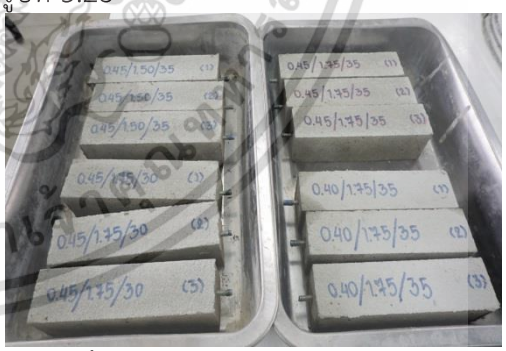
รูปที่ 3.23 Digital Dial Gauge

รูปที่ 3.24 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเสร็จ

ขั้นตอนการผสมตัวอย่างดังเช่นเดียวกับการผสมตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดและการทดสอบกำลังรับแรงดึง เมื่อใส่แบบหล่อและถอดแบบเมื่อมอร์ต้าร์มีอายุ 24 ชั่วโมง วัดค่าขนาดเริ่มต้นและนำไปบ่มในน้ำสะอาดที่อายุ 1 วัน นำออกมาพักไว้แห้งประมาณ 5 นาที จากนั้นวัดค่าการหดตัวอีกครั้ง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำต่ออีก 3, 5, และ 7 วัน ตามลำดับ และทำการวัดค่าที่อายุต่างๆ บันทึกค่าการวัดที่ได้และนำไปวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 3.25 – รูปที่ 3.28



รูปที่ 3.25 การถอดแบบเมื่ออายุ 24 ชม.



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างทดสอบทรงปริซึม

รูปที่ 3.27 การบ่มในน้ำสะอาด

รูปที่ 3.28 การวัดค่าการหดตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทที่ 3 ได้เสนอขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนวิธีการวิจัยสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ เพื่อการหาคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนมอร์ต้าร์อุดซ่อมโพรงใต้พื้นถนนคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543 ซึ่งในบทนี้จึงขอเสนอผลจากการทดลองและการวิเคราะห์ผล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน
2) ผลการทดสอบอัตราการไหล
3) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน
4) ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio)

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน

4.1.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (Compressive Strength)

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุ 7 วัน นำมาเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ และเปอร์เซ็นต์โฟม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 7 วัน

Mix No.	Mix Name	คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า (kg/cm^2)	มอร์ต้าร์ (kg/cm^2)
1	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form35%	48.05	163.10
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	26.62	151.08
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	21.97	148.12
4	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	17.68	134.41
5	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form30%	123.49	268.28
6	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form30%	77.88	211.19
7	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form30%	69.30	200.16
8	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form30%	48.91	162.73

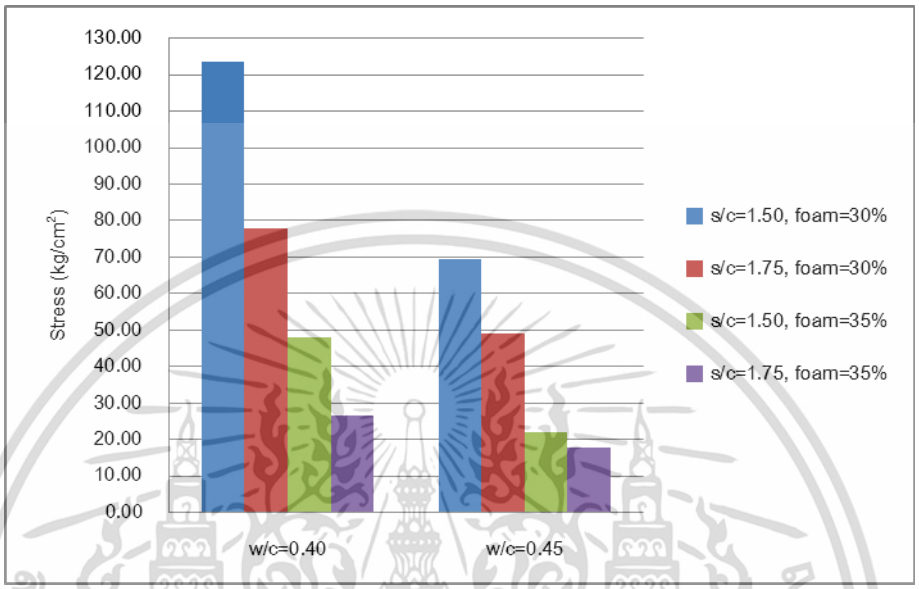
เมื่อ W/C คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

S/C คือ อัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

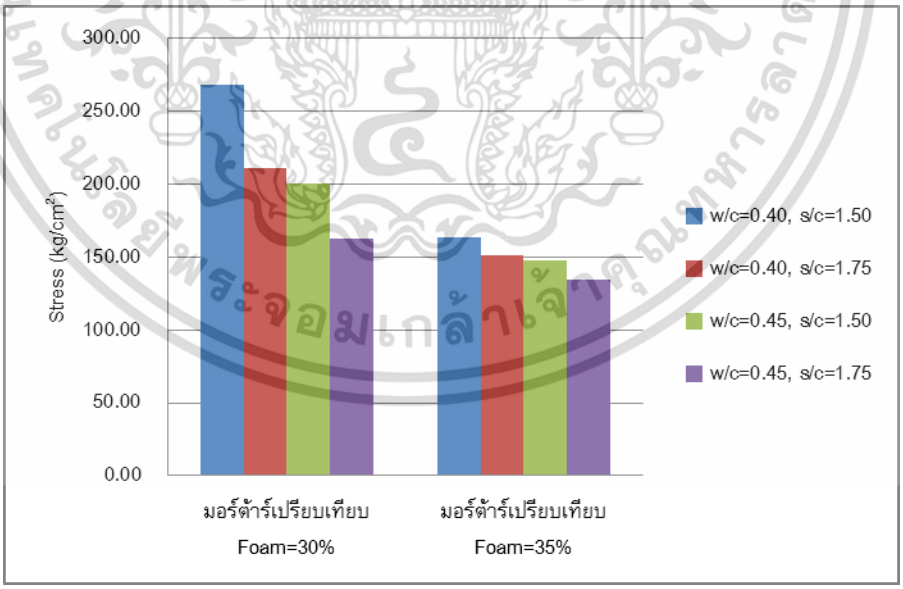
Form คือ เปอร์เซ็นต์โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุ 7 วัน มาพล็อตกราฟแท่งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 7 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 7 วัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุครบ 7 วัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุครบ 7 วัน มอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคอนกรีตมวลเบาที่เปอร์เซ็นต์โฟม 30% จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเปอร์เซ็นต์โฟม 35% และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.40 จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.45 อีกทั้งแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ลดลง ทั้งคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์ โดยเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบาเมื่อวิบัติจะเผยให้เห็นจะมีฟองอากาศแทรกอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 เนื้อภายในคอนกรีตมวลเบาจะมีฟองอากาศแทรกอยู่

4.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (Compressive Strength)

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุ 28 วัน นำมาเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ และเปอร์เซ็นต์โฟม ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Mix Name	คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า (kg/cm^2)	มอร์ต้าร์ (kg/cm^2)
1	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form35%	61.26	254.21
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	38.08	227.70
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	31.58	198.44
4	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	21.89	181.86
5	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form30%	160.20	275.47
6	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form30%	107.60	239.33
7	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form30%	76.06	220.20
8	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form30%	61.55	188.89

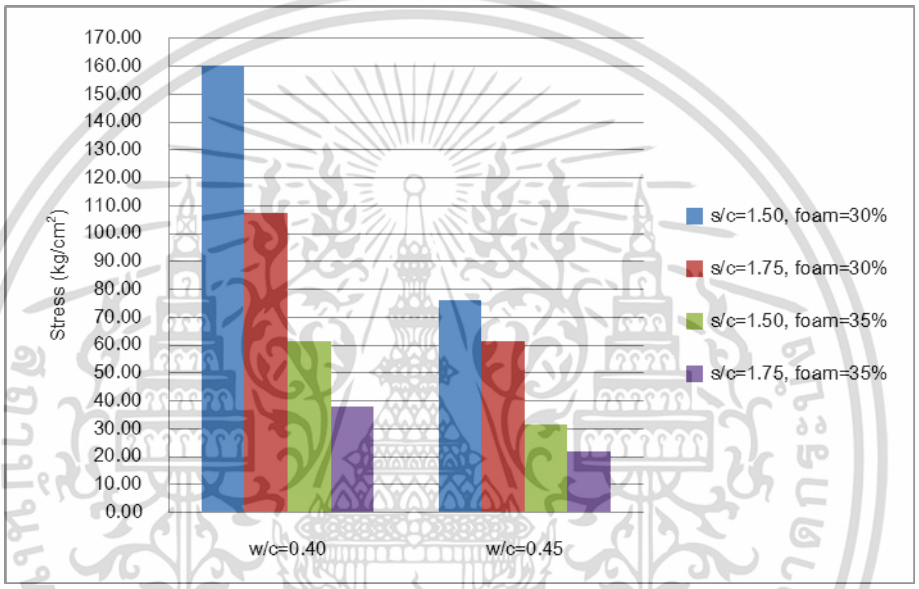
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W/C คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

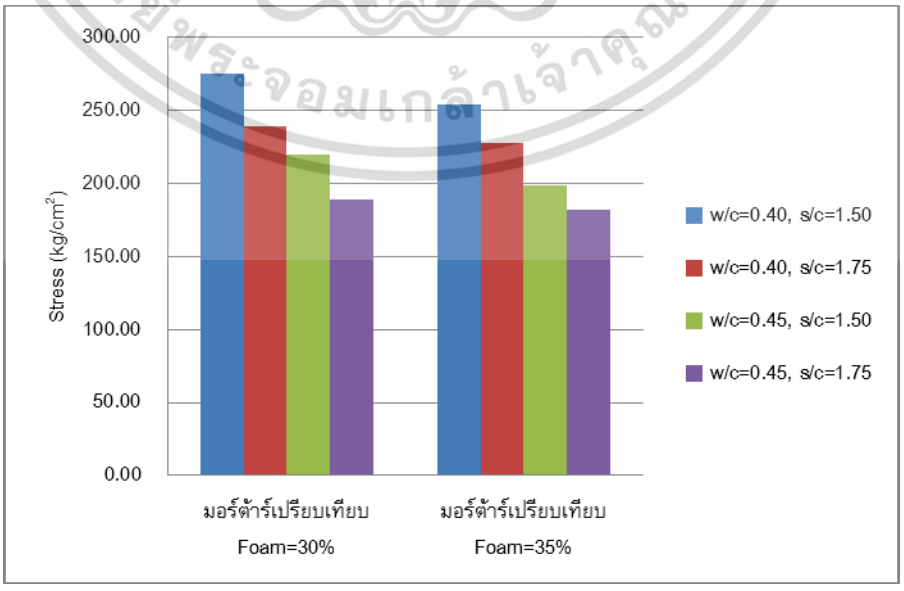
S/C คือ อัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

Form คือ เปอร์เซ็นต์โฟม

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุ 28 วัน มาพล็อตกราฟแท่งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 28 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 – 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงของอัดมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ ที่อายุครบ 28 วัน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดทรงลูกบากศ์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุครบ 28 วัน มอร์ต้าร์มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เปอร์เซ็นต์โฟม 30% จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเปอร์เซ็นต์โฟม 35% และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.40 จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.45 อีกทั้งแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ลดลง ทั้งคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์

4.2 ผลการทดสอบอัตราการไหล

เมื่อผลการทดสอบอัตราการไหลในสถานะที่ยังเป็นคอนกรีตสดอยู่ นำเอามาเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการไหล ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์โฟม ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 อัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ

Mix No.	Mix Name	คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า (วินาที)	มอร์ต้าร์ (วินาที)
1	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form35%	13	21
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	14	27
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	10	17
4	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	11	18
5	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form30%	15	19
6	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form30%	18	24
7	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form30%	12	14
8	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form30%	14	16

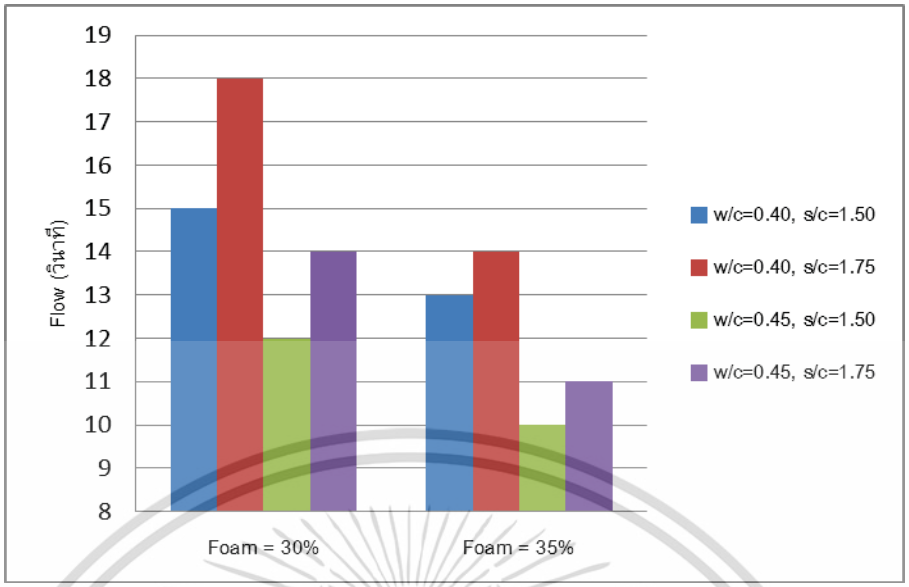
เมื่อ W/C คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

S/C คือ อัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

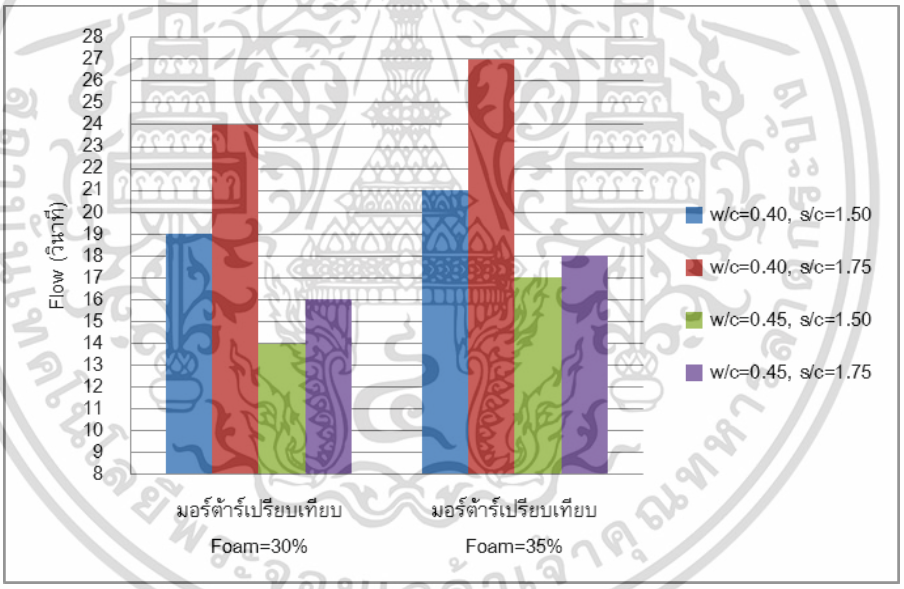
Form คือ เปอร์เซ็นต์โฟม

เมื่อนำผลการทดสอบอัตราการไหล มาพล็อตกราฟแท่งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ เพื่อให้ทราบแนวโน้มอัตราการไหล เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 – 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่ออัตราการไหลของโฟมคอนกรีต



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอัตราการไหลของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ

ผลการทดสอบสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939 (Flow Cone Method) แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีอัตราการไหลที่ดีกว่ามอร์ต้าร์ และเมื่ออัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โฟมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) มากขึ้น แนวโน้มอัตราการไหลจะแปรผันตรง ส่วนอัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) จะแปรผกผันกับอัตราการไหล โดยเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบาจะมีฟองอากาศแทรกอยู่ทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างเนื้อคอนกรีตาดและช่วยให้อัตราการไหลดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ฟองอากาศขนาดเล็กแทรกภายในเนื้อคอนกรีตสด

4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างรูปบริเคต ที่อายุ 28 วัน นำมาเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึง ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์และเปอร์เซ็นต์โฟม ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างรูปบริเคต ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Mix Name	คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า (kg/cm^2)	มอร์ต้าร์ (kg/cm^2)
1	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form35%	13.62	19.37
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	9.70	15.31
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	10.94	17.47
4	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	9.05	14.80
5	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form30%	16.28	21.12
6	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form30%	11.48	18.81
7	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form30%	14.51	19.89
8	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form30%	12.54	15.52

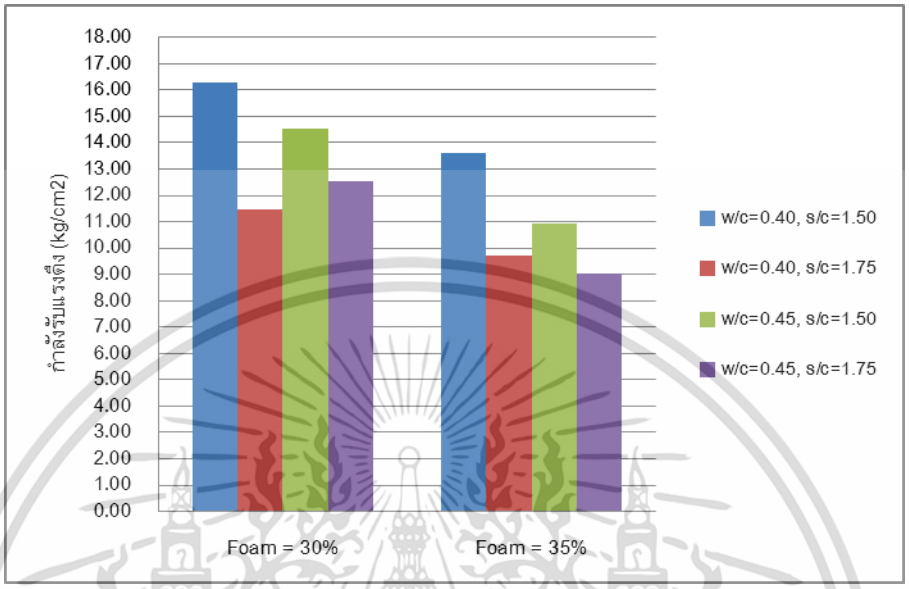
เมื่อ W/C คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

S/C คือ อัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

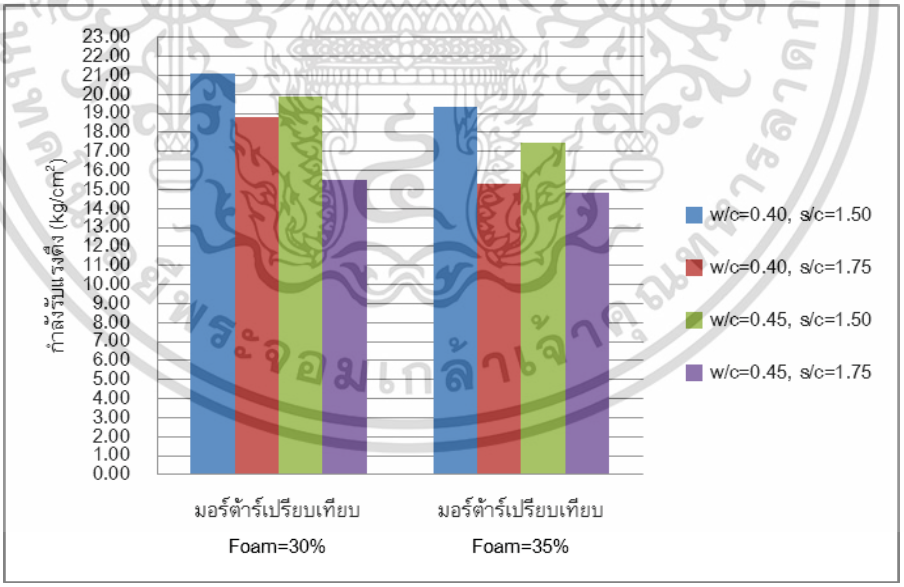
Form คือ เปอร์เซ็นต์โฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างรูปบริเคต ที่อายุ 28 วัน มาพล็อตกราฟแท่งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 28 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงดึง เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 – 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงของโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุครบ 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบอายุครบ 28 วันพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะรับแรงดึงได้น้อยกว่ามอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน และคอนกรีตมวลเบาที่เปอร์เซ็นต์โฟมที่ 30% จะมีกำลังรับแรงดึงที่สูงว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเปอร์เซ็นต์โฟม 40% และอัตราส่วนน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อปูนซีเมนต์(W/C) กับอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์(S/C)ที่ลดลง แนวโน้มกำลังรับแรงดึงก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยลักษณะการวิบัติจะเผยภายเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบารูปบริเคตจะมีฟองอากาศแทรกอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.11 ลักษณะวิบัติแสดงให้เห็นถึงเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบารูปบริเคตที่มีฟองอากาศแทรกอยู่

4.4 ผลการหาราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบา

สำหรับสมการเป้าหมายได้จากการกำหนดราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1) และผลของราคาแต่ละส่วนผสมได้จากการแทนค่าน้ำหนักของซีเมนต์ น้ำ ทรายและเปอร์เซ็นต์โฟมลงในสมการที่ (4.1) จะได้ราคาต้นทุนการผลิตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

Cost = 3.00 Cement + 0.01 Water + 0.16 Sand + 0.30 Foaming (4.1)

ตาราง 4.5 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ส่วนผสมต่างๆ

Mix No.	Mix Name	ราคาต้นทุนคอนกรีตมวลเบา (baht/m^3)	ราคาต้นทุนมอร์ต้าร์ (baht/m^3)	เปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง
1	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form35%	1734.04	1774.64	2.34 %
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	1640.09	1680.69	2.48 %
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	1673.69	1714.29	2.43 %
4	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	1587.03	1627.63	2.56 %
5	W/C 0.40/(S/C)1.50/Form30%	1844.35	1879.15	1.89 %
6	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form30%	1743.17	1777.97	2.00 %
7	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form30%	1779.36	1814.16	1.96 %
8	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form30%	1686.04	1720.84	2.06 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์นั้น แสดงให้เห็นว่า ราคาของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าจะมีราคาต้นทุนถูกกว่ามอร์ต้าร์อยู่ที่ 1.89 – 2.56 เปอร์เซ็นต์

4.5 ผลทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio)

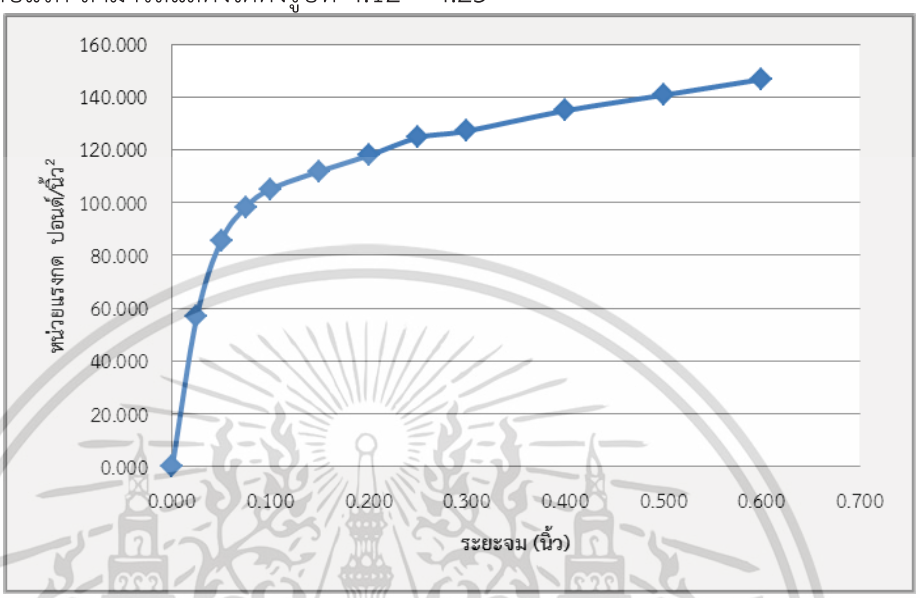
ผลการทดสอบ C.B.R. หากำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์ด้วยการใช้แท่งกด (Penetration Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดินด้วยความเร็ว 0.05 นิ้วต่อนาที (1.25 มิลลิเมตรต่อนาที) แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดสอบกับวัสดุหินคลุกบดอัดแน่นบนพื้นฐานการทดสอบที่เหมือนกัน โดยผลการทดสอบ C.B.R. ที่อายุคอนกรีตมวลเบาที่ราคาต้นทุนการผลิตน้อยสุด 3 อันดับแรก ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตาราง 4.6 ผลการทดสอบ C.B.R. ของคอนกรีตมวลเบา

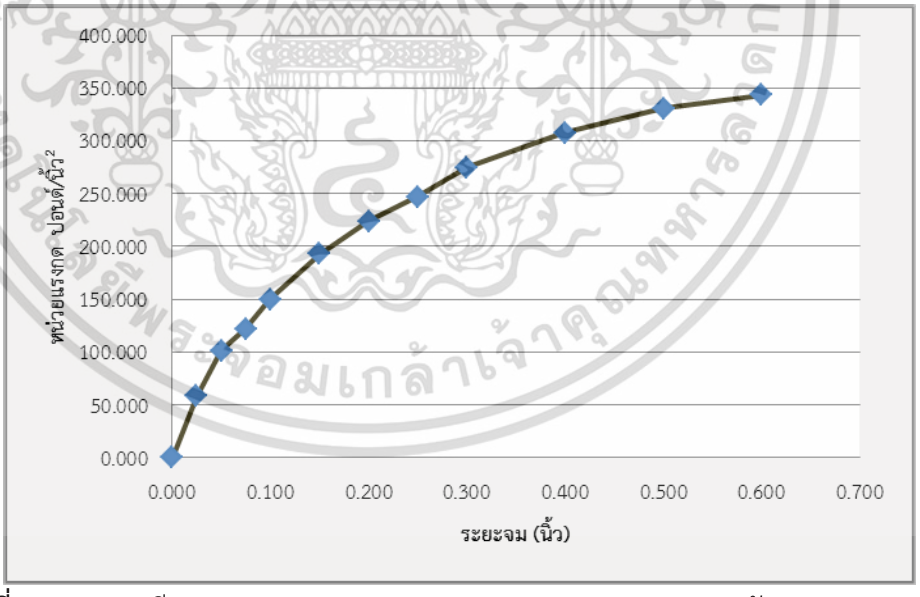
ราคาต้นทุนต่ำอันดับที่	Mix Name	ราคาต้นทุนคอนกรีตมวลเบา (baht/m^3)	อายุ CLC	C.B.R ที่ 0.1 นิ้ว
1	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	1587.03	1 วัน (Unsoak)	10.51 %
1	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	1587.03	1 วัน (Soak)	15.01 %
1	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	1587.03	7 วัน (Unsoak)	26.96 %
1	W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35%	1587.03	7 วัน (Soak)	32.55 %
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	1640.09	1 วัน (Unsoak)	19.58 %
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	1640.09	1 วัน (Soak)	34.34 %
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	1640.09	7 วัน (Unsoak)	39.68 %
2	W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35%	1640.09	7 วัน (Soak)	56.46 %
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	1673.69	1 วัน (Unsoak)	19.08 %
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	1673.69	1 วัน (Soak)	26.45 %
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	1673.69	7 วัน (Unsoak)	40.44 %
3	W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35%	1673.69	7 วัน (Soak)	54.94 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสดงกราฟระหว่าง Test unit load ในแกนตั้งกับ penetration ในแกนนอน จากค่าที่ได้ทั้ง Unsoaked และ Soaked sample ที่อายุ 1 และ 7 วัน ของคอนกรีตมวลเบาราคาต้นทุนต่ำสุด 3 อันดับแรก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 – 4.23

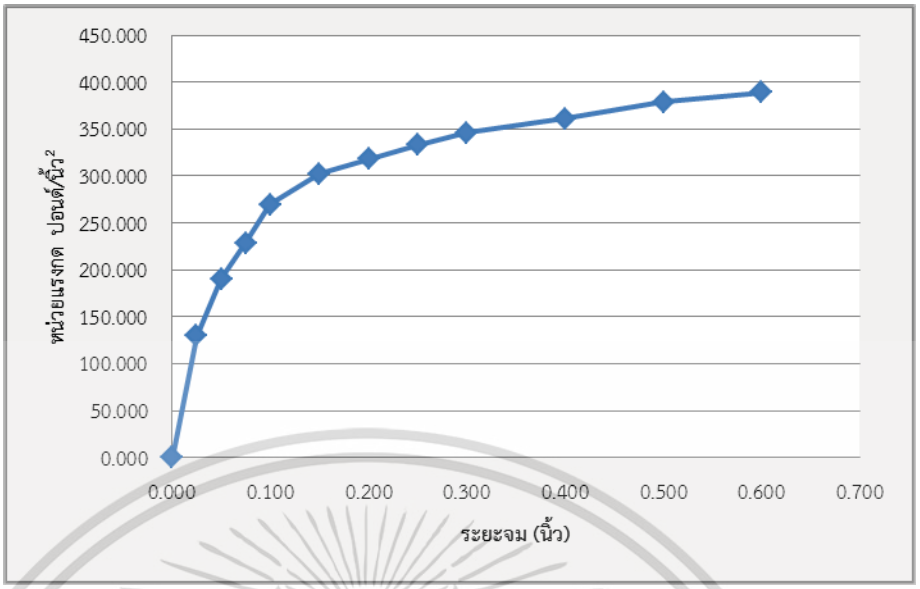


รูปที่ 4.12 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 10.51 เปอร์เซ็นต์

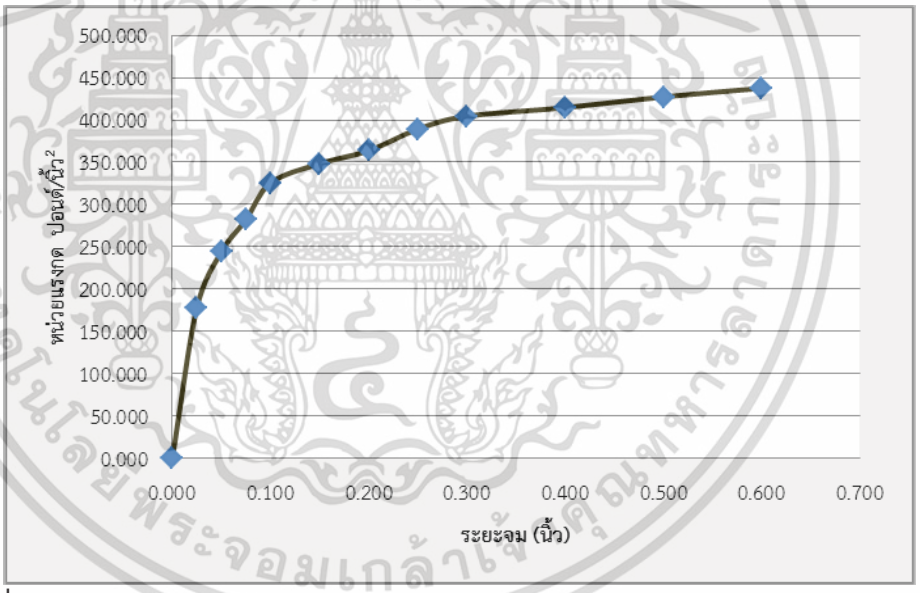


รูปที่ 4.13 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 15.01 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

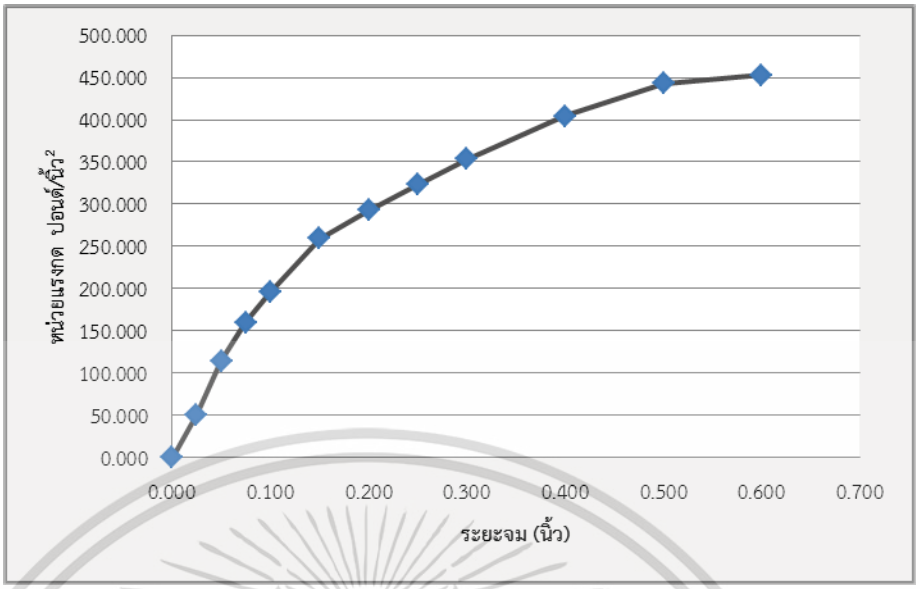


รูปที่ 4.14 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 26.96 เปอร์เซ็นต์

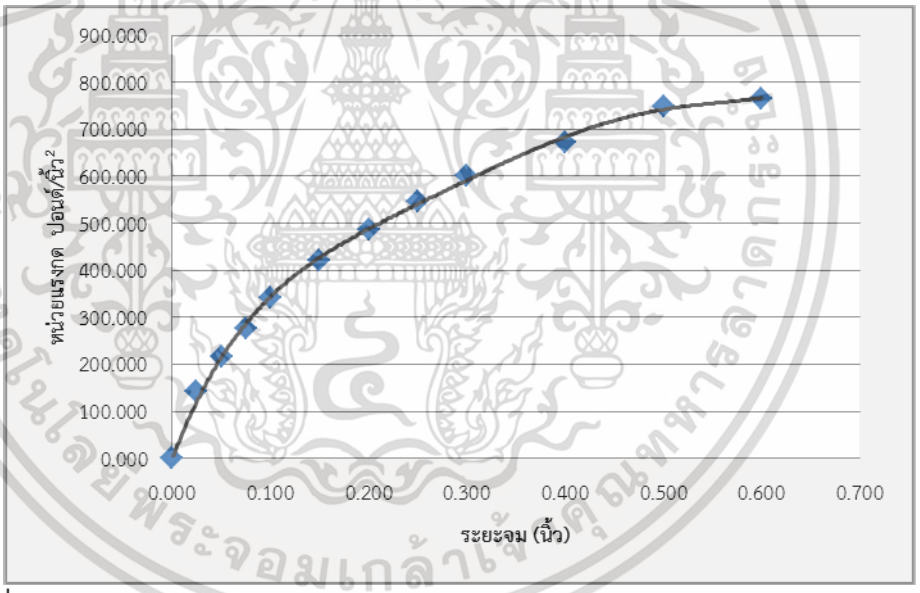


รูปที่ 4.15 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 32.55 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

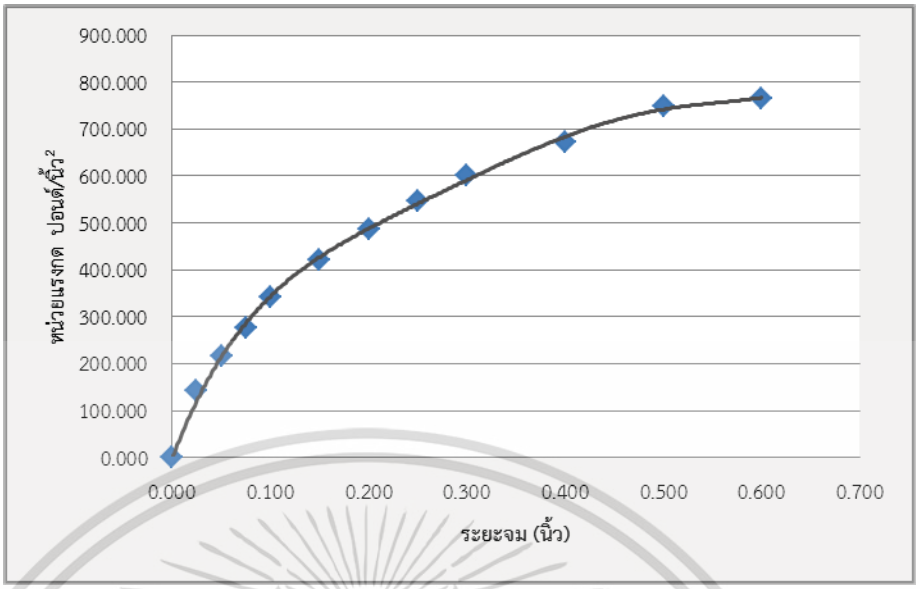


รูปที่ 4.16 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 19.58 เปอร์เซ็นต์

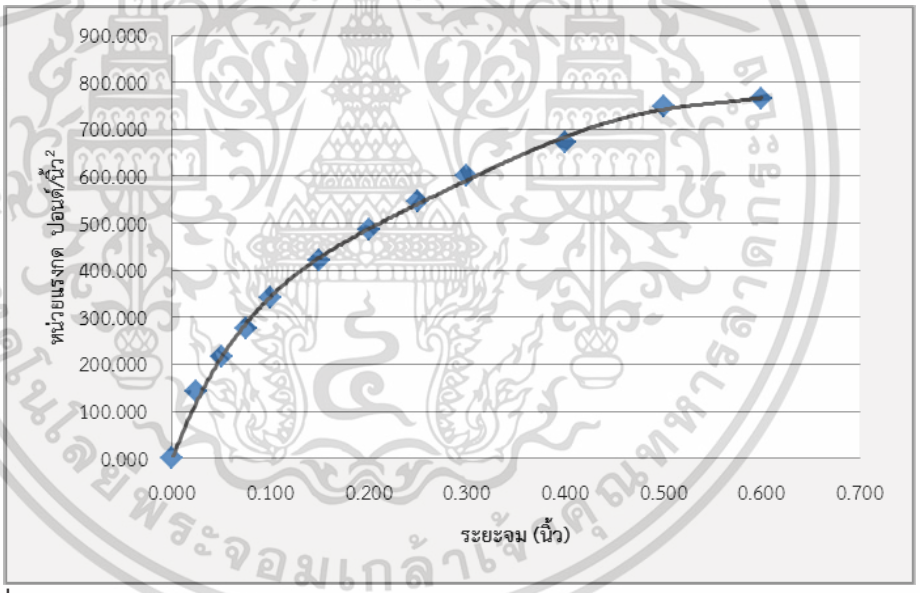


รูปที่ 4.17 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 34.34 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

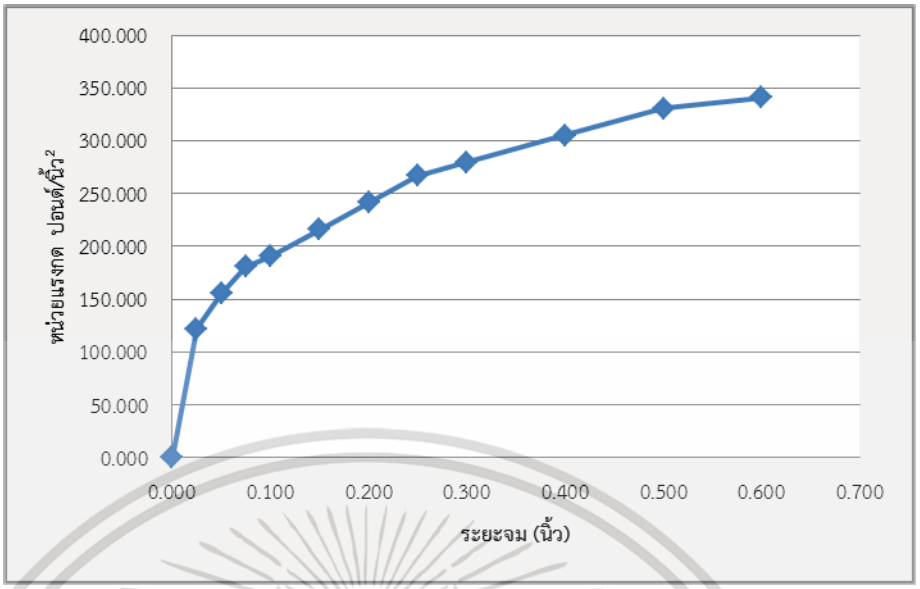


รูปที่ 4.18 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 39.68 เปอร์เซ็นต์

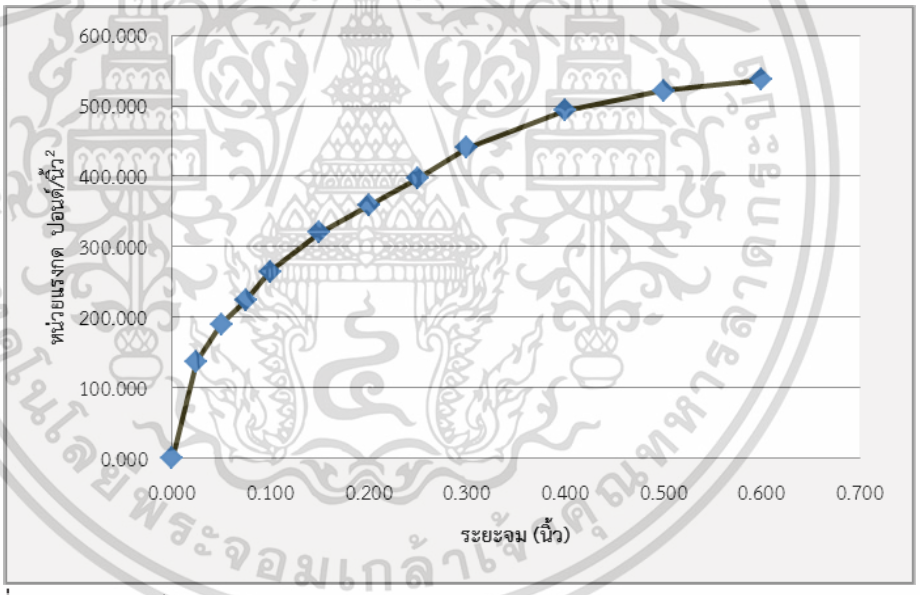


รูปที่ 4.19 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.40/(S/C)1.75/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 56.46 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

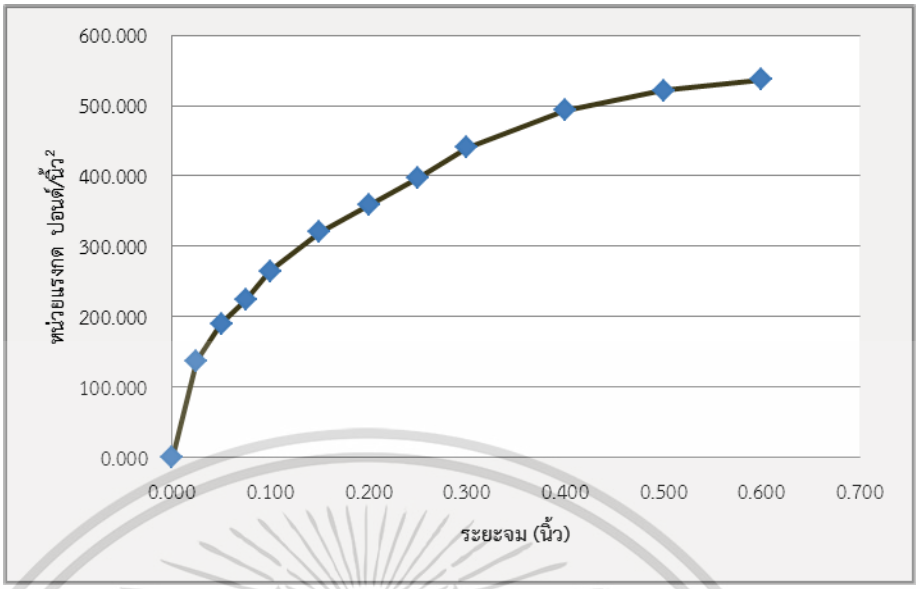


รูปที่ 4.20 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 1 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 19.08 เปอร์เซ็นต์

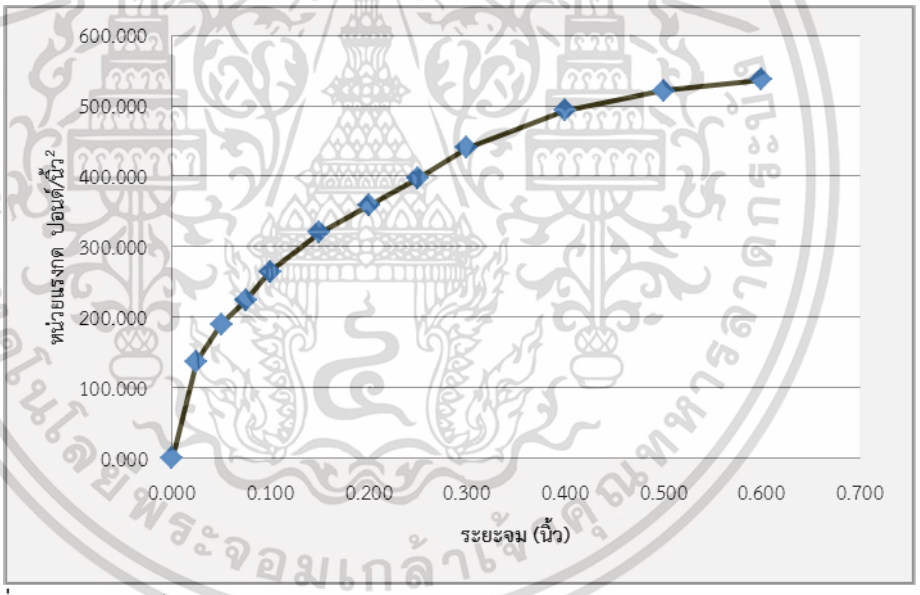


รูปที่ 4.21 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 1 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 26.45 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 7 วัน (Unsoak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 40.44 เปอร์เซ็นต์



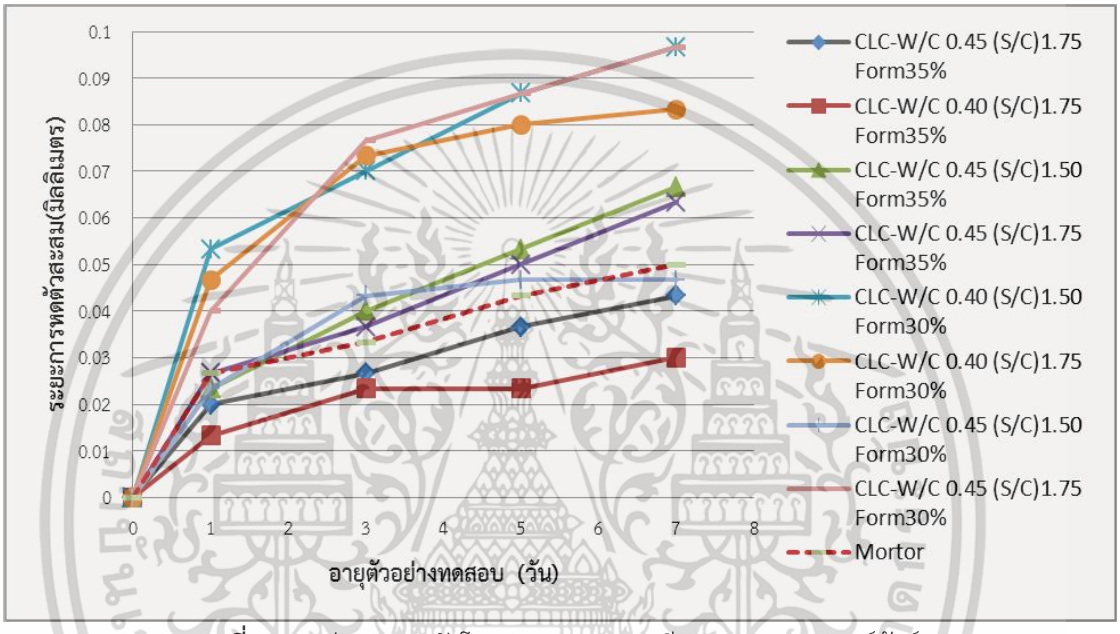
รูปที่ 4.23 คอนกรีตมวลเบา W/C 0.45/(S/C)1.50/Form35% อายุ 7 วัน (Soak) ผลการทดสอบค่า C.B.R. ที่ 0.1 นิ้วมีค่าเท่ากับ 54.94 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบการหาค่า C.B.R.ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแสดงให้เห็นว่าที่อายุตัวอย่าง 1 วัน(Unsoak) มีค่า C.B.R. อยู่ระหว่าง 10.51-19.58%, ที่อายุตัวอย่าง 1 วัน(Soak) มีค่า C.B.R. อยู่ระหว่าง 15.01 - 34.34%, ที่อายุตัวอย่าง 7 วัน(Unsoak) มีค่า C.B.R. อยู่ระหว่าง 26.96-40.44% และที่อายุตัวอย่าง 7 วัน(Soak) มีค่า C.B.R. อยู่ระหว่าง 32.55-56.46%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมของมอร์ต้าร์มีอัตราการหดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาปิลลารีได้ง่าย จนกระทั่งน้ำอิสระมีปริมาณลดลง ประกอบกับการที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นการทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ในมอร์ต้าร์มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องคาปิลลารีมีขนาดเล็กลง น้ำอิสระที่ยังคงหลงเหลือเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้น อัตราการหดตัวจึงลดลงอย่างช้าๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุป

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาประเภทเซลลูล่า โดยมีตัวแปร คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ (S/C) และปริมาณโฟม (F) ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 ซม. ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ทดสอบกำลังรับแรงดึงรูปทรงบริเคต และการทดสอบหาอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาโดยวิธีไหลผ่านกรวย (Flow Cone Method) จากนั้นนำข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับคุณสมบัติวัสดุมอร์ต้าร์ตามที่ได้ทดสอบไว้ข้างต้นว่าคอนกรีตมวลเบาประเภทเซลลูล่านั้นสามารถใช้แทนมอร์ต้าร์ในมาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตได้โดย สามารถกล่าวสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร การทดสอบอัตราการไหล และการทดสอบกำลังรับแรงดึงตัวอย่างรูปบริเคต ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 และ 0.45 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) เท่ากับ 1.5 และ 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ในช่วง 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งหมด 16 สูตร เพื่อหาแนวโน้มกำลังรับแรงอัดและอัตราการไหลให้ได้ตามคุณสมบัติที่สามารถใช้แทนมอร์ต้าร์อุดโพรงใต้ถนนคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตาราง 5.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง

ข้อกำหนดคุณสมบัติวัสดุมาตรฐานกรมทางหลวง	คอนกรีตมอร์ต้าร์	คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า
Compressive Strength 50 mm. Cube at 7 day (ksc.)	>52.75	69.30 – 123.49
Flow Cone Method (Second)	8 - 16	12 - 15

1) **<u>อัตราส่วนผสมสำหรับสามารถใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ในการอุดซ่อมโพรงใต้พื้นถนนคอนกรีต</u>**

ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543 ซึ่งได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ไม่น้อยว่า 5.19 เมกะพาสคัล หรือ 52.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุครบ 7 วัน และการทดสอบอัตราการไหลต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 8 – 16 วินาที ผลปรากฏว่าส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.50 และปริมาณโฟมอยู่ที่เหมาะสมที่ 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) **<u>การรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบา</u>**

เมื่อพิจารณาจากแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์นั้น พบว่ามอร์ต้าร์สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์และน้ำเท่ากัน เนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตทำให้ตัวคอนกรีตมวลเบาจะมีความเปราะกว่ามอร์ต้าร์ ซึ่งกำลังรับแรงดึงแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์โพมในคอนกรีตมวลเบา

3) **<u>การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio)</u>**

จากการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช (California Bearing Ratio) ของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าจำนวน 3 ส่วนผสม(ต้นทุนราคาน้อยสุด) สรุปได้ว่าหากจะใช้คอนกรีตมวลเบาทดแทนชั้นรองพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่มีค่า C.B.R. ไม่น้อยกว่า 25% สามารถใช้คอนกรีตมวลเบาที่มีอายุ 1 วัน (Soak) ซึ่งจะมีอายุบ่มคอนกรีตรวม 5 วันได้ โดยราคาต้นทุนต่ำสุด ส่วนผสมจะมีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.40 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ที่เหมาะสมที่ 35 เปอร์เซ็นต์

4) **<u>การทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต</u>**

การหดตัวโดยรวมของคนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์มีอัตราการหดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาปิลลารีได้ง่าย จนกระทั่งน้ำอิสระมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ในมอร์ต้าร์มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องคาปิลลารีมีขนาดเล็กลง น้ำอิสระที่ยังคงหลงเหลือเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้น อัตราการหดตัวจึงลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งแนวโน้มของการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา CLC จะมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์เล็กน้อย หากใช้ในงานซ่อมแซมถนนในความหนาที่มากอาจทำให้เกิดโพรงภายหลัง และทำให้เกิดโพรงใต้แผ่นพื้นคอนกรีตภายหลังได้อีกครั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) หากต้องการให้ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบามีอัตราการพัฒนากำลังเร็วขึ้นเห็นควรทดลองใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 แทนประเภทที่ 1

2) การใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำลงในตัวอย่างทดสอบ เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งซึ่งสามารถช่วยเรื่องเพิ่มอัตราการไหลที่ดีขึ้นโดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) เท่าเดิม

3) คอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ท่สามารถใช้แทนชั้นรองพื้นทางถนนคอนกรีต ที่มี C.B.R. > 25% ซึ่งเห็นควรต้องมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพเพิ่มเติม เช่น การขัดสี

4) น้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาน้ำหนักน้อยกว่า อาจทำให้อัตราการทรุดตัวน้อยกว่าชั้นพื้นทางเดิมที่เป็นหินคลุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กฤษณ์ กิ่งโก้. 2553. “คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ณัฐวุฒิ เต่งศิริธรรม. 2558. “การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดคะเนหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ธนภร ทวีวุฒิ และ นท แสงเทียน 2558. “กำลังรับแรงอัดและ การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า.” **วารสารวิชาการ ม.อบ.**, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 91-102.

นิตย์รดี ดอเล๊าะ. 2552. “วัสดุมวลเบาที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง.” **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์** ปีที่ 1 (ฉบับที่ 3): หน้า 48

มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing). มาตรฐานที่ ทล.-ม.327/2543 กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2556). **คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และคอนกรีต.** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ โรงพิมพ์ปห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

American Society for Testing and Materials, ASTM C109/C 109M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88.

American Society for Testing and Materials, ASTM C939-02 Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 90-94.

American Society for Testing and Materials, ASTM C190-77 Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 195-198.

American Society for Testing and Materials, ASTM C157/C 157M-08 Standard Test Method for Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, 2008, Vol. 04.02, Philadelphia, 202-207.

Panesar, D.K. (2013). **Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. Construction and Building Materials**, 44, pp.575-584

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S. Nandi, Arnab Chatterjee, Prantik Samanta and Tanushree Hansda 2016. **Cellular Concrete & its facets of application in Civil Engineer.** International Journal of Engineer Research(NCICE@2016), ISSN:2319-6890, Volume No.5, Issue Special 1, 8-9 Jan 2016, pp.37-43.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Compressive Str (kg/cm^2)	Compressive Str (kg/cm^2)	Flow (วินาที)
1	0.40	1.5	35	10.42	1062.544	42.50		
2				12.45	1269.547	50.78	48.05	13
3				12.47	1271.586	50.86		
1	0.40	1.75	35	6.42	654.658	26.19		
2				6.05	616.928	24.68	26.62	14
3				7.11	725.018	29.00		
1	0.45	1.5	35	5.58	569.002	22.76		
2				5.21	531.272	21.25	21.97	10
3				5.37	547.588	21.90		
1	0.45	1.75	35	4.37	445.616	17.82		
2				3.79	386.472	15.46	17.68	11
3				4.84	493.543	19.74		
1	0.40	1.5	30	32.75	3339.571	133.58		
2				29.93	3052.011	122.08	123.49	15
3				28.15	2870.501	114.82		
1	0.40	1.75	30	17.51	1785.523	71.42		
2				19.60	1998.644	79.95	77.80	18
3				20.11	2050.649	82.03		
1	0.45	1.5	30	16.85	1718.222	68.73		
2				18.00	1835.489	73.42	69.30	12
3				16.12	1643.783	65.75		
1	0.45	1.75	30	11.85	1208.364	48.33		
2				13.00	1325.631	53.03	48.91	14
3				11.12	1133.924	45.36		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน (มอร์ต้าร์)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Compressive Str (kg/cm^2)	Compressive Str (kg/cm^2)	Flow (วินาที)
1	0.40	1.5	35	41.94	4276.690	171.07		
2				39.25	4002.386	160.10	163.10	21
3				38.77	3953.440	158.14		
1	0.40	1.75	35	37.45	3818.837	152.75		
2				37.05	3778.049	151.12	151.08	27
3				36.62	3734.201	149.37		
1	0.45	1.5	35	35.05	3574.105	142.96		
2				37.53	3826.995	153.08	148.12	17
3				36.36	3707.688	148.31		
1	0.45	1.75	35	31.51	3213.126	128.53		
2				29.43	3001.025	120.04	134.41	18
3				37.92	3866.764	154.67		
1	0.40	1.5	30	67.48	6881.045	275.24		
2				65.41	6669.964	266.80	268.28	19
3				64.43	6570.032	262.80		
1	0.40	1.75	30	52.49	5352.490	214.10		
2				51.48	5249.499	209.98	211.19	24
3				51.36	5237.262	209.49		
1	0.45	1.5	30	49.28	5025.161	201.01		
2				48.26	4921.150	196.85	200.16	14
3				49.68	5065.950	202.64		
1	0.45	1.75	30	38.70	3946.302	157.85		
2				39.84	4062.549	162.50	162.73	16
3				41.15	4196.132	167.85		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Compressive Str (kg/cm^2)	Compressive Str (kg/cm^2)
1	0.40	1.5	35	15.42	1572.402	62.90	
2				14.66	1494.904	59.80	61.26
3				14.98	1527.535	61.10	
1	0.40	1.75	35	9.52	970.770	38.83	
2				9.05	922.843	36.91	38.08
3				9.44	962.612	38.50	
1	0.45	1.5	35	7.86	801.497	32.06	
2				7.56	770.905	30.84	31.58
3				7.81	796.398	31.86	
1	0.45	1.75	35	5.31	541.469	21.66	
2				5.29	539.430	21.58	21.89
3				5.50	560.844	22.43	
1	0.40	1.5	30	39.81	4059.490	162.38	
2				37.47	3820.877	152.84	160.20
3				40.55	4134.949	165.40	
1	0.40	1.75	30	24.35	2483.009	99.32	
2				26.46	2698.169	107.93	107.60
3				28.33	2888.856	115.55	
1	0.45	1.5	30	18.35	1871.179	74.85	
2				19.35	1973.151	78.93	76.06
3				18.24	1859.962	74.40	
1	0.45	1.75	30	15.39	1569.343	62.77	
2				14.89	1518.357	60.73	61.55
3				14.99	1528.555	61.14	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (มอร์ต้าร์)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Compressive Str (kg/cm^2)	Compressive Str (kg/cm^2)
1	0.40	1.5	35	62.54	6377.305	255.09	
2				61.32	6252.900	250.12	254.21
3				63.11	6435.429	257.42	
1	0.40	1.75	35	56.37	5748.140	229.93	
2				55.36	5645.149	225.81	227.70
3				55.74	5683.898	227.36	
1	0.45	1.5	35	48.08	4902.796	196.11	
2				49.99	5097.561	203.90	198.44
3				47.88	4882.401	195.30	
1	0.45	1.75	35	45.67	4657.044	186.28	
2				43.79	4465.337	178.61	181.86
3				44.30	4517.343	180.69	
1	0.40	1.5	30	68.61	6996.273	279.85	
2				65.78	6707.693	268.31	275.47
3				68.22	6956.504	278.26	
1	0.40	1.75	30	58.32	5946.985	237.88	
2				57.96	5910.275	236.41	239.33
3				59.75	6092.804	243.71	
1	0.45	1.5	30	55.34	5643.110	225.72	
2				51.83	5285.189	211.41	220.20
3				54.79	5587.025	223.48	
1	0.45	1.75	30	46.19	4710.069	188.40	
2				46.68	4760.035	190.40	188.89
3				46.06	4696.813	187.87	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลการทดสอบกำลังรับดึง
ของคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง (คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Tensile Str (kg/cm^2)	Tensile Str (kg/cm^2)
1	0.40	1.5	35		89.150	14.26	
2					80.590	12.89	13.62
3					85.560	13.69	
1	0.40	1.75	35		65.660	10.51	
2					55.660	8.91	9.70
3					60.580	9.69	
1	0.45	1.5	35		60.118	9.62	
2					65.000	10.40	10.94
3					80.000	12.80	
1	0.45	1.75	35		55.010	8.80	
2					56.390	9.02	9.05
3					58.360	9.34	
1	0.40	1.5	30		103.650	16.58	
2					101.550	16.25	16.28
3					100.000	16.00	
1	0.40	1.75	30		74.770	11.96	
2					71.200	11.39	11.48
3					69.190	11.07	
1	0.45	1.5	30		90.000	14.40	
2					91.330	14.61	14.51
3					90.690	14.51	
1	0.45	1.75	30		81.200	12.99	
2					73.260	11.72	12.54
3					80.690	12.91	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง (มอร์ต้าร์)

Sample	W/C ratio	S/C ratio	Form (%)	Force (KN)	Force (kg)	Tensile Str (kg/cm^2)	Tensile Str (kg/cm^2)
1	0.40	1.5	35		124.130	19.86	
2					120.660	19.31	19.37
3					118.350	18.94	
1	0.40	1.75	35		107.150	17.14	
2					89.630	14.34	15.31
3					90.330	14.45	
1	0.45	1.5	35		108.000	17.28	
2					109.366	17.50	17.47
3					110.250	17.64	
1	0.45	1.75	35		98.780	15.80	
2					88.360	14.14	14.80
3					90.350	14.46	
1	0.40	1.5	30		126.290	20.21	
2					138.140	22.10	21.12
3					131.550	21.05	
1	0.40	1.75	30		111.290	17.81	
2					128.140	20.50	18.81
3					113.290	18.13	
1	0.45	1.5	30		116.360	18.62	
2					128.490	20.56	19.89
3					128.060	20.49	
1	0.45	1.75	30		95.860	15.34	
2					98.300	15.73	15.52
3					96.830	15.49	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
ผลการทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริ่ง เรโช
(California Bearing Ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	22.3	170.15	56.72
0.050	33.67	256.90	85.63
0.075	38.66	294.98	98.33
0.100	41.33	315.35	105.12
0.150	44	335.72	111.91
0.200	46.33	353.50	117.83
0.250	49	373.87	124.62
0.300	50	381.50	127.17
0.400	53	404.39	134.80
0.500	55.33	422.17	140.72
0.600	57.67	440.02	146.67

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (Soke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	23	175.49	58.50
0.050	40	305.20	101.73
0.075	48	366.24	122.08
0.100	59	450.17	150.06
0.150	76	579.88	193.29
0.200	88	671.44	223.81
0.250	97	740.11	246.70
0.300	108	824.04	274.68
0.400	121	923.23	307.74
0.500	130	991.90	330.63
0.600	135	1030.05	343.35

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.75, Foam=35

อายุที่ 7 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	51	389.13	129.71
0.050	75	572.25	190.75
0.075	90	686.70	228.90
0.100	106	808.78	269.59
0.150	119	907.97	302.66
0.200	125	953.75	317.92
0.250	131	999.53	333.18
0.300	136	1037.68	345.89
0.400	142	1083.46	361.15
0.500	149	1136.87	378.96
0.600	153	1167.39	389.13

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 7 วัน (Soke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	70	534.10	178.03
0.050	96	732.48	244.16
0.075	111	846.93	282.31
0.100	128	976.64	325.55
0.150	137	1045.31	348.44
0.200	143	1091.09	363.70
0.250	153	1167.39	389.13
0.300	159	1213.17	404.39
0.400	163	1243.69	414.56
0.500	168	1281.84	427.28
0.600	172	1312.36	437.45

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.40, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (Unsoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	20	152.60	50.87
0.050	45	343.35	114.45
0.075	63	480.69	160.23
0.100	77	587.51	195.84
0.150	102	778.26	259.42
0.200	115	877.45	292.48
0.250	127	969.01	323.00
0.300	139	1060.57	353.52
0.400	159	1213.17	404.39
0.500	174	1327.62	442.54
0.600	178	1358.14	452.71

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.40, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (Soke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	56	427.28	142.43
0.050	85	648.55	216.18
0.075	109	831.67	277.22
0.100	135	1030.05	343.35
0.150	166	1266.58	422.19
0.200	191	1457.33	485.78
0.250	215	1640.45	546.82
0.300	236	1800.68	600.23
0.400	264	2014.32	671.44
0.500	294	2243.22	747.74
0.600	301	2296.63	765.54

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.40, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 7 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	60	457.80	152.60
0.050	99	755.37	251.79
0.075	132	1007.16	335.72
0.100	156	1190.28	396.76
0.150	189	1442.07	480.69
0.200	218	1663.34	554.45
0.250	248	1892.24	630.75
0.300	269	2052.47	684.16
0.400	297	2266.11	755.37
0.500	312	2380.56	793.52
0.600	322	2456.86	818.95

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.40, S/C=1.75, Foam=35%

อายุที่ 7 วัน (Soke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	90	686.70	228.90
0.050	160	1220.80	406.93
0.075	208	1587.04	529.01
0.100	222	1693.86	564.62
0.150	258	1968.54	656.18
0.200	278	2121.14	707.05
0.250	296	2258.48	752.83
0.300	318	2426.34	808.78
0.400	335	2556.05	852.02
0.500	355	2708.65	902.88
0.600	369	2815.47	938.49

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.50, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	48	366.24	122.08
0.050	61	465.43	155.14
0.075	71	541.73	180.58
0.100	75	572.25	190.75
0.150	85	648.55	216.18
0.200	95	724.85	241.62
0.250	105	801.15	267.05
0.300	110	839.30	279.77
0.400	120	915.60	305.20
0.500	130	991.90	330.63
0.600	134	1022.42	340.81

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.50, Foam=35%

อายุที่ 1 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	54	412.02	137.34
0.050	75	572.25	190.75
0.075	88	671.44	223.81
0.100	104	793.52	264.51
0.150	126	961.38	320.46
0.200	141	1075.83	358.61
0.250	156	1190.28	396.76
0.300	173	1319.99	440.00
0.400	194	1480.22	493.41
0.500	205	1564.15	521.38
0.600	211	1609.93	536.64

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.50, Foam=35%

อายุที่ 7 วัน (UnSoke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	62	473.06	157.69
0.050	102	778.26	259.42
0.075	136	1037.68	345.89
0.100	159	1213.17	404.39
0.150	213	1625.19	541.73
0.200	233	1777.79	592.60
0.250	250	1907.50	635.83
0.300	271	2067.73	689.24
0.400	298	2273.74	757.91
0.500	322	2456.86	818.95
0.600	339	2586.57	862.19

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W/C = 0.45, S/C=1.50, Foam=35

อายุที่ 7 วัน (Soke)

ระยะจม	ค่าจากมาตรวัด จำนวนช่อง	น้ำหนักกด ปอนด์	หน่วยแรงกด ปอนด์/นิ้ว^2
0.000	0	7.63	0.000
0.025	62	473.06	157.69
0.050	123	938.49	312.83
0.075	168	1281.84	427.28
0.100	216	1648.08	549.36
0.150	295	2250.85	750.28
0.200	320	2441.60	813.87
0.250	346	2639.98	879.99
0.300	373	2845.99	948.66
0.400	396	3021.48	1007.16
0.500	435	3319.05	1106.35
0.600	456	3479.28	1159.76

Proving Right Constant : 7.63 lb/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมเบาแบบเซลลูล่าเพื่อใช้อุดโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตของกรมทางหลวง

Properties of Cellular Lightweight Concrete (CLC) to replace the mortar used in standard subsoil under subsealing of Department of Highways

ฐาปกรณ์ ตันวานิช[1,*] และสุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: friendpop@hotmail.com*

บทคัดย่อ

การอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงเป็นวิธีซ่อมโพรงที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต โดยวิธีการเจาะรูแผ่นพื้นให้ทะลุบริเวณที่มีโพรงอยู่ข้างใต้แล้วฉีดด้วยมอร์ต้าร์ให้เต็มโพรงช่องว่างที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ที่มีคุณสมบัติของส่วนผสมภายใต้เงื่อนไขตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง โดยการหาสัดส่วนที่เหมาะสมจากปัจจัยหลัก 3 อย่างอันได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ในช่วง 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นทำการทดลองและทดสอบหากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการไหล และความสามารถรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ ซึ่งผลการการศึกษาพบว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.5 และปริมาณโฟมอยู่ที่เหมาะสมที่ 30 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า, กำลังรับแรงอัด, ความสามารถในการไหล, โฟมคอนกรีต

Abstract

Subsealing based on the standards of the Department of Highways is one of the ways to repair cavities under concrete slabs. It was done drilling into cavity under the floor then injecting with mortar to fill the cavity. This aim of this research is to present the properties of CLC concrete with qualities of mixtures under the Department of Highway, criteria by finding the right proportion of three factors: the ratio of water to cement at 0.40 to 0.45, the ratio of sand-to-cement at 1.5 to 1.75, and the quantity of foams at 30% to 35%. After that, the experiment was done to find a predictive equation for compressive strength, workability, direct tensile strength. The result showed that the optimum ratio of water to cement and sand to cement were 0.40 to 0.45 and 1.5, respectively. The appropriate quantity of foam were 30%

Keywords: cellular lightweight concrete, compressive strength, workability, foam concrete

1. บทนำ

ถนนทางหลวงในประเทศไทย มี 2 ประเภท คือ ถนนลาดยาง (Asphalt Pavement) และถนนคอนกรีต (Concrete Pavement) และเนื่องจากการใช้งานในปัจจุบันนั้นมีปริมาณการจราจรที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วประกอบกับยังคงมีผู้ประกอบการบรรทุกน้ำหนักเกินตามที่กฎหมายกำหนด จึงส่งผลให้ถนนได้รับความชำรุดเสียหายเร็วกว่าอายุการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้การสร้างถนนสายใหม่ทดแทนถนนเดิมให้เป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณแผ่นดิน ซึ่งการซ่อมแซมน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากกว่า เพราะสามารถแก้ปัญหาได้ตรงจุด และใช้จำกัดงบประมาณได้ง่าย

ดังเช่นตัวอย่างเมื่อมีรอยแยกบนพื้นถนน เมื่อเวลาฝนตกน้ำจะซึมผ่านรอยแยกนั้นเมื่อมีรถบรรทุกจากการจราจรกดทับ น้ำที่อยู่ใต้แผ่นพื้นจะถูกบีบอัดออกมาพร้อมมวลรวมละเอียดกระจายอยู่บนพื้นผิวคอนกรีตหรือเรียกว่าการสูญเสียมวลรวมละเอียดของชั้นโครงสร้างทาง (Pumping) เกิดเป็นโพรงใต้ถนนคอนกรีตได้ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 รอยแยกเป็นเหตุให้เกิดโพรงใต้พื้นถนนจากปรากฏการณ์ Pumping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตมวลเบาในปัจจุบันนั้นมีการพัฒนาไปมากและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในวงการก่อสร้าง ด้วยส่วนผสมที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป ขั้นตอนการผสมที่ไม่ยุ่งยาก เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งคุณสมบัติเสมือนคอนกรีตสด แต่มีความพิเศษเฉพาะตัวและน้ำหนักที่เบากว่าคอนกรีตทั่วไป ทำให้ดินเดิมไม่ต้องมีภาระเพิ่มขึ้นมากนัก อีกทั้งคุณสมบัติในการแข็งตัวอาจทำให้ลดแรงดันดินด้านข้างที่ Abutment ได้ด้วย และยังมีความสามารถในการไหลที่ดีกว่าทำให้ลดพลังงานของในการปั๊มปูนได้อีก โดยคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้จะเรียกว่า “Foam Aerated Concrete” หรือ “Cellular Lightweight Concrete”

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าถูกพัฒนาขึ้น ณ เมืองสต๊อกโฮม ประเทศสวีเดนราวปี ค.ศ.1900 เดิมทีเป็นที่รู้จักในนาม “gas concrete” ซึ่งใช้มากในวัสดุอาคารในแง่ของผลิตภัณฑ์ฉนวนความร้อน หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกเผยแพร่ในหลายประเทศอย่างรวดเร็ว จุดเด่นในการพัฒนาวัสดุนี้ในแง่ของวิธีการและคุณภาพที่ได้พัฒนาคุณภาพซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับการใช้งานประเภท อิฐ วัสดุเติมช่องว่าง และงานถนน[1]

งานวิจัยนี้จึงศึกษาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีคุณสมบัติสามารถใช้ทดแทนมอร์ต้าเพื่อเสริมความแข็งแรงถนนคอนกรีตและซ่อมแซมความเสียหายอันเกิดโพรงช่องว่างใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต ตามมาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing) กรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม.327/2543[2]

2. คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาปัจจุบันนิยมใช้ในงานก่อสร้างผนังอาคารและอิฐบล๊อกปูพื้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีจึงสามารถการใช้พลังงานลงได้ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC) เป็นคอนกรีตที่ผลิตโดยวิธี Pre-formed foam คือการสร้างฟองโฟมหรือฟองอากาศปริมาณสูง การค่อยฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นกระบวนการเติมฟองอากาศเข้าสู่เนื้อคอนกรีตเพื่อทำหน้าที่แทนที่มวลรวม เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนมากและมีน้ำหนักเบา การผลิตคอนกรีตโดยวิธีนี้สามารถควบคุมกระบวนการเกิดโพรงอากาศที่แทรกภายในคอนกรีตได้ดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย[3]

ธนภร ทวีวุฒิ(2558) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่หน่วยน้ำหนักออกแบบเท่ากับ 800, 1000, 1200, 1400, 1600 และ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแนวโน้มกำลังรับแรงอัดขอตัวอย่างทดสอบที่อายุครบ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.9 เท่า, ที่อายุ 14 วัน มีค่าประมาณ 0.8-0.99 เท่า และที่อายุ 56 วัน มีค่าประมาณ 1.03-1.25 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่อายุครบ 28 วัน [4]

กฤษณ์ กิ่งโก้(2553) ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ที่มีความหนาแน่นระหว่างความหนาแน่น 950 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุครบ 7 วัน กรณีที่ไม่ผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ จะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 40, 70 และ 115 กก./ซม^2 ที่น้ำหนัก 1,200, 1,400 และ 1,600 กก./ม^3 ตามลำดับ และเมื่อผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ 1% ในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นปืน 77, 144 และ 185 กก./ซม^2 โดยที่หน่วยน้ำหนัก 1,200 กก/ม^3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 1.5 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 50%, หน่วยน้ำหนัก 1,400 กก/ม^3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 2 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 40% และหน่วยน้ำหนัก 1,600 กก/ม^3 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ 2.5 และเปอร์เซ็นต์โฟมที่ 30%[5]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป

2) น้ำสะอาด

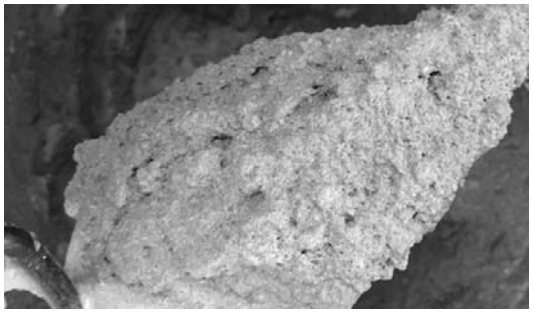
3) ทรายละเอียดที่แข็ง คงทน สะอาดที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ 100 และมีส่วนผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 50 ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543

4) น้ำยาผลิตฟองโฟม (foaming agent)

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มจากการเตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลวเพื่อเป็นส่วนผสมกับมอร์ต้าร์ โดยมีเครื่องปั๊มลมและหัวฉีดโฟมเหลว โดยผสมน้ำยาผลิตฟองโฟมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 ต่อเครื่องปั๊มลมเข้ากับหัวฉีดโฟม จากนั้นใส่ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ร้อยละ 100 และมีส่วนผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 50 ลงในเครื่องผสมพร้อมกับปูนซีเมนต์ เปิดเครื่องเพื่อให้ส่วนผสมคลุกเคล้ากันดีแล้วค่อยเติมน้ำจนส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ฉีดโฟมลงในเครื่องผสมในระหว่างการฉีดโฟมเครื่องผสมมอร์ต้าร์ต้องทำงานตลอดเวลาเพื่อให้แน่ใจว่ามอร์ต้าร์กับโฟมผสมเข้ากันได้ดีแล้วจึงหยุดเครื่องผสม ไม่ควรใช้เวลาในการผสมเกิน 5 นาที เพราะอาจจะทำให้ฟองโฟมแตกก่อนได้ และจากนั้นนำมอร์ต้าร์ที่ได้นำไปทดสอบหาค่าอัตราการไหล แล้วจึงนำไปเทลงในแบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร และแบบหล่อตัวอย่างรูปบริเคตที่ได้จัดเตรียมไว้แล้ว แกะแบบหล่อเมื่อมอร์ต้าร์เมื่อมีอายุได้ 1 วัน และนำตัวอย่างบ่มในน้ำเพื่อรอการทดสอบขั้นตอนต่อไป มอร์ต้าร์เปรียบเทียบนั้นดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกันแต่จะไม่ใส่ฟองโฟม[6] โดยลักษณะของคอนกรีตเมลเบาที่ผสมแล้วเสร็จใหม่จะมีฟองอากาศเล็กๆที่ยังไม่แตกตัวแทรกผสมอยู่ แสดงในรูปที่ 2 และมีรายละเอียดอัตราส่วนผสมสำหรับการทำวิจัย แสดงดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ส่วนผสมมอร์ต้าร์ที่มีโฟมฟองอากาศแทรกอยู่

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมมอร์ต้าร์ผสมโฟมและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ

Mix	W/C ratio	S/C ratio	Foam (%)	Cement (kg/m3)	Sand (kg/m3)	Water (kg/m3)	Foam (L/m3)
มอร์ต้าร์ผสมโฟม	0.40	1.50	30	541	811	216	300
	0.40	1.75	30	503	881	201	300
	0.45	1.50	30	521	781	234	300
	0.45	1.75	30	486	850	219	300
	0.40	1.50	35	502	753	201	350
	0.40	1.75	35	467	818	187	350
	0.45	1.50	35	483	725	218	350
	0.45	1.75	35	451	790	203	350
มอร์ต้าร์เปรียบเทียบ	0.40	1.50	/30	541	1591	216	-
	0.40	1.75	/30	503	1661	201	-
	0.45	1.50	/30	521	1561	234	-
	0.45	1.75	/30	486	1630	219	-
	0.40	1.50	/35	502	1663	201	-
	0.40	1.75	/35	467	1728	187	-
	0.45	1.50	/35	483	1635	218	-
	0.45	1.75	/35	451	1700	203	-

หมายเหตุ W/C คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์
S/C คือ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์
/30 และ /35 เพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ผสมโฟม โดยโฟมจะแทนที่ทรายที่หายไป

3.3 การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบา

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

การศึกษานี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 7 และ 28 วัน เพื่อให้ทราบแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัด สำหรับการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)[7] ทั้งหมด 96 ตัวอย่าง โดยก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบให้ทำการเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้แห้ง(ชื้น) เพื่อขจัดน้ำและเม็ดทรายหรือสิ่งที่ติดผิวมอร์ต้าร์ออก เลือกด้านที่เรียบที่สุด 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ ควบคุมเครื่องทดสอบให้มีน้ำหนักด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90 - 180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง

3.4.2 การทดสอบอัตราการไหล

การทดสอบหาอัตราการไหลของคอนกรีตสด อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C939 Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)[8] โดยการนำส่วนผสมที่ผสมแล้วเสร็จและมีสภาพข้นเหลว โดยก่อนการทดสอบให้เติมน้ำสะอาดลงในกรวยทดสอบก่อน 1 นาที จากนั้นระบายน้ำออกด้านล่างของกรวย ทำการอุดรูกรวยอีกครั้ง และนำมอร์ต้าร์ที่ผสมแล้วเสร็จใส่ลงในกรวย เปิดรูระบายด้านล่างของกรวยออกให้มอร์ต้าร์สามารถไหลอย่างอิสระ พร้อมจับเวลาที่มอร์ต้าร์ไหลจนหมด บันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลหน่วยเป็นวินาที

3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน

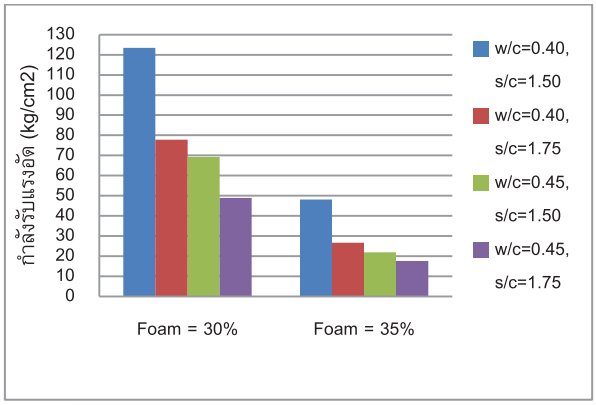
การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างรูปบริเคต อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C190 Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars[9] ทั้งหมด 48 ตัวอย่าง โดยเช็ดตัวอย่างที่เปียกน้ำให้ผิวแห้งก่อนเข้าเครื่องทดสอบที่มีหัวจับ (Clip) จะต้องหมุนได้อิสระและได้ศูนย์กลาง เพื่อให้ได้การทดสอบแรงดึงที่แท้จริง โดยไม่มีแรงบิดหรือโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องในการทดสอบ ดึงตัวอย่างด้วยอัตรา 260 – 280 กิโลกรัมต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างบริเคตขาดออกจากกัน และบันทึกค่าน้ำหนักที่ทำให้ตัวอย่างขาดออกจากกัน

4. ผลการวิจัย

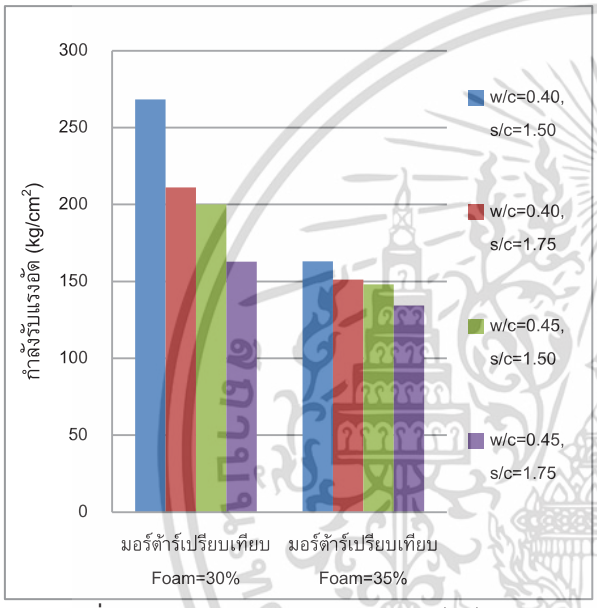
4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตรที่อายุครบ 7 วัน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109 แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์นั้นมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เปอร์เซ็นต์โฟม 30% จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเปอร์เซ็นต์โฟม 35% และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.40 จะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) ที่ 0.45 อีกทั้งแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ลดลง ทั้งคอนกรีตมวลเบาและมอร์ต้าร์ แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อวิบัติ จะเผยให้เห็นจะมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่มาก ดังแสดงในรูปที่ 5

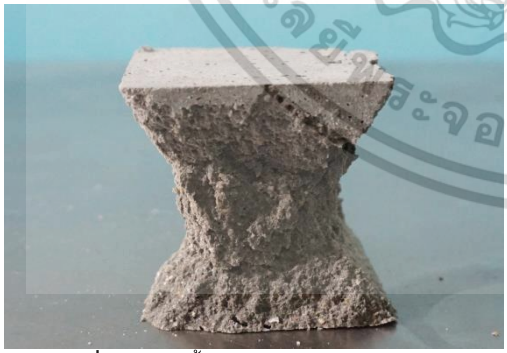
เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ผลอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดโฟมคอนกรีต ที่อายุครบ 7 วัน



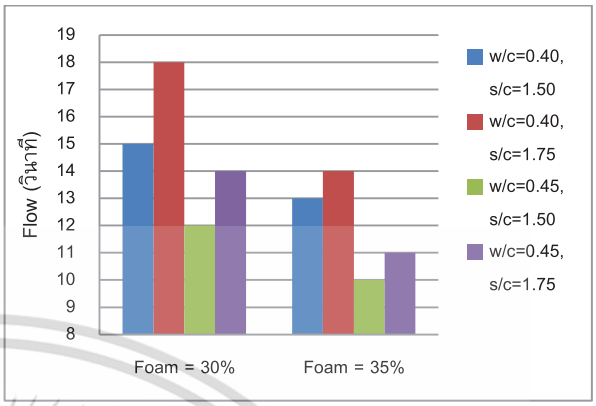
รูปที่ 4 ผลอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ ที่อายุครบ 7 วัน



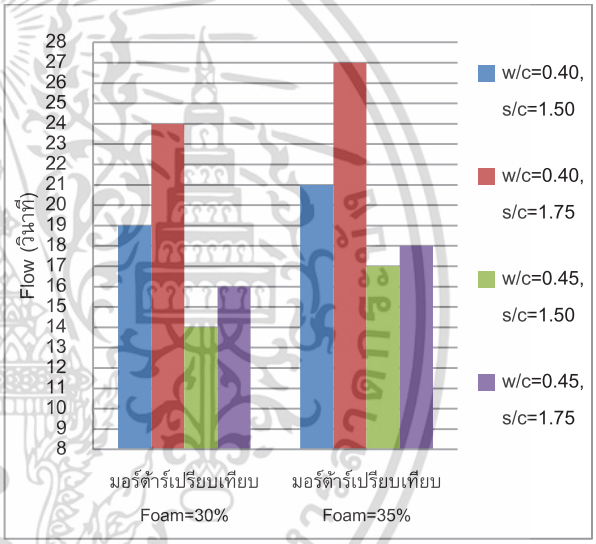
รูปที่ 5 ภายในเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มีโพรงอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ทั่วในเนื้อคอนกรีต

4.2 การทดสอบการไหล

ผลการทดสอบสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939 (Flow Cone Method) แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีอัตราการไหลที่ดีกว่ามอร์ต้าร์ และเมื่ออัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โฟมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C)มากขึ้น แนวโน้มอัตราการไหลจะแปรผันตรง ส่วนอัตราส่วนอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) จะแปรผกผันกับอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 และลักษณะการวิบัติแสดงให้เห็นถึงเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบารูปบริเคตที่มีฟองอากาศแทรกอยู่



รูปที่ 6 ผลอัตราส่วนผสมต่ออัตราการไหลโฟมคอนกรีต

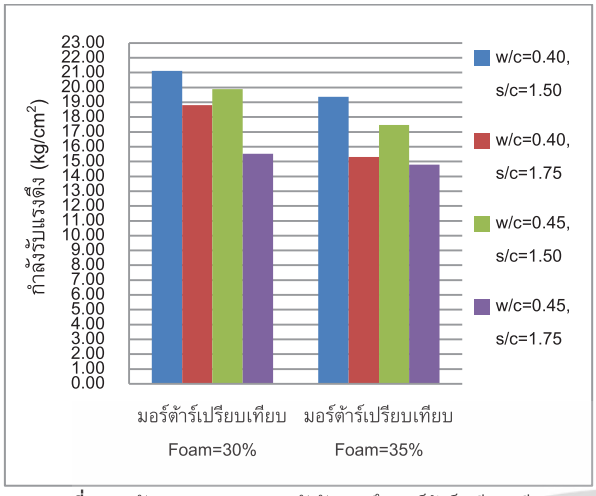


รูปที่ 7 ผลอัตราส่วนผสมต่ออัตราการไหลมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ

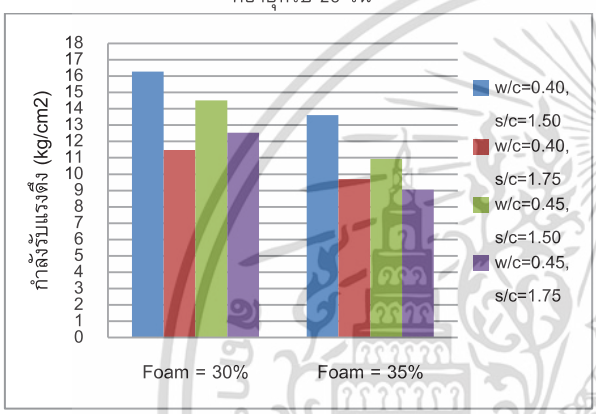
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบอายุครบ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะรับแรงดึงได้น้อยกว่ามอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน และคอนกรีตมวลเบาที่เปอร์เซ็นต์โฟมที่ 30% จะมีกำลังรับแรงดึงที่สูงว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเปอร์เซ็นต์โฟม 40% และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์(W/C) กับอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C)ที่ลดลง แนวโน้มกำลังรับแรงดึงก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 8 และ 9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ผลอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงมอร์ต้าร์เปรียบเทียบที่อายุครบ 28 วัน



รูปที่ 9 ผลอัตราส่วนผสมต่อกำลังรับแรงดึงโฟมคอนกรีตที่อายุครบ 28 วัน

รูปที่ 10 ลักษณะวิบัติแสดงให้เห็นถึงเนื้อภายในคอนกรีตมวลเบารูปบริเคตที่มีฟองอากาศแทรกอยู่

5. สรุปและวิเคราะห์ผล

จากผลการศึกษาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร การทดสอบอัตราการไหล และการทดสอบกำลังรับแรงดึงตัวอย่างรูปบริเคต ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและมอร์ต้าร์เปรียบเทียบ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.4 และ 0.45 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) เท่ากับ 1.5 และ 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ในช่วง 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งหมด 16 สูตร เพื่อหาแนวโน้มกำลังรับแรงอัดและอัตราการไหลให้ได้ตามคุณสมบัติที่สามารถใช้แทนมอร์ต้าร์อุดโพรงใต้ถนนคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สรุปได้ว่า

1) กำลังรับแรงอัด อัตราส่วนผสมสำหรับสามารถใช้ทดแทนมอร์ต้าร์ในการอุดซ่อมโพรงใต้พื้นถนนคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543 ซึ่งได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร ไม่น้อยว่า 5.19 เมกะพาสคัล หรือ 52.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุครบ 7 วัน ผลปรากฏว่าส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.50 และปริมาณโฟมอยู่ที่เหมาะสมที่ 30 เปอร์เซ็นต์

2) อัตราการไหล ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.327/2543 ได้กำหนดไว้ว่า เมื่อทำการทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C939 (Flow Cone Method) นั้นต้องมีค่าการไหลอยู่ระหว่าง 8 – 16 วินาที และจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านั้นจะให้มีอัตราการไหลที่ดีกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้เวลานานกว่า โดยอัตราส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่เหมาะสมตามมาตรฐานกรมทางหลวง มีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในที่ 1.50 ถึง 1.75 และปริมาณโฟมอยู่ที่เหมาะสมที่ 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์

3) เมื่อพิจารณาจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์นั้น พบว่ามอร์ต้าร์สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์และน้ำเท่ากัน เนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมวลเบาจะมีความเปราะกว่ามอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นข้อด้อยของคอนกรีตมวลเบาในแง่ของความทนทาน

สรุปผลจากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าสามารถใช้อุดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีตแทนการใช้มอร์ต้าร์ได้ โดยคุณสมบัติวัสดุเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวงกำหนด ซึ่งเป็นวัสดุอีกหนึ่งทางเลือกที่น้ำหนักเบา เครื่องมือที่เล็กกว่า อีกทั้งราคายังประหยัดกว่าการใช้มอร์ต้าร์แบบเดิมอีกด้วย

6. ข้อเสนอแนะ

1) หากต้องการให้ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบามีอัตราการพัฒนากำลังเร็วขึ้นเห็นควรทดลองใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 แทนประเภทที่ 1

2) การใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำลงในตัวอย่างทดสอบ เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งซึ่งสามารถช่วยเรื่องเพิ่มอัตราการไหลที่ดีขึ้นโดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่าเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.สุวัฒน์ ถิรเศรษฐ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะตลอดจนแนวทางในการทำวิจัยนี้และขอขอบพระคุณผู้ควบคุมห้องทดลอง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสนับสนุนการทำวิจัยนี้ให้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Nandi, Arnab Chatterjee, Prantik Samanta, Tanushree Hansda (2016). Celluar Concrete & its facets of application in Civil Engineer. *International Journal of Engineer Research(NCICE@2016)*, ISSN:2319-6890, Volume No.5, Issue Special 1, 8-9 Jan 2016, pp.37-43.

[2] มาตรฐานการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นพื้นถนนคอนกรีต (Subsealing). มาตรฐานที่ ทล.-ม.327/2543 กรมทางหลวงกระทรวงคมนาคม

[3] Panesar, D.K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. Construction and Building Materials, 44, pp.575-584

[4] ธนภร ทวีวุฒิ และ นท แสงเทียน (2558). กำลังรับแรงอัดและ การดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. *วารสารวิชาการ ม.อบ.*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 91-102.

[5] กฤษณ์ กิ่งโก้ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2553). คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่าผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์. *การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา* ครั้งที่ 11, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 339 – 407.

[6] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2556). *คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และคอนกรีต*. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 102-143.

[7] American Society for Testing and Materials, ASTM C109/C 109M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88.

[8] American Society for Testing and Materials, ASTM C939-02 Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 90-94.

[9] American Society for Testing and Materials, ASTM C190-77 Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 195-198.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฐาปกรณ์ ตันวานิช
วัน เดือน ปีเกิด	14 ธันวาคม 2529 ที่ราชบุรี
ที่อยู่	8/37 ซอยหมู่บ้านสมอโพรง ตำบลหัวหิน
	อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110
	โทร.081-374-9994
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2542 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
	พ.ศ. 2545 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพรหมานุสรณ์ จังหวัดเพชรบุรี
	พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) งานออกแบบโครงสร้างวิศวกรรม เช่น บ้าน อาคารพาณิชย์ โกดัง
	2.) เขียนแบบงานโครงสร้างโดยโปรแกรมสำเร็จรูป
	3.) โปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้าง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2552-2554	ตำแหน่ง วิศวกรประมาณราคา (Estimate Engineer)
	บริษัท เวสท์คอน จำกัด
พ.ศ.2554-2556	ตำแหน่ง วิศวกรออกแบบงานโครงสร้าง (Structural Design Engineer)
	บริษัท ฤทธา จำกัด
พ.ศ.2556-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง วิศวกร 6 กองวิศวกรรมทางพิเศษ 2 ฝ่ายก่อสร้างทางพิเศษ
	การทางพิเศษแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้