การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เศษโฟมพอลิสไตรีนแบบขูดแทน วัสดุมวลเบาในคอนกรีต

FEASIBILITY STUDIES ON USING SCRAPED POLYSTYRENE PAPER FOAM AS SUBSTITUTED AGGREGATES IN CONCRETE

วสุรัตน์ บุญเพ็ง
WASURAT BUNPHENG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาคมนิสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2552
KMITL-2009-SC-M-016-033

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เศษโฟมพอลิสไตรีนแบบแผ่นแทนวัสดุมวลหยาบในคอนกรีต

FEASIBILITY STUDIES ON USING SCRAPED POLYSTYRENE PAPER FOAM AS SUBSTITUTED AGGREGATES IN CONCRETE

T105137

วสุรัตน์ บุญเพ็ง

WASURAT BUNPHENG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105137
วัน,เดือน,ปี.....16 พ.ย. 2552

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-016-033

FEASIBILITY STUDIES ON USING SCRAPED POLYSTYRENE PAPER FOAM AS SUBSTITUTED AGGREGATES IN CONCRETE

WASURAT BUNPHENG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL-2009-SC-M-016-033

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เศษโฟมพอลิสไตรีนแบบแผ่นแทนวัสดุมวลหยาบในคอนกรีต

Feasibility Studies on Using Scraped Polystyrene Paper Foam as Substituted Aggregates in Concrete

นักศึกษา นายวสุรัตน์ บุญเพ็ง

รหัสประจำตัว 47064005

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชมพูนุท	ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.ชลอ	จารุสุทธิรักษ์	
ผศ.ดร.สุวรรณี	จรรยาพูน	
ดร.สุชาติ	เหลืองประเสริฐ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2552 เวลา 09.30–12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 29 **เดือน** พฤษภาคม **พ.ศ.** 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เศษโฟมพอลิสไตรีนแบบแผ่นแทนวัสดุมวลหยาบในคอนกรีต
นักศึกษา	นายวสุรัตน์ บุญเพ็ง
รหัสประจำตัว	47064005
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เศษโฟมประเภทพอลิสไตรีนแบบแผ่น (Polystyrene Paper, PSP) ที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสำหรับเป็นส่วนผสมแทนวัสดุมวลหยาบในการผลิตคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าเศษโฟม PSP มีความเป็นไปได้ในการแทนที่มวลหยาบได้ในคอนกรีตบล็อก งานก่อ และงานโครงสร้าง การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเศษโฟมส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง ในขณะเดียวกันกำลังรับแรงอัดก็ลดลงด้วย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ คือ ร้อยละ 90 ขนาดของเศษโฟมที่แทนที่ในมวลหยาบไม่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต การเพิ่มระยะเวลาการบ่มมีผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่ม ซึ่งระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตบล็อก คือ 3 วัน สำหรับงานก่อ 7 วัน และสำหรับงานโครงสร้าง 28 วัน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ขนาด 15x15x15 ซม. พบว่าคอนกรีตมีน้ำหนักเฉลี่ย 5.67 ± 0.10 กิโลกรัม และความหนาแน่น 1680 ± 28.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษโฟมร้อยละ 29.50 และ ร้อยละ 28.47 ตามลำดับ การทดสอบคุณสมบัติทางกล พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามการใช้งาน ที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน มีค่า 69.47 ± 3.5, 111.00 ± 10.00 และ 226.53 ± 20.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน ความต้านทานแรงดัดมีค่า 104.93 ± 3.46 และ 225.97 ± 6.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดสอบ ความทนทานของคอนกรีตในอุณหภูมิที่สูง 538 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ากำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตมีค่าลดลงจากที่อุณหภูมิปกติเท่ากับ 104.96 ± 3.5 เหลือ 65.5 ± 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีในท้องตลาด พบว่าคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟมมีน้ำหนักน้อยกว่า กำลังรับแรงอัดมากกว่า และต้นทุนค่าวัสดุต่ำกว่า

คำสำคัญ : เศษโฟม, คอนกรีตบล็อก, งานก่อ, งานโครงสร้าง, พอลิสไตรีน

Thesis Title	Feasibility Studies on using Scraped Polystyrene Paper Foam as Substituted Aggregates in Concrete
Student	Mr.Wasurat Bunpheng
Student ID.	47064005
Degree	Master of Science
Program	Environmental Chemistry
Year	2009
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chalor Jarusutthirak

ABSTRACT

This research studied on the used scraped polystyrene paper foam as substituted aggregates in concrete. The results proved that PSP was possible to use as substituted aggregates in concrete for defferent applications, concrete block, construction and structure. An increase of PSP substitution ratio lowered concrete's density and compressive strength. An appropriate percentage of substitution was found to be 90 %. Size of PSP substituted in concrete did not affect concrete's properties. Longer curing period led to higher compressive strength. Optimum curing times to produce concrete block, and was construction, and structure was 3, 7, and 28 days, respectively. Physical tests of concrete in dimension of 15x15x15 centimeter, with 90% PSP-substitution, exhibited that the concrete employed average weight of 5.67 ± 0.10 kg and bulk density of 1680 ± 28.3 kg/m^3, which was 29.50 % and 28.47 % lower than that without PSP. Mechanical tests showed that compressive strengths of 90% PSP-substitution with curing times of 3, 7, and 28 days were complying with standard criteria of concrete for concrete block, construction, and structure respectively, 69.47 ± 3.5, 111.00 ± 10.00, and 226.53 ± 20.00 ksc respectively. Bending strengths of concrete with PSP at curing time of 7 and 28 days were 104.96 ± 3.50, and 225.97 ± 6.93 ksc, respectively. The durable test of concrete in high temperature at 538 C° showed that compressive strength of concretes decreased from 104.96 ± 3.50 to 65.5 ± 3.50 ksc., after 2 hours of heating. When compared with commercial concrete block, the PSP-substituted concrete blocks were found to be higher in weight, higher in compressive strength, and lower in material cost.

Keywords : Scraped Foam, Concrete Block, Construction, Structure, Polystyrene Paper

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ และ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตรวจวัดเสียง และขอขอบคุณนักศึกษาภาควิชาเคมีที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทางคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท เอส.พี.เอ็ม. อินดัสทรี จำกัด ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อน พี่และน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายวสุรัตน์ บุญเพ็ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 โฟม 4

2.2 คอนกรีต 8

2.2.1 องค์ประกอบของคอนกรีต 9

2.2.2 คอนกรีตมวลเบา 10

2.2.3 คอนกรีตบล็อก 13

2.2.4 การบ่มคอนกรีต 14

2.3 ปูนซีเมนต์ 16

2.3.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ 16

2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ 20

2.3.3 การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ 20

2.3.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ 21

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 24

2.4 มวลรวมหรือวัสดุผสมคอนกรีต 23

2.4.1 ทราย 24

2.4.2 หินฝุ่น 24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3 สารผสมเพิ่ม 24

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 31

3.1 วัสดุและสารเคมี 31

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 31

3.2.1 อุปกรณ์ 31

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ 32

3.3 ขั้นตอนการวิจัย 32

3.3.1 การเตรียมเศษโฟม 32

3.3.2 การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต 34

3.3.3 การเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง 36

3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต 37

3.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต 38

3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกในส่วนผสมของคอนกรีต 39

3.3.7 การศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง 39

3.3.8 การเปรียบเทียบคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟม PSP และคอนกรีตบล็อกที่มีจำหน่าย 40

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 41

4.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการแทนที่ของเศษโฟมในคอนกรีต 41

4.1.1 ปริมาณเศษโฟมแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต 41

4.1.2 ระยะเวลาบ่มคอนกรีต 43

4.1.3 การหาขนาดเศษโฟมแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต 44

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตตัวอย่าง 44

4.2.1 การหาความหนาแน่นของคอนกรีตตัวอย่าง 44

4.2.2 การหาความสามารถในการดูดซึมน้ำ 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 การทดสอบค่ายุบตัว 46
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตตัวอย่าง 47
4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง 47
4.3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตตัวอย่าง 48
4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกในส่วนผสมของคอนกรีต 49
4.5 ผลการทดสอบความทนทานของคอนกรีตในอุณหภูมิที่สูง 50
4.6 การเปรียบเทียบการผลิตคอนกรีตบล็อก 51
4.6.1 การเปรียบเทียบการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก 51
4.6.2 การเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตบล็อก 52
4.6.3 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตบล็อก 53

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 54
5.1 สรุปผลการวิจัย 54
5.2 ข้อเสนอแนะ 55

เอกสารอ้างอิง 56

ภาคผนวก 58
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต 59
ภาคผนวก ข. วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต 67
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบคอนกรีต 85
ภาคผนวก ง. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ 106

ประวัติผู้เขียน 117

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ลักษณะและรายละเอียดของพอลิสไตรีนชนิดต่าง ๆ 5

2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะบางประการของพอลิสไตรีนกับวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ 6

2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติมวลรวมระหว่างหินและโฟม 7

2.4 ปริมาตรของส่วนประกอบของส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไป 8

2.5 การจำแนกคอนกรีตเบาตามการนำไปใช้ 11

2.6 ปริมาณค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 17

2.7 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 18

2.8 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ 18

2.9 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80% 23

3.1 สัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตชุดควบคุม 35

3.2 สัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม 35

3.3 ปัจจัยควบคุมและปัจจัยที่ศึกษาในการทดสอบคอนกรีต 35

4.1 ราคาต้นทุนการทำคอนกรีตบล็อก 53

ก-1 ค่ายุบตัวสำหรับงานประเภทต่างๆ 61

ก-2 ปริมาณน้ำผสมคอนกรีต 62

ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำ – ซีเมนต์ 63

ก-4 อัตราส่วนน้ำ – ซีเมนต์ที่ยอมให้สำหรับงานภายใต้สภาวะพิเศษ 63

ก-5 ปริมาตรของหินต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร 64

ก-6 น้ำหนักคอนกรีตสด 64

ก-7 แสดงสัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม 66

ก-8 แสดงสัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร 66

ค-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 86

ค-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค-3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 0.5 - 1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 90

ค-4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 1.0 - 1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ 92

ค-5 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 94

ค-6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 96

ค-7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 0.5 - 1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 98

ค-8 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 1.0 - 1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 100

ค-9 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล ความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 102

ค-10 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความปลอดภัย การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตผสมโฟมแบบคละขนาด..... 103

ค-11 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความปลอดภัย กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแบบคละขนาด..... 104

ค-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร แบบต่างๆ 105

ง-1 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟม แทนที่อัตราส่วนร้อยละ 30 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)..... 108

ง-2 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟม แทนที่อัตราส่วนร้อยละ 45 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)..... 108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ง-3 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟม แทนที่อัตราส่วนร้อยละ 60 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)..... 109

ง-4 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟม แทนที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)..... 109

ง-5 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟม แทนที่อัตราส่วนร้อยละ 90 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)..... 110

ง-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ขอการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่นของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ 111

ง-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ..... 112

ง-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การยุบตัวของคอนกรีตผสมโฟมขนาดคละขนาด.... 113

ง-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนักของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ..... 114

ง-10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมขนาดขนาดต่างๆ.....115

ง-11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงคัดของคอนกรีตผสม โฟมคละขนาด.....116

ง-12 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาความทนทานที่อุณหภูมิสูง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมคละขนาด..... 116

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 สูตรโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิสไตรีน 4

2.2 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต 9

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 33

4.1 น้ำหนักคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 41

4.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตผสมโฟมในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 90 และคอนกรีตไม่ผสมโฟม ที่กำลังขยายต่างๆ 42

4.3 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ 43

4.4 ผลของขนาดเศษโฟมต่อกำลังรับแรงอัดโดยใช้คอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน 44

4.5 ความหนาแน่นคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน 45

4.6 ความสามารถในการดูดซึมน้ำคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน 46

4.7 ค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนผสมเศษโฟมต่างๆ 47

4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน 48

4.9 ความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน 49

4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 และคอนกรีตไม่ผสมเศษโฟม ระยะเวลาบ่ม 7 วัน 50

4.11 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันโดยการเผาที่ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง และไม่เผาไฟ 51

4.12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด 52

4.13 น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด 52

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

ข-1 การผสมคอนกรีตในเครื่องโม่คอนกรีต 76

ข-2 แบบหล่อทดสอบแรงอัดทรงลูกบาศก์ 15 X 15 X 15 เซนติเมตร 76

ข-3 แบบหล่อทดสอบแรงดัด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร 77

ข-4 การบ่มน้ำ 77

ข-5 คอนกรีตที่ผสมกันเข้าที่แล้ว 78

ข-6 การทดสอบหาค่าการยุบตัว 78

ข-7 ทำการวัดค่าการยุบตัว 79

ข-8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง (Universal Testing Machine) 79

ข-9 การแตกหักของคอนกรีตตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัด 80

ข-10 คอนกรีตตัวอย่างที่นำออกมาจากเตาเผาไฟ 80

ข-11 ตัดตัวอย่างคอนกรีตนำไปทดสอบรับแรงกำลังอัด 81

ข-12 คอนกรีตตัวอย่างที่ตัดแล้วขนาด 5 x 5 x 10 เซนติเมตร 81

ข-13 โม่และสายพานของเครื่องอัดบล็อกคอนกรีต 82

ข-14 การโม่ส่วนผสมคอนกรีต 82

ข-15 บล็อกสำหรับขึ้นรูปคอนกรีตที่โม่แล้ว 83

ข-16 การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องอัด 83

ข-17 คอนกรีตบล็อกที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว 84

ข-18 คอนกรีตบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร 84

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ของเศษโฟม PSP ในคอนกรีต และหาอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และองค์ประกอบของผลึกในคอนกรีตที่มีโฟมผสม เปรียบเทียบคอนกรีตที่ไม่ได้ถูกแทนที่ด้วยโฟม

1.2.3 เพื่อศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเศษโฟม PSP ในอุณหภูมิที่สูง

1.2.4 เพื่อศึกษาเปรียบคอนกรีตผสมโฟมกับคอนกรีตบล็อกในท้องตลาด ได้แก่ น้ำหนัก กำลังรับแรงอัด และราคาต้นทุนการผลิต

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 เศษโฟมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเศษโฟมประเภท พอลิสไตรีนแบบแผ่น (Polystyrene Paper, PSP) ที่เหลือใช้จากการขึ้นรูปกล่องโฟมบรรจุอาหาร โดยเศษโฟมถูกทำการย่อยเพื่อลดขนาดให้มีขนาดไม่เกิน 1.50 เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัดของโรงงานผู้ผลิตกล่องโฟมบรรจุอาหาร

1.3.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เศษโฟม PSP แทนที่วัสดุมวลหยาบ ได้แก่ หินฝุ่น โดยผลิตคอนกรีตตัวอย่างเพื่อการทดสอบใน 4 ลักษณะ ได้แก่

1) คอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟมที่ใช้วิธีตามมาตรฐานแบบเดียวกับคอนกรีตบล็อกที่ขายในตามท้องตลาด (มอก. 58/2530) ขนาดเท่ากับ 39 X 19 X 7 เซนติเมตร

2) คอนกรีตตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ ขนาดเท่ากับ 5 X 15 X 15 เซนติเมตร สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด

3) คานคอนกรีตตัวอย่างทดสอบ ขนาดเท่ากับ 15 X 15 X 60 เซนติเมตร สำหรับทดสอบความต้านทานแรงดัด

4) คอนกรีตตัวอย่างทดสอบ ขนาดเท่ากับ 30 X 30 X 5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบความทนทานที่อุณหภูมิสูง

1.3.3 ปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

1) ปัจจัยควบคุม

- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water to cement ratio, WCR) เท่ากับ 0.4
- อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ เท่ากับ 2.615
- อุณหภูมิที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

2) ปัจจัยที่ทำการศึกษา

- ปริมาณการแทนที่วัสดุมวลหยาบ โดยแปรค่าปริมาณเศษโฟม PSP ในปริมาณร้อยละ 0, 30, 45, 60, 75 และ 90

- ขนาดของเศษโฟม ในการทดสอบได้แบ่งโฟม PSP 4 ขนาด ได้แก่ 1) ขนาดใหญ่ 1.0 - 1.5 เซนติเมตร, 2) ขนาดปานกลาง 0.5 - 1.0 เซนติเมตร, 3) ขนาดเล็ก ต่ำกว่า 0.5 เซนติเมตร และ 4) แบบคละขนาด โดยทั้งหมดมีขนาดต่ำกว่า 1.5 เซนติเมตร

- ระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต โดยศึกษาที่ระยะเวลา 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน

1.3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 4 ด้าน

- คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนัก, ความหนาแน่น, และความสามารถในการดูดซึมน้ำ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM

- คุณสมบัติทางกล โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการทดสอบหาความต้านทานแรงดัด ตามวิธีมาตรฐาน ASTM

- การวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกในส่วนผสมของคอนกรีตผสมโฟมด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) ตามวิธีมาตรฐาน และการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

- การทดสอบความทนทานของคอนกรีตในสภาวะที่อุณหภูมิสูง

- การเปรียบเทียบคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟม PSP และคอนกรีตบล็อกที่มีจำหน่าย ได้แก่ น้ำหนัก กำลังรับแรงอัด และราคาต้นทุนวัสดุ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ของเสียจากกระบวนการผลิต ทำให้เกิดการลดของเสียที่เกิดขึ้น เกิดการประหยัดงบประมาณในการกำจัด ลดพื้นที่การฝังกลบ และนำทรัพยากรที่เหลือใช้นำกลับมาใช้ใหม่ทางหนึ่ง เพื่อทดแทนวัสดุอื่น

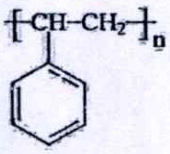
1.4.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ หากพบว่ามีคุณสมบัติที่ดีเหมาะสมในการใช้ทำเป็นคอนกรีตประเภทต่างๆ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังปลอดภัยในสภาวะที่อุณหภูมิสูง จะช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างได้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟม

โฟม เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทหนึ่ง ที่ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตโฟมมีหลายชนิด เช่น พอลิเอทีลีน (PE) พอลิสไตรีน (PS) พอลิยูริเทน (PU) เป็นต้น ชนิดที่นิยมที่สุด คือ พอลิสไตรีน PS เนื่องจากโฟม PS มีคุณสมบัติเด่นเหนือวัสดุอื่นตรงที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความยืดหยุ่นป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี อีกทั้งขึ้นรูปให้เป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่ายซึ่งใช้เงินทุนไม่สูงมากนัก ดังนั้นบรรจุภัณฑ์โฟมจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โฟมแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะรูปทรง ในที่นี้จะกล่าวถึงโฟมซึ่งผลิตจากพลาสติกประเภท Polystyrene เท่านั้น

โฟม Polystyrene มีสูตรโมเลกุล และสูตรโครงสร้างโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะของพอลิสไตรีนจากการขึ้นรูปในลักษณะต่าง ๆ พบว่ามีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 และเปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะบางประการของพอลิสไตรีนกับวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2



$(C_8H_8)n$

สูตรโมเลกุล สูตรโครงสร้าง

รูปที่ 2.1 สูตรโมเลกุล และโครงสร้างของพอลิสไตรีน

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของพอลิสไตรีนชนิดต่าง ๆ

Property	Polystyrene							
	ASTM	Extruded plank		Expanded plank			Extruded sheet	
Density, kg/m^3		35	53	16	32	80	96	160
Mechanical properties								
Compressive strength, KPa at 10%	D1621	310	862	90-124	207-276	586-896	290	469
Tensile strength, KPa	D1623	517		145-193	310-379	1020-1186	2070-3450	4137-6900
Flexural strength, KPa	D790	1138		193-241	379-517			
Shear strength, KPa	C273	241			241			
Thermal properties								
Thermal Conductivity, W/(m.K)	C177	0.03		0.037	0.035	0.035	0.035	0.035
Electrical properties								
Dielectric constant	D1673	<1.05	<	1.02	1.02	1.02	1.27	1.28
Dissipation factor			1.05					
Moisture resistant								
Water absorption, vol%	C272	0.02		1-4	1-4			
Moisture vapor transmission g/(m.s.GPa)	E96	35	0.05	< 120	35-120	23-25	86	56

ที่มา : Klempner and Frisch (1991)

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะบางประการของพอลิสไตรีนกับวัสดุสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

วัสดุสังเคราะห์	ความหนาแน่นจำเพาะ	อัตราดูดซึมน้ำ (%)	สัมประสิทธิ์การขยายตัว	อุณหภูมิหลอมละลาย (°F)	การส่องผ่านแสง UV	ทนทานต่อความร้อน
Polyethylene (PE)	0.95	0.01	0.000070	266	Translucent	ไม่ทน
Polystyrene (PS)	1.05	0.06	0.000040	212	Clear	ไม่ทน
Polypropylene (PP)	0.90	0.01	0.000060	338	Translucent	ไม่ทน
Polyethylene Terephthalate (PET)	1.37	0.15	0.000039	480	-	ทน
Polyvinylchloride (PVC)	1.56	0.15	0.000040	175	Clear	ไม่ทน
Polymethylmethacrylate (PMMA : Plexiglass)	1.16	0.30	0.000022	490	Clear	ทน

ที่มา : สมคิด และคณะ 2537

กระบวนการผลิตโฟมในปัจจุบันแบ่งตามวิธีการผลิตออกเป็น 2 วิธีดังนี้ (สมคิด และคณะ 2537)

1) Expandable Polystyrene หรือ EPS คือโฟม PS ที่ใช้ก๊าซ Pentane (C_5H_{12}) ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับก๊าซหุงต้มหรือ Butane (C_4H_{10}) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว (Blowing Agent) ในระหว่าง กระบวนการผลิตวัตถุดิบที่เรียกว่า Polymerization เนื้อพลาสติก PS จะทำปฏิกิริยากักเก็บก๊าซ Pentane เอาไว้ภายใน เมื่อนำมาผลิตโฟม EPS วัตถุดิบจะขยายตัว และเมื่อได้รับความร้อนจากไอน้ำ (Steam) ก็จะกลายเป็นเม็ดโฟมขาว ๆ จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป (Molding) ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ

(1) อัดขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามลักษณะแม่พิมพ์ที่ทำ (Shape Molding) เช่น เป็นกล่องน้ำแข็งและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ

(2) อัดขึ้นรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยม (Block Molding) แล้วนำมาตัดตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการ โดยทั่วไปโฟม EPS จะขยายตัวประมาณ 50 เท่า และเมื่อขยายตัวแล้วจะมีอากาศเข้ามาแทนที่ถึง 98% ของปริมาตร มีเพียง 2 % เท่านั้นที่เป็นเนื้อพลาสติก PS และนี่คือสาเหตุที่ทำให้โฟมมีขนาดใหญ่แต่กลับมีน้ำหนักเบา

คุณลักษณะนี้เองที่ทำให้โฟม EPS สามารถรองรับแรง กระแทกได้อย่างดีเหมาะสำหรับใช้ในการบรรจุสินค้า และยังรองรับถ่ายเทน้ำหนักในแนวดิ่งโดยไม่เสียรูปทรง จึงใช้เป็นวัสดุฉนวน

การทำถนนเพื่อแก้ปัญหาถนนทรุด และยังใช้เป็นฉนวนรักษาความร้อนและเย็น เนื่องจากอากาศที่มีอยู่ภายในโฟมถึง 98% ทำหน้าที่เป็นฉนวนได้ดี นอกจากนำกลับไปผ่านกระบวนการรีไซเคิลแล้ว โฟมพอลิสไตรีน EPS ที่ใช้แล้วยังสามารถจัดการได้ดังต่อไปนี้

(1) ผสมดินเพื่อใช้ในการเพาะปลูก เนื่องจากพอลิสไตรีน EPS ที่บดแล้วจะช่วยให้ดินร่วนซุยและอากาศที่อยู่ภายในจะเป็นประโยชน์ต่อรากของพืช

(2) ผสมคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้าง เนื่องจากโฟมพอลิสไตรีน EPS มีคุณสมบัติเป็นฉนวนและมีน้ำหนักเบา การใช้โฟมพอลิสไตรีน EPS ที่บดแล้วแทนที่หินผสมในคอนกรีตจะทำให้ลดน้ำหนักวัสดุนั้นและยังรักษาอุณหภูมิของสถานที่ก่อสร้างได้อย่างดี ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการระหว่างหินและโฟม

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติมวลรวมระหว่างหินและโฟม

คุณสมบัติ	ประเภทมวลหยาบ	
	หิน	โฟม
1. ความแข็งแกร่ง	สูง	ค่อนข้างต่ำ
2. ความต้านทานแรงกระแทกและเสียดสี	สูง	ปานกลาง
3. ความสามารถในการเท	สูง	ค่อนข้างสูง
4. โมดูลัสความยืดหยุ่น	ต่ำ	สูง
5. น้ำหนัก	หนัก	เบา
6. ราคา	ปานกลาง	ต่ำ

ปรับปรุงจาก สมคิด และคณะ (2537)

(3) เผาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากโฟมพอลิสไตรีน EPS มีอากาศอยู่ภายในเป็นส่วนใหญ่ หากถูกเผาโดยใช้ความร้อนสูง 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้การเผาโฟมที่บดแล้วนั้นเป็นไปโดยปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมโดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงใดๆ โดยโฟมพอลิสไตรีนแบบหล่อที่เผาด้วยกระบวนการดังกล่าว 1 กก. สามารถใช้พลังงานเท่ากับน้ำมัน 1.2-1.4 ลิตร

2) **Polystyrene Paper / PSP** คือโฟม PS ที่ใช้ก๊าซหุงต้มหรือ Butane (C_4H_{10}) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว วัตถุดิบที่ใช้ก็คือเม็ดพลาสติก PS ทั่วไป ซึ่งเข้าสู่กระบวนการฉีดโดยใช้สกรูซึ่งมีความร้อนจากไฟฟ้าเช่นเดียวกับการฉีดพลาสติกทั่วไป (Screw Extrusion) เมื่อเม็ดพลาสติก PS ผ่านสกรูความร้อนก็จะหลอมตัว ขณะที่จะออกจากปลายสกรูก็จะถูกฉีดก๊าซ Butane (C_4H_{10}) ผสมเข้าไปทำปฏิกิริยาให้พลาสติกที่กำลังหลอมนั้นเกิดการขยายตัวประมาณ 20 เท่า ฉีดออกเป็นแผ่นแล้วม้วน

เข้าคล้ายม้วนกระดาษ (จึงเรียกว่า Polystyrene Paper / PSP) จากนั้นก็จะนำม้วนโฟม PSP ที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermal Forming) ตามลักษณะแม่พิมพ์ เช่น เป็นกล่องใส่อาหารหรือถาด เป็นต้น

2.2 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเป็นโครงสร้าง ที่มีส่วนผสมประกอบของ ซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ ผสมรวมกันด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม มีวัสดุละเอียด คือ ทรายแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุหยาบคือหิน และมีน้ำซีเมนต์เป็นตัวประสานแทรกอยู่ตามช่องว่างของวัสดุผสมละเอียดกับวัสดุหยาบ โดยยึดติดกันแน่นรวมตัวกันเป็นก้อนคอนกรีตในแบบหล่อ เมื่อแข็งตัวจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ภายในเนื้อคอนกรีตอาจมีช่องว่างของอากาศหรือสารเคมีที่ผสมเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการอยู่ด้วย เนื้อคอนกรีตสามารถแยกออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ ได้ 2 ส่วน คือ วัสดุมวลรวม (Aggregates) และซีเมนต์เพสต์ (Paste) โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมยังแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ มวลละเอียดและมวลหยาบ ส่วนเป็นซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์น้ำ และอากาศ (วินิต, 2539)

เนื้อคอนกรีตโดยทั่วไป ประกอบด้วยปริมาตรของน้ำซีเมนต์ประมาณ 25% โดยแยกออกเป็นปริมาตรของปูนซีเมนต์ประมาณ 10% และ น้ำ 15% ปริมาตรของวัสดุผสม มีประมาณ 70% นอกนั้นเป็นปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง รายละเอียดเกี่ยวกับปริมาตรของวัสดุผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 ปริมาตรของส่วนประกอบของส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไป

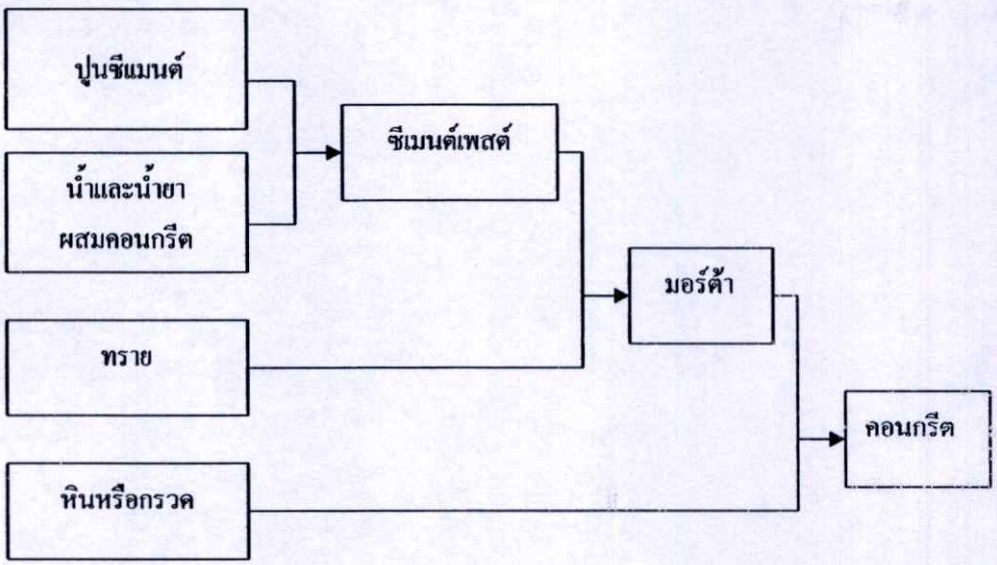
ส่วนประกอบคอนกรีต	(%)
อากาศ	5
น้ำ	15
ซีเมนต์	10
วัสดุผสม	70

ที่มา : วินิต (2539)

2.2.1 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 2.2

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)
- ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)
- มอร์ต้าผสมกับหินกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)



รูปที่ 2.2 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต

หน้าที่และคุณสมบัติองค์ประกอบของคอนกรีต

1) ซีเมนต์เพสต์ หน้าที่คือ เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ คุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) ผงสี (ถ้ามี) เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผงสี สีซีเมนต์ (ถ้ามี) เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีซีเมนต์มาตรฐานเลขที่ มอก. 469

3) มวลรวม หมายถึง มวลรวมที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น หิน กรวด และทรายต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นชนิดที่ผ่านการย่อยมาแล้วหรือไม่ก็ได้ ใช้สำหรับงานผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไปที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมาตรฐานเลขที่ มอก. 566

4) น้ำ น้ำที่ใช้ต้องเป็นน้ำสะอาด หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมี 3 ประการ คือ ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่าง ๆ ใช้ผสมทำคอนกรีต ใช้บ่มคอนกรีต ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ อีกทั้งยังช่วยเคลือบหินและทรายให้เปียกทำให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

5) น้ำยาผสมคอนกรีต หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทั้งคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่าง ๆ เช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถเทได้ กำลังรับแรงอัด ความทนทาน เป็นต้น

2.2.2 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

คอนกรีตมวลเบา เป็นคอนกรีตที่นิยมในต่างประเทศมาเป็นเวลานาน ซึ่งนำไปใช้ในการก่อสร้าง ตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน จนถึงใช้เป็นชิ้นส่วนก่อสร้าง เช่น พื้น เสา คาน รากฐาน และผนังอาคาร เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานโครงสร้างที่สำคัญคือ ลดน้ำหนักของอาคาร ส่งผลให้เป็นการประหยัดต้นทุนการก่อสร้าง คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้คือ (ประเสริฐ, 2542)

1) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา คอนกรีตประเภทนี้เป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสมแทนมวลรวมธรรมดาสามารถแบ่งชนิดของมวลรวมได้เป็น 4 ชนิด คือ

(1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หิน, Vermiculite, Perlite, Pumice และ Scoria ซึ่งเป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ เกิดขึ้นเมื่อมีภูเขาไฟระเบิด มวลรวมชนิดนี้ใช้สำหรับผสมคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงมาก และมวลรวมก็มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำสูง

(2) มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ ดินเหนียวผสมสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ (Expanded Clay Aggregate) และดินดานผสมถ่านที่บดละเอียดแล้ว (Expanded Shale Aggregate) ดินเหนียวผสมสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศ (Expanded Clay Aggregate) เป็นการนาเอาดินเหนียวมาผสมกับสารก่อฟองอากาศแล้วนำไปเผาในหม้อดินที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ จะมีการขยายตัวของของดินเหนียว เนื่องจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ภายในและเกิดเป็นฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อดิน เมื่อผ่านการเผาแล้ว ดินจะมีความแข็ง ผิวเรียบแน่น แต่มีเนื้อภายในเป็นโพรงอากาศ สำหรับดินดานผสมถ่านที่บดละเอียดแล้ว (Expanded Shale Aggregate) เป็นการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส วัตถุดิบจะถูกหลอมรวมกัน และจะมีฟองอากาศถูกกักเก็บไว้ภายในเนื้อดิน ลักษณะของดินที่ได้จะมีความแข็งมากหลังจากการเผาก็จะนำไปย่อยให้ได้ขนาดตามต้องการ มวลรวมเบาทั้งสองชนิดนี้จะมีความแข็งแกร่งค่อนข้างดี และเป็นมวลรวมที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตมวลเบามากที่สุด

(3) มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ การใช้ไม้บางชนิดใส่ผสมเข้ากับเนื้อคอนกรีต

(4) มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าหนัก (Furnace Bottom Ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2) โฟมคอนกรีต (Aerated or Foam Concrete) คอนกรีตประเภทนี้ เป็นคอนกรีตที่ได้จากการทำให้เกิดฟองอากาศ หรือที่เรียกว่า "โฟม" ขนาด 0.1 ถึง 1.0 มิลลิเมตร ในเนื้อคอนกรีต วิธีการผสมคอนกรีตให้มีความพรุนมี 2 วิธี วิธีแรกเป็นวิธีทางเคมี โดยใช้ผลของการทำปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่ยังมีสภาพ Plastic และวิธีที่สองเป็นการทำให้เกิดฟองอากาศ (Foaming Agent) แล้วผสมลงในส่วนผสมคอนกรีตเนื่องจากคอนกรีตมีความพรุน มีโพรงที่เกิดจากการแทรกตัวของฟองอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง มีน้ำหนักเบา หน่วยน้ำหนักประมาณ 200 ถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทั่วไปคอนกรีตประเภทนี้ นิยมนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้คอนกรีตมีความพรุนยังมีคุณสมบัติหลายอย่างคล้ายไม้ เช่น สามารถเลื่อยได้ ตอกตะปูได้ สามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยกาว

3) คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-Finess Concrete) คอนกรีตประเภทนี้ เป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดอยู่ในส่วนผสม ส่วนผสมหลักจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ การยึดเกาะติดกันระหว่างมวลรวมหยาบ เกิดจากผิวที่ถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพสต์หนาประมาณ 1 ถึง 3 มิลลิเมตร เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะเกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบนั้น และทำให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลง หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตประเภทนี้ประมาณ 1,600 ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมที่ใช้ได้แก่ กรวดโม่ หินโม่ เป็นต้น ขนาดของมวลรวมควรมีขนาดเท่าๆ กัน ขนาดที่ใช้อยู่ในช่วง 9.5 ถึง 20.0 มิลลิเมตร มีกำลังต้านทานแรงอัด 60 ถึง 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตประเภทนี้ ขึ้นอยู่กับมวลรวมที่ใช้ และปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยทั่วไปส่วนผสมที่ใช้จะประมาณ 1:8 โดยปริมาตร และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ประมาณ 0.4 (ประเสริฐ, 2542)

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาตามลักษณะการนำไปใช้งาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามการนำไปใช้งาน

ประเภท	กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)
คอนกรีตเบาสำหรับงานโครงสร้าง	180-480	1,400-1,800
คอนกรีตสำหรับงานก่อ	100-180	500-800
คอนกรีตสำหรับงานฉนวนความร้อน	10-100	น้อยกว่า 800

ที่มา : ประเสริฐ (2542)

คุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบามีดังนี้

1) ความแข็งแรง ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตเบาจะมีค่าประมาณ 10 ถึง 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับโครงสร้าง ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 100 ถึง 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาทั่วไปอาจทำให้สูงขึ้น โดยการใช้ทรายธรรมชาติแทนมวลรวมน้ำหนักเบา แต่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า

2) ความคงทนคอนกรีตเบาโดยทั่วไป ไม่สามารถทนการกัดกร่อนจากสารเคมี ความเค้นทางกายภาพและการกระทบกระแทกเนื่องจากแรงภายนอก เนื่องจากคอนกรีตเบามีโพรงอากาศอยู่ภายใน ดังนั้น คอนกรีตเบาจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพที่มีสารจำพวกซัลเฟตเจือปนอยู่หรือในสภาพดินชื้น ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

3) การหดตัวเมื่อแห้ง คอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมน้ำหนักเบา โดยทั่วไปพบว่ามีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดา สำหรับคอนกรีตพรุนจะมีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมมีน้ำหนักเบา 5 ถึง 10 เท่า

4) การนำความร้อน คอนกรีตมวลเบาเป็นตัวนำความร้อนที่เลว เนื่องจากในเนื้อคอนกรีตมีโพรงอากาศมาก ทำให้คอนกรีตมวลเบาดูดซึมความร้อนได้ไม่ดี

5) หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 300 – 1,800 กก./ลบ.ม. กำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ประมาณ 10 – 480 กก./ตร.ซม.

6) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับคอนกรีตปกติ จนถึงสูงกว่าปกติถึง 70%

7) ในปริมาณความสามารถเทได้เท่ากัน คอนกรีตมวลรวมเบานั้นจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป

8) ค่า Modulus of Elasticity ต่ำ

9) ความสามารถทนไฟได้ดี กำลังรับแรงดึงมากกว่าคอนกรีตปกติ

10) กำลังและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตต่ำ

ข้อควรระวังของคอนกรีตมวลเบาในการใช้งานประกอบด้วย

1) การแยกตัว ถ้าส่วนผสมมีค่ายุบตัวมากหรือมีการจี้เขย่ามากเกินไป คอนกรีตจะเกิดการแยกตัว มวลรวมจะลอยตัวสู่ผิวหน้าคอนกรีต การแต่งผิวทำได้ยาก

2) การดูดซึมน้ำของมวลรวมจะมาก ดังนั้นในการออกแบบสัดส่วนส่วนผสมต้องนำปัจจัยนี้มาพิจารณา รวมทั้งกำหนดวิธีการผสม

3) การผสมต้องผสมให้ถูกวิธีใช้เวลาผสมที่นานเกินไป อาจทำให้มวลรวมเบาแตก

4) ความทนทานในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2.3 คอนกรีตบล็อก (Hollow Concrete Block or Concrete Masonry Unit)

คอนกรีตบล็อก หมายถึง ก้อนคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับมวลรวมที่มีขนาดพอดี เช่น ทราย กรวดเม็ดเล็ก หินย่อยผสมกับน้ำและจะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ คอนกรีตบล็อกเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เหมาะสำหรับงานก่อผนังหรือกำแพง มีรูหรือโพรงขนาดใหญ่ทะลุตลอดก้อน และมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวด้านยาวของคอนกรีต น้อยกว่าร้อยละ 75% ของพื้นที่หน้าตัดรวมที่ระนาบเดียวกัน มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดรายละเอียดคอนกรีตบล็อกแต่ละชนิดไว้ดังนี้

1) คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (Hollow Load-Bearing Concrete Masonry Unit : มอก. 57-2533) หมายถึง คอนกรีตบล็อกที่ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักตัวเอง

2) คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit : มอก. 58-2530) หมายถึง คอนกรีตบล็อกที่ใช้สำหรับผนังที่ไม่ต้องรับน้ำหนัก โดยใช้ก่อเป็นผนังหรือกำแพงที่มีโครงสร้างรับน้ำหนักอยู่แล้ว

3) คอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก (Solid Load-Bearing Concrete Masonry Unit : มอก. 60-2516) หมายถึง คอนกรีตบล็อกเชิงตัน ที่ทำจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้ำและวัสดุผสมที่เหมาะสมชนิดต่าง ๆ จะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ ใช้สำหรับก่อผนังหรือกำแพงที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักของตัวเอง มิติทางความสูงจะต้องไม่เกินมิติทางความยาว จะตันหรือมีรูโพรงทะลุตลอดก้อนก็ได้ แต่พื้นที่ตัดขวางสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวด้านยาวของคอนกรีต จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่ภาคตัดขวางรวมที่ระนาบเดียวกัน

คอนกรีตบล็อกทั้ง 3 ชนิด แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ คอนกรีตบล็อกประเภทควบคุมความชื้นและคอนกรีตบล็อกประเภทไม่ควบคุมความชื้น คอนกรีตบล็อกแต่ละประเภทยังแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

ชั้นคุณภาพ ก ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือระดับดิน โดยไม่มีการป้องกันผิวแต่อย่างใด เช่น ใช้ในกรณีซึ่งการรั่วซึมจากน้ำใต้ดินหรือฝน ไม่ทำความเสียหายต่องานนั้น

ชั้นคุณภาพ ข ใช้สำหรับกำแพงภายนอกทั้งต่ำกว่าและเหนือน้ำระดับดิน แต่มีการป้องกันผิว

ชั้นคุณภาพ ค ใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงภายในและกำแพงภายนอกเหนือระดับดิน ที่มีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากดินฟ้าอากาศ

คอนกรีตบล็อกที่ดีและเป็นที่ต้องการ ควรมีคุณลักษณะ ดังนี้

1) คอนกรีตบล็อกทุกก้อนต้องแข็งแรงคงทน ปราศจากรอยแตกร้าวหรือส่วนเสียอื่นใดอันเป็นอุปสรรคต่อการก่อคอนกรีตบล็อกอย่างถูกต้อง

2) คอนกรีตบล็อก ซึ่งต้องฉาบปูนหรือแต่งปูน ต้องมีผิวหน้าหยาบพอควรแก่การจับยึดของปูนฉาบหรือปูนแต่งได้อย่างดี

3) คอนกรีตบล็อก ซึ่งต้องการก่อแบบผิวเผย ด้านผิวเผยจะต้องไม่บิ่น รอยร้าว หรือตำหนิอื่นๆ

คอนกรีตบล็อกที่มีในท้องตลาดปัจจุบันเป็นคอนกรีตบล็อกประเภทไม่ควบคุมความชื้นที่ผลิตขึ้นโดยไม่คำนึงถึงคุณสมบัติที่ได้มาตรฐาน การผลิตส่วนใหญ่เป็นการผลิตแบบง่าย ๆ ไม่มีการควบคุมความชื้นและความแข็งแรงในการรับแรงอัด เหมาะสำหรับงานก่อผนังหรือกำแพงที่ไม่รับน้ำหนักและไม่ต้องการความสวยงาม

2.2.4 การบ่มคอนกรีต (อรุณ, 2541)

2.2.4.1 ความหมายของการบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

2.2.4.2 หน้าที่ของการบ่มคอนกรีต

1) ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต

2) รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

3) ป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมและลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

2.2.4.3 กรรมวิธีการบ่ม มีกรรมวิธีการบ่มหลักๆ อยู่ 3 วิธีดังนี้

1) การรักษาผิวหน้าของคอนกรีตให้คงความชื้นเอาไว้ โดย 4 วิธีได้แก่

(1) การบ่มด้วยน้ำ การขังน้ำ (ฉีดหรือพ่นน้ำหรือใช้วัสดุเปียกคลุม) ถ้ามีการดำเนินการที่ดีจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด วิธีนี้เหมาะสมกับงานบางชนิด เช่น พื้น เป็นต้น

(2) การขังน้ำ วิธีนี้เหมาะกับงานคอนกรีตที่มีพื้นผิวที่ราบ เช่น ผิวทาง ทางเดิน หรือพื้นอาคาร สามารถทำได้โดยใช้ดินหรือทรายมากั้นเป็นขอบรอบผิวคอนกรีตเพื่อขังน้ำไว้ภายในบริเวณที่ต้องการ สามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้ต้องการแรงงานและการควบคุมค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยสะดวกในทางปฏิบัตินอกจากงานเล็กๆ

(3) การฉีดหรือพ่นน้ำ การฉีดน้ำอย่างต่อเนื่องก็เป็นวิธีที่ดีมากอีกวิธีหนึ่ง แต่ถ้าเป็นการฉีดแบบเป็นช่วงๆ จะต้องเพิ่มความระมัดระวังเพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตแห้งในช่วงที่หยุดฉีดน้ำ การฉีดน้ำอย่างต่อเนื่องผ่านระบบของหัวฉีดที่พ่นกระจายจะทำให้คงความชื้นให้กับ

คอนกรีตอยู่ตลอดเวลา วิธีนี้จะช่วยป้องกันการเกิด "Cracking" หรือการแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากวงจรของความชื้น (คือ เปียกและแห้งสลับกันไป) ข้อเสียของวิธีนี้คือ ราคาที่ค่อนข้างสูง นอกจากนั้นวิธีนี้ยังต้องการแหล่งป้อนน้ำที่พอเพียงและการควบคุมที่ได้

(4) การคลุมด้วยวัสดุที่เปียก การคลุมผิวด้วยวัสดุที่เปียกก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมทำกัน อาจเป็นการคลุมด้วยทรายเปียกหรือเส้นใยหรือผ้าเปียกก็ได้ การปกคลุมผิวนี้จะต้องทำทันทีที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวพอเพียงเพื่อป้องกันพื้นผิวเสียหาย จะต้องระมัดระวังให้มีการปกคลุมพื้นผิวให้ทั่วทั้งหมด รวมทั้งขอบหรือมุมต่างๆ เช่น ขอบถนนหรือทางเท้า การปกคลุมนี้จะต้องกระทำอย่างต่อเนื่องโดยที่จะต้องให้แผ่นฟิล์มบางๆของน้ำอยู่ที่ผิวคอนกรีตตลอดเวลาที่กระทำการบ่มอยู่

2) การป้องกันคอนกรีตสูญเสียความชื้น การปกคลุมผิวด้วยแผ่นพลาสติกหรือโดยทิ้งแบบหล่อค้างไว้

(1) การใช้แผ่นพลาสติกคลุมหรือการใช้แบบหล่อ วิธีการนี้อาจมีประสิทธิภาพน้อยกว่าวิธีแรกแต่ก็เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปยกเว้นงานที่มีความพิเศษมากจริงๆ ข้อได้เปรียบของวิธีนี้ก็คือ สามารถใช้ได้ทั้งกับพื้นผิวที่อยู่ในแนวราบและแนวดิ่งแผ่นพลาสติก วิธีการที่ง่ายและได้ผลในการรักษาความชื้นของคอนกรีต ก็คือการคลุมด้วยแผ่นพลาสติกที่มีความหนา 125 ไมครอน (เบอร์ 500) แผ่นพลาสติกใช้งานและเก็บรักษาได้ง่ายและใช้ได้หลายครั้งสำหรับงานอื่นๆ

(2) การใช้แผ่นพลาสติก จะต้องทำการคลุมแผ่นพลาสติกในทันทีที่สามารถทำได้ สำหรับพื้นผิวในแนวดิ่งควรคลุมภายในครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมงภายหลังจากถอดแบบออกแล้ว สำหรับพื้นอาคารให้รีบคลุมทันทีที่คอนกรีตแข็งพอที่จะไม่เป็นรอยหรือเสียหาย อาจรอให้คราบน้ำระเหยออกไปแต่ไม่นานเกินไปจนกระทั่งคอนกรีตเริ่มแข็ง ถ้าพื้นผิวของคอนกรีตมีการทำผิวเป็นพิเศษ เช่น ทำลวดลายหรือขัดร่อง ควรคลุมแผ่นพลาสติกเหนือโครงสร้างเบาเหนือผิวคอนกรีตโดยไม่ต้องรอให้คราบน้ำระเหยไปก่อน ให้คลุมทันทีที่ทำผิวเสร็จ ในกรณีที่ต้องใช้แผ่นพลาสติกมากกว่าหนึ่งแผ่น ควรมีระยะทาบไม่ต่ำกว่า 300 มิลลิเมตร และยึดกันให้แน่น

(3) การใช้แบบหล่อเป็นตัวช่วย แบบหล่อเป็นตัวช่วยไม่ให้คอนกรีตสูญเสียความชื้น แต่การใช้วิธีนี้ควรจะต้องมีการบ่มด้วยวิธีอื่นต่อหลังจากการถอดแบบคอนกรีตที่เปลือยผิวจะต้องถูกบ่มจนได้อายุภายหลังจากถอดแบบแล้วแม้จะใช้แบบหล่อเป็นตัวป้องกันมาระยะหนึ่งแล้วก็ตาม แต่ถ้าอยู่ในสภาวะอากาศที่ไม่รุนแรงและรักษาคอนกรีตให้อยู่ในแบบเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 4 วัน อาจไม่จำเป็นต้องบ่มไปอีกก็ได้ ถ้าคอนกรีตอยู่ในแบบหล่อไม่ถึง 4 วัน (กรณีคอนกรีตเปลือย) และถูกออกแบบผิวมาให้มีสีสม่ำเสมอเหมือนกันเช่น เสาที่เรียงกันเป็นแถวหรือกำแพงยาว จะต้องมีการบ่มอย่างต่อเนื่องจนเสร็จขั้นตอนการบ่ม

3) การฉีดหรือทาผิวด้วยสารเคมี

(1) การใช้สารเคมี วิธีนี้อาจมีประสิทธิภาพน้อยกว่าวิธีที่ 1 แต่มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีอื่นๆ คือเมื่อใช้สารเคมีแล้วจะไม่ต้องทำการควบคุมดูแลอีก

(2) การพ่นสารเคมี ใช้สารเคมีพ่นที่ผิวของคอนกรีตโดยอุปกรณ์ที่ใช้พ่นอาจเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ฉีดสารเคมีในการเกษตร ซึ่งจะสามารถพ่นได้ทั้งแนวดิ่งและแนวระดับ จะต้องเลือกใช้สารเคมีที่ถูกต้องเหมาะสม โดยทั่วไปสารเคมีเป็นเรซินในสารละลายซึ่งจะระเหยไปภายหลังจากการที่ทำการฉีดแล้ว และจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆ คลุมทั่วพื้นผิวซึ่งจะป้องกันความชื้นออกไปสู่ภายนอกได้เกือบหมด แผ่นฟิล์มนี้จะลอกออก (หลังจากตากแดด - ลม) เป็นเวลา 4 สัปดาห์ สารเคมีที่นำมาใช้กันโดยทั่วไปมีอยู่ 2 เกรด คือ เกรดมาตรฐานซึ่งมีประสิทธิภาพในการบ่มประมาณ 75% และแบบเกรดสูงซึ่งมีประสิทธิภาพ 90% ทั้งสองชนิดจะมี สี 2 ลักษณะ คือ สีขาวหรือสีเงิน และสีย้อม สีขาวหรือสีเงินเหมาะสำหรับภายนอกเนื่องจากมันจะสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งจะทำให้คอนกรีตไม่ร้อน สำหรับสีย้อมจะมีข้อดี คือ ทำให้สามารถตรวจสอบได้ง่ายว่าได้พ่นสีทั่วถึงแล้วหรือไม่ โดยที่สีจะแห้งไปอย่างรวดเร็วและไม่ทิ้งรอยด่างไว้ (แต่ต้องไม่ฉีดลงบนพื้นผิวที่แห้ง)

(3) เวลาที่เหมาะสมที่จะพ่นสารเคมี จะต้องไม่พ่นสารเคมีลงบนพื้นผิวที่แห้งแล้ว เพราะมันจะดูดซึมสารเคมีเข้าไปและจะทำให้เกิดเป็นรอยด่างหรือทำให้สีเดิมของคอนกรีตเปลี่ยนไปและข้อสำคัญอีกประการก็คือ การที่ผิวแห้งแสดงว่ามันสายเกินไปที่จะทำการบ่ม สำหรับพื้นผิวในแนวดิ่งให้พ่นสารเคมี (เกรดอะไรก็ตาม) ทันทีที่ถอดแบบออกถ้าผิวเริ่มแห้งให้ทำให้เปียกด้วยน้ำสะอาดและพ่นสารเคมีในขณะที่ยังเปียกชื้นอยู่ สำหรับพื้นอาคารให้ฉีดสารเคมีลงไปทันทีที่เห็นว่าน้ำระเหยออกไปจากผิวหมด

2.3 ปูนซีเมนต์ (วินิต, 2539)

ปูนซีเมนต์ หมายถึง สารประกอบชนิดหนึ่งซึ่งเมื่อได้ผสมกับน้ำตามสัดส่วนแล้วทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะแข็งตัว โดยมีความสำคัญอย่างมากในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเนื่องจากเมื่อผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วจะมีคุณสมบัติที่ดีในการยึดหน่วงองค์ประกอบและส่วนต่าง ๆ ของอนุภาคที่เป็นของแข็งได้

2.3.1 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ในปัจจุบันทำจากวัตถุดิบที่มีธาตุอลูมินา ซิลิกา ซึ่งได้แก่ ดินดำ ดินขาว และศิลาแลง ที่มีธาตุเหล็กมาผสมกัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยส่วนผสมแบ่งแยกได้ดังนี้

- Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- Argillaceous Material ได้แก่ ซิลิกา อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale)
- Iron Oxide Material ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือศิลาแลง

ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536.)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผาปฏิกิริยาจะเกิดขั้นตอนดังนี้ (ศรานุช และสุเทพ, 2538)

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพองเหลือไว้เพียงแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์จาก หินปูน ดินสอพองกับซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียวและดินดาน

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยกระบวนการ ตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3, ซึ่งรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , และ P_2O_5 และยิปซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.6 และออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างดังแสดงในตารางที่ 2.7 คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.6 ปริมาณค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์		ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60-67
	SiO_2	17-25
	Al_2O_3	3-8
	Fe_2O_3	0.5-6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.1-5.5
	Na_2O	0.5-1.3
	TiO_2	0.1-0.4
	P_2O_5	0.1-0.2
	SO_3	1-3

ที่มา : ศรานุช และสุเทพ (2538)

ตารางที่ 2.7 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ

105137

ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3 CaO , SiO_2	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2 CaO , SiO_2	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3 CaO , Fe_2O_3	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4 CaO , Al_2O_3, Fe_2O_3	C_4AF

ที่มา : ชัชวาล (2536)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 จูล/กรัม)	น้อย (250 จูล/กรัม)	สูงมาก (850 จูล/กรัม)	ปานกลาง (420 จูล/กรัม)
คุณสมบัติอื่น ๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ที่มา : ชัชวาล (2536)

สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะ

ก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ขึ้นกับปริมาณยิปซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณ 35-55 เปอร์เซ็นต์

2) ไดแคลเซียมซิลเกต (C_2S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบมีเพียง C_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป C_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 เปอร์เซ็นต์

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้อง Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงไปในระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในประมาณ 7- 15 เปอร์เซ็นต์

4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์

5) ยิปซัม ($CaSO_4 , 2H_2O$) ถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ดเพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะเพื่อให้ซีเมนต์เกิดกำลังที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ อัลคาไลน์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O ปริมาณ C_3A ความละเอียดของปูนซีเมนต์

6) Free Lime (CaO) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด หรืออาจเกิดจาก ปริมาณ Lime มีไม่มากจึงเข้าปฏิกิริยากับออกไซด์ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์ ผลเสียของ Free Lime คือจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้หรือเรียกว่าซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

7) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะให้ MgO และก๊าซ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือน Free Lime คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัวโดยการขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์และขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมาก ๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วโดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

8) อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O) อัลคาไลน์ออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยา

จะก่อให้เกิดการขยายตัวดันคอนกรีตแตกร้าวเสียหายยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์ต่ำ

2.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์

โดยทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cament) เป็นปูนที่ผลิตใช้มากที่สุดเหมาะสำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าคอนกรีตธรรมดา หรือที่ซึ่งได้รับอันตรายจากซัลเฟตพิเศษ ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราช้าง และ ตราเพชร เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ให้กำลังอัดเร็ว (High-Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ ให้กำลังสูงในระยะแรกเพราะมีเนื้อละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับใช้ในงานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราเพชร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-heat Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัวตามมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกา ASTM C 105-84 และมาตรฐานอังกฤษ BS 1370:1979 ได้กำหนดความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อายุ 7 วัน ไม่เกิน 250 จูล/กรัม (60 แคลลอรี/กรัม) และ 290 จูล/กรัม (70 แคลลอรี/กรัม) ที่อายุ 28 วัน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ต่ำ เพื่อลดการทำละลายเนื้อคอนกรีตซึ่งเกิดจากซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดช้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราฉลาม

2.3.3 การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ (ชัชวาล, 2536.)

ปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยคุณสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้นเพสต์จะเริ่มแข็งตัวถึงแม้ว่ามันจะยังนิ่งอยู่แต่ไม่สามารถเลื่อนไหลเข้าแบบได้แล้วจุดนี้เรียกว่า "จุดแข็งตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมน้ำกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้นเรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง

หรือ "จุดแข็งตัวสุดท้าย" (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า "เวลาการก่อตัวสุดท้าย" (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่า "การแข็งตัว" (Hardening)

2.3.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ (ชัชวาล, 2536)

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลายและ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า Solid State Reaction

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

2.3.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และสมการการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 2.1 และ2.2

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

หรือ $2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

หรือ $2C_3S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือ pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.3.4.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O \qquad (2.3)$$

หรือ $C_3A + 6H_2O \longrightarrow 3C_3AH_6$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ดังสมการที่ 2.4

$$C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O \cdot 26H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \qquad (2.4)$$

$$C_3A + 3CSH_2 + 26H \longrightarrow C_6A \cdot OS_3.32H \qquad \text{(Ettringite)}$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดใหม่ช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการที่ 2.5

$$4\,CaO \cdot Al_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO(Al_2O_3) \cdot 3CaSO_4 \qquad (2.5)$$

เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80 % ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%

สารประกอบ	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

ที่มา : ชัชวาล (2536)

2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period คือ ช่วงที่ซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพเหลว อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรกและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มาก ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา

3) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์

4) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยจะลดและเพิ่มตามลำดับ

2.4 มวลรวมหรือวัสดุผสมคอนกรีต

มวลรวมหรือวัสดุผสมคอนกรีต (Aggregates) คือ วัสดุเฉื่อย ได้แก่ ทราย หิน กรวด ที่เป็นส่วนผสมสำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70 -80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นเทได้ง่าย แข็งแรง ทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้มวลรวมควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1. ค่าความแข็งแกร่ง (Strength) มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือ จะรับแรงกดได้ 700 – 3500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์ ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทมวลรวมที่ใช้

2. ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance) ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และแรงเสียดสีของมวลรวมมักใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม

3. รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface) รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด มากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัวแล้ว มวลรวมที่ผิวหยาบ หรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยม

2.4.1 ทราย (Sand)

ทรายเป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่ง สำหรับส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจัดไว้ในประเภทมวลละเอียด (Fine Aggregate) เพื่อความแข็งแรงและเป็นตัวแทรกของคอนกรีต ทรายจะมีขนาดไม่โตกว่า 4.75 มิลลิลิตร และจะไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิลิตร สำหรับมาตรฐานทั่วไป ถ้าทรายมีขนาดเล็กกว่านี้จะกลายเป็นฝุ่น เมื่อผสมกับน้ำจะมีลักษณะคล้ายโคลน ทรายที่มีขนาดเล็กมากไม่นิยมนำมาเป็นวัสดุผสมคอนกรีต เนื่องจากว่าเมื่อเกิดการหดตัวขึ้นอาจทำให้คอนกรีตเป็นรอยแตกร้าวได้ (ชัชวาล, 2536)

ประโยชน์ของทรายที่นำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีต

1) ทรายเป็นเสมือนหินแข็งเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งสามารถแทรกตัวไปในส่วนผสมต่าง ๆ โดยการเคลือบคลุมและยึดประสานด้วยซีเมนต์ ซึ่งหินจะไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปได้ ส่วนผสมของคอนกรีต ถ้าขาดทรายช่องว่างจะเกิดขึ้น อันเป็นเหตุให้ความแข็งแรงและยึดเหนี่ยวต่ำ

2) ทรายต้านทานการยึดหดได้ดี เป็นตัวช่วยลดการแตกร้าวของคอนกรีตขณะที่คอนกรีตเกิดการขยายตัวหรือหดตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ทรายเป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งสามารถช่วยถ่ายเทความร้อนและเฉลี่ยแรงยึดหดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกได้เป็นอย่างดี

3) ทรายจะก่อให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นได้ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปช่วยให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวได้เร็วขึ้น

4) ทรายช่วยเพิ่มปริมาณของส่วนผสม ซึ่งทรายมีราคาถูกกว่าวัสดุอื่น ๆ หาง่ายและแข็งแรงดีมาก ทั้งยังเป็นตัวช่วยยึดจับซีเมนต์ได้ดีอีกด้วย

2.4.2 หินฝุ่น

หินฝุ่น คือ หินที่มีขนาดตั้งแต่ 3/16 นิ้ว (4.75 มิลลิลิตร) ลงมา หรือหินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ลงมาจนกระทั่งส่วนที่เป็นฝุ่นคือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หินฝุ่นเป็นวัสดุก่อสร้างโดยนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมใช้ทำคอนกรีตบล็อก แต่ยังไม่มีการนำหินฝุ่นมาใช้ในการผสมคอนกรีตในลักษณะของมวลรวมละเอียด เพราะมีราคาสูงกว่าทราย (ชัชวาล, 2536)

2.4.3 สารผสมเพิ่ม (Admixtures) (ชัชวาล, 2536)

สารผสมเพิ่ม (Admixture) คือ สารหรือวัสดุใด ๆ ที่นอกเหนือจากน้ำ, มวลรวม และไฮดรอลิกซีเมนต์ที่ใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตหรือมอร์ต้า ไม่ว่าจะก่อนหรือขณะทำการผสม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงคุณภาพ และประสิทธิภาพของคอนกรีตตามความต้องการใช้งาน เช่น ปรับปรุงความสามารถเทได้ เร่งหรือหน่วงการก่อตัว ควบคุมหรือดัดแปลง

การพัฒนากำลังทำให้มีความดูดซึมน้ำ ทนต่อสภาพกรดด่างและสารเคมี หรือช่วยลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นต้น

ประเภทของสารผสมเพิ่ม

จากนิยามของวัสดุผสมเพิ่มข้างต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุหรือสารที่จะมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มมีขอบเขตที่กว้าง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา จึงจำแนกประเภทของวัสดุผสมเพิ่มตามลักษณะดังนี้

สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining) ใช้ผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการขยายตัวของน้ำจากสภาพของเหลวเป็นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งที่เรียกว่า Frost Resistance ของคอนกรีตเป็นหลัก

สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture) คือ สารเคมีที่อยู่ในรูปสารละลายของน้ำ ใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อควบคุมการก่อตัว การแข็งตัวคอนกรีตสด หรือลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นต้น

สารแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) คือแร่ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของแข็งบดละเอียด ใช้ผสมรวมกับคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถเทได้และความทนทาน ลดความร้อนและปริมาณการใช้ซีเมนต์ เป็นต้น วัสดุแร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทนี้ ได้แก่ เถ้าถลุงเหล็ก (Slag) และสารปอซโซลาน (Pozzolan) ต่าง ๆ

สารผสมเพิ่มอื่น ๆ (Miscellaneous Admixture) ได้แก่ วัสดุผสมเพิ่มอื่นที่ไม่ได้จัดอยู่ในประเภทข้างต้น เช่น Polymer Latexes ใช้ปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต และ Damp Proving Admixture สำหรับป้องกันการซึมผ่านของน้ำสู่คอนกรีต เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากแนวความคิดในการเอาเศษโฟม Polystyrene Paper (PSP) เหลือใช้หรือที่ผ่านการใช้งานจากโรงงานอุตสาหกรรมแล้วบางประเภทมาใช้ใหม่โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกนี้เป็นแนวคิดที่จะลดการเกิดของเสียจากโฟม ซึ่งปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจในการศึกษาการผลิตคอนกรีตแนวนี้มาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่รวบรวมมาเสนอนี้เกี่ยวกับ คอนกรีตที่มีการผสมวัสดุต่าง ๆ

1) คอนกรีตที่ใช้โฟมเป็นวัสดุทดแทน

สมคิด และคณะ (2537) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องคอนกรีตผสมโฟม โดยใช้โฟมเม็ดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1.0 เซนติเมตร เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมแทนหิน และเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีต ปูน 1 : ทราย 2 : หิน 3 ซึ่งผลการศึกษาทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก

1,550 ถึง 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด 153.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และในขั้นตอนของการผลิตคอนกรีตผสมโฟมยังพบว่า ถ้าคอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวมากไป และมีการเขย่าหรือกระทุ้งคอนกรีตขณะทำการผสมมากเกินไป จะทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวได้ โดยโฟมจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต สำหรับความเป็นไปได้ของการนำไปใช้งานสำหรับคอนกรีตผสมโฟม เหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำผนังสำเร็จรูป เพื่อช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง

ปิยะพงศ์ และสิทธิโชค (2539) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องคอนกรีตเบา โดยการทดสอบคุณสมบัติการก่อตัว ความสามารถเทได้ ปริมาณอากาศ และกำลังต้านทานแรงอัด ของคอนกรีตเบาประเภท Foam Concrete โดยการเติมสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิด AEA-303 และออกแบบส่วนผสมที่กำลังรับแรงอัด 180, 210 และ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณอากาศที่ได้จากการใส่สารกักกระจายฟองอากาศ มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวลดลง 45 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถเทได้ดีขึ้น โดยมีค่าการยุบตัว 20 ถึง 23 เซนติเมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัด 90 ถึง 130 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำให้สามารถนำคอนกรีตไปใช้กับงานที่มีขนาดแบบหล่อแคบได้ อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบยังพบว่า ยิ่งทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าลดลง คอนกรีตก็จะมีน้ำหนักเบาขึ้นแต่ความสามารถในการต้านทานแรงอัดก็จะลดลงด้วย

ธวัชชัย และคณะ (2541) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องคอนกรีตผสมโฟม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างคอนกรีตผสมโฟมกับคอนกรีตธรรมดาในด้านกำลังต้านทานแรงอัด หน่วยน้ำหนัก และคุณสมบัติการนำความร้อน โดยเลือกใช้โฟมเม็ดกลมขนาด 1/4 , 1/2 และ 1 นิ้ว แทนหินในปริมาณ 200 , 400 และ 585 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ผลจากการศึกษาทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1,185 ถึง 2,029 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 213.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมโฟมให้ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และจะยิ่งมีค่าดังกล่าวลดลงอีก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของโฟมมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมโฟมมีน้ำหนักเบาและป้องกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ผลจากการทดสอบยังพบว่า ในการใช้โฟมเป็นวัสดุในปริมาณที่เท่ากัน โฟมที่มีขนาดเล็กกว่าจะทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดดีกว่าโฟมที่มีขนาดใหญ่

ปีใหม่ และคณะ (2543) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องวัสดุผสมคอนกรีตและเศษโฟม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ ระหว่างคอนกรีตผสมโฟมกับคอนกรีตธรรมดา ในด้านกำลังรับแรงอัด หน่วยน้ำหนัก โดยปริมาตรโฟมที่แทนที่ร้อยละ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของเศษโฟมมากขึ้น ที่ร้อยละ 75 บ่มที่ 7 วัน กำลังรับแรงอัด 72.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าหน่วยน้ำหนัก 1317.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลัง

ต้านทานแรงดัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของเศษโฟมมากขึ้น ที่ร้อยละ 75 บ่มที่ 7 วัน กำลังต้านทานแรงดัด 28 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ชัยรัตน์ และคณะ (2544) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมคอนกรีตและเศษโฟม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติโดยปริมาตรโฟมที่แทนที่ร้อยละ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงจากการแทนที่ของเศษโฟมที่ร้อยละ 75 เหมาะสมนำมาทำผนัง มีกำลังรับแรงอัด บ่มที่ 28 วัน 113.41 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และทดสอบอัตราการดูดซึมความชื้นและกำลังรับแรงกระแทก พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากศึกษาแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเศษโฟมสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนต่าง ๆ ได้

เขตสยาม และคณะ (2545) ได้เสนอผลการศึกษาเรื่องคอนกรีตเบา โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ ระหว่างคอนกรีตเบาผสมโฟมกับคอนกรีตธรรมดา ในด้านกำลังรับแรงอัดหน่วยน้ำหนัก โดยเลือกใช้โฟมเม็ดกลมขนาด 3, 7 และ 10 มิลลิเมตร โดยคอนกรีตเบาผสมเม็ดโฟม มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา 6.8-16.5 เปอร์เซ็นต์ และ กำลังรับแรงอัดลดลง 14.8-47.7 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของเม็ดโฟม และการกระจายตัวของเม็ดโฟมในคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ทำให้กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักเปลี่ยนไป

Chen and Live (2005) ได้ศึกษาการใช้โพลิเมอร์ชนิด styrene-butadiene rubber (SBR) เป็นสารผสมเพิ่มใน expanded polystyrene (EPS) ในการทำคอนกรีตมวลเบา โดยทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการบ่ม และอัตราส่วนในการผสมสารโพลิเมอร์ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและความสามารถต้านทานแรงดัด ผลจากการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถต้านทานแรงดัดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่ที่การบ่มคอนกรีต การบ่มแบบเปียกและแบบแห้งสามารถทำให้เกิดความแข็งแรงของคอนกรีต expanded polystyrene (EPS) และคอนกรีตโพลิเมอร์ชนิด styrene-butadiene rubber (SBR) เป็นสารผสมเพิ่ม การใช้อัตราส่วนผสมที่ดีระหว่าง SBR กับ EPS จะช่วยปรับปรุงการยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์ในคอนกรีต กำลังรับแรงอัดและความสามารถต้านทานแรงดัดจะค่อย ๆ เพิ่มหลังจากผ่านไป 28 วัน

Liu *et al.* (2006) ได้ศึกษาการผสมโฟม PSPP ในคอนกรีตมวลเบา โดยทำการศึกษารายละเอียดของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้วัสดุผสมระหว่าง ดินและโฟม PSPP และวัสดุอื่นๆ เพื่อยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์ พบว่าผลที่ได้จากการผสม ดินและโฟม PSPP ซีเมนต์และดิน และน้ำกับดินในกรณีที่แทน PSPP 2-6 % ทำให้ความหนาแน่นของมวลคอนกรีตมีน้ำหนักคอนกรีตลดลงอยู่ช่วง 700-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แรงเฉือนของคอนกรีตมวลเบาที่ควบคุมโดยการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น รวมทั้งกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ถ้าใช้อัตราส่วน ซีเมนต์กับดิน 10 – 15% และเมื่อเปรียบเทียบ PSPP กับ ESP พบว่าสามารถใช้แทนโฟมชนิด ESP ได้

Laukaitis *et al.* (2005) ได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสเม็ดพอลิสไตรีนและคอนกรีตผสมโฟมพอลิสไตรีน พบว่าส่วนที่สัมผัสกันของวัสดุสองชนิดนี้มีความชิดกันมากโดย

ปราศจากการแตกหักหรือรอยแยก การติดแน่นของทั้ง 2 ชนิดนี้ ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดวัสดุที่ใช้ เมื่อเม็ดพอลิสไตรีนถูกทำให้ฉีก ก่อให้เกิดรูที่ชิดกันของโครงสร้างของเม็ดพอลิสไตรีนและบางอันจะแตกภายในโฟมซีเมนต์ โฟมซีเมนต์ในส่วนที่สัมผัสกันมีความแข็งแกร่งกว่าเม็ดพอลิสไตรีน

2. คอนกรีตที่ใช้วัสดุชนิดอื่นผสม ๆ

ณรงค์ (2539) ได้ศึกษาความเป็นได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ประเภทพลาสติกไฟเบอร์กลาสมาใช้ทดแทนมวลหยาบในการผลิตกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น โดยทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติเพื่อบ่งชี้ลักษณะต่างๆ ทางกลของไฟเบอร์กลาสและหิน ผลการศึกษาพบว่าการทดสอบค่าสึกกร่อนของมวลผสมตัวอย่างวัสดุหินและไฟเบอร์กลาสได้เท่ากับ 26.2% และ 6.0% ตามลำดับ การทดสอบค่าความคงตัวของตัวอย่างวัสดุหินไฟเบอร์กลาสกับโซเดียมซัลเฟตได้เท่ากับ 0.20% และ 0.013% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดอยู่ในเกณฑ์สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุมวลผสมได้ การทดสอบความต้านแรงดัดตามขวางในช่วงเวลาการบ่มน้ำ 7 วัน, 14 วัน และ 28 วันของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น ระหว่างไฟเบอร์ กลาสต่อหิน พบว่าอัตราส่วนผสมที่ 0/100 มีความต้านแรงดัดตามขวางมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสากรรม และอัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์คือ 0/100 ของช่วงเวลาที่ 14 วัน และ 28 วัน การทดสอบดูดซึมน้ำพบว่า อัตราส่วนที่ผ่านเกณฑ์คือ 0/100 จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุด และการทดสอบแรงอัด พบว่าอัตราส่วนที่ 20/80 จะมีเปอร์เซ็นต์การรับแรงอัดมากที่สุด

อิทธิพร (2540) ได้ศึกษานำเถ้าหนักมาใช้แทนที่มวลละเอียดในงานคอนกรีต โดยเถ้าหนักที่ใช้ศึกษาได้มาจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตสภาพสด และคุณสมบัติของคอนกรีตสภาพแข็งตัว ตัวแปรหลักประกอบด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ 300, 325 และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.50, 0.55 และ 0.60 และปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดของเถ้าหนักที่ 15%, 30% และ 45% โดยน้ำหนัก ผลจากการศึกษาพบว่า เถ้าหนักช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต และเพิ่มปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต ตามปริมาณเถ้าที่ผสมแทนที่มวลรวมละเอียดซึ่งอาจพิจารณานำไปใช้เป็นสารลดน้ำหรือสารเพิ่มปริมาณฟองอากาศในงานคอนกรีต โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเถ้าหนักมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ไม่ควรเกิน 30% โดยน้ำหนักและการนำเถ้าหนักมาใช้งานคอนกรีตถนน มีความเป็นไปได้โดยต้องมีการเพิ่มอายุการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น

สุวัฒน์ (2543) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในด้านกำลังและคงทน โดยแบ่งตามระดับกำลังเป็น 3 ระดับ คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.45, 0.65 และ 0.85 ซึ่งในแต่ละระดับ ค่ากำลังรับแรงอัดผันแปรกับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15, 30 และ 45 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีผลต่อกำลังอัด

คอนกรีตในทุกระดับกำลัง กล่าวคือปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันมีค่าลดลง โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 48 ถึง 91 ของคอนกรีตควบคุม และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าอยู่ระหว่าง 145,000 ถึง 284,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ขณะที่คอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 289,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับคุณสมบัติคอนกรีตผสมเถ้าลอยในด้านความคงทน โดยการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง พบว่าเถ้าลอยมีผลทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลงในทุกระดับกำลัง โดยการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าอยู่ระหว่าง 46 micro strain ถึง 350 micro strain ส่วนการขยายตัวเนื่องจากการแช่สารละลายซัลเฟตไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอย นอกจากนี้การทดสอบคาร์บอเนชันระหว่างคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยไม่มีความแตกต่างกันที่อายุทดสอบ 28 วัน ส่วนระดับกำลังมีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยระดับกำลังต่ำจะเกิดคาร์บอเนชันมากกว่าระดับสูง

เทอดศักดิ์ (2543) ได้ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมเส้นใย เส้นใยที่ใช้มีทั้งหมด 9 ชนิด คือ เส้นใยหิน, เส้นใยโพลีโพรพีลีน, เส้นใยด้าย, เส้นใยกระดาษลัง, เส้นใยกระดาษถ่ายเอกสาร, เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยปอแก้ว ทดลองนำมาผสมเพิ่มในซีเมนต์เพสต์ และเพิ่มขี้เถ้าแกลบในส่วนผสม 2 เส้นใยสุดท้าย เพื่อลดการย่อยสลายของเส้นใยเนื่องจากความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ ผลการศึกษาพบว่าความต้านทานแรงดัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้น จนถึงระดับปริมาณเส้นใยหนึ่งความต้านทานแรงดัดจะเพิ่มสูงสุดประมาณร้อยละ 23 ถึง 217 จากนั้นค่อย ๆ ลดต่ำลง ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้น และเมื่อนำมาพิจารณารวมกับราคาต้นทุนการผลิตของแต่ละเส้นใย ได้ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.00, 0.10, 1.00, 3.00, 4.50, และ 6.00 โดยปริมาตร จากนั้นทำการศึกษาต่อพบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 6 ถึง 16 โมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 6 ถึง 53 การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำจะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 12 ถึง 44 แต่กำลังรับแรงดึงโดยตรงเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 26 ถึง 50 และปริมาณความชื้นกับค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นประมาณร้อยละ 6 ถึง 53

อรุโนทัย (2545) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกากตะกรันที่ได้จากการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่หมดอายุเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก กากตะกรันถูกเตรียมขึ้น 2 ส่วน ขนาดใกล้หินฝุ่นและขนาดปูนซีเมนต์ การศึกษานี้ใช้อัตราส่วนผสมที่ ปูน: หิน: หินฝุ่น คือ 1:4.3:5 บ่มที่ 28, 60, และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของกากตะกรันแทนที่ในส่วนของหินฝุ่น 0-100% พบว่าที่ทุกอายุการบ่ม มีค่ากำลังอัดสูงกว่าของคอนกรีตบล็อกมาตรฐาน โดยก้อนตัวอย่าง ที่มีกากตะกรันแทนที่ 100% ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด อยู่ที่ 98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กรณีคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของกากตะกรันแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์ พบว่าที่ 20% และที่

หินฝุ่น 100% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าของก้อนมาตรฐานถึงกว่า 2 เท่า คือมีค่าอยู่ที่ 120, 146 และ 168 กก./ตร.ซม. ที่อายุบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

2) ทรายแม่น้ำ ขนาด 0.07 – 4.5 มิลลิเมตร

3) หินฝุ่น ขนาด 10 มิลลิเมตร

4) เศษโฟม PSP ขนาด 0.1 – 10.5 มิลลิเมตร

5) น้ำประปา

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์

1) เครื่องวัดขนาดชนิดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ มีความละเอียดในการวัดได้ถึง 0.05 มิลลิเมตร

2) ไม้บรรทัดเหล็ก มีความละเอียดถึง 1.0 มิลลิเมตร

3) กระบะใส่น้ำ ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักคอนกรีตบล็อกในน้ำ

4) ตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100, และ 200

5) ถาดสำหรับผสมซีเมนต์

6) ภาชนะสำหรับใส่ซีเมนต์

7) เครื่องผสมปูน สำหรับผสมส่วนของคอนกรีตผสมเศษโฟม

8) เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกแบบสายพานลำเลียง

9) แบบหล่อทดสอบแรงอัดทรงลูกบาศก์ ขนาด 15 X 15 X 15 เซนติเมตร

10) แบบหล่อทดสอบแรงดัด ขนาด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร

11) แบบหล่อทดสอบความทนทานที่อุณหภูมิสูง ขนาด 30 X 30 X 5 เซนติเมตร

12) แบบหล่อคอนกรีตบล็อก ขนาด 39 X 19 X 7 เซนติเมตร

13) อุปกรณ์สำหรับวัดค่าการยุบตัว (Slump mold)

14) นาฬิกาจับเวลา

15) เครื่องตัดปูน

16) ตะแกรงกันระเบิดเวลาเผา

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1) เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น LEO 1455 VP บริษัท LEO ประเทศอังกฤษ

2) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker AG ประเทศเยอรมัน

3) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine) รุ่น UH-100A บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น

4) เตาเผาชนิดควบคุมอุณหภูมิ แบบเตาเผาโรงอิฐชุมชน

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ในการศึกษาการประยุกต์ใช้เศษโฟมพอลิสไตรีนเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแทนวัสดุมวลหยาบในคอนกรีตมวลเบา มีขั้นตอนในการดำเนินงานโดยสรุปดังรูปที่ 3.1

3.3.1 การเตรียมเศษโฟม

เศษโฟมที่นำมาจากโรงงานจะทำการตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นโฟมที่ปรับขนาดของเศษโฟมตามมุมของใบมีด เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมขนาดใกล้เคียงกับหินฝุ่น โดยจะแทนที่ด้วยขนาดโฟม 4 แบบ โดยคำนึงถึงขีดความสามารถของเครื่องตัดที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม

1) แบบขนาดใหญ่ 1.0 - 1.5 ซม.

2) แบบขนาดปานกลาง 0.5 - 1.0 ซม.

3) แบบขนาดเล็ก ต่ำกว่า 0.5 ซม.

4) แบบคละขนาด ต่ำกว่า 1.5 ซม.

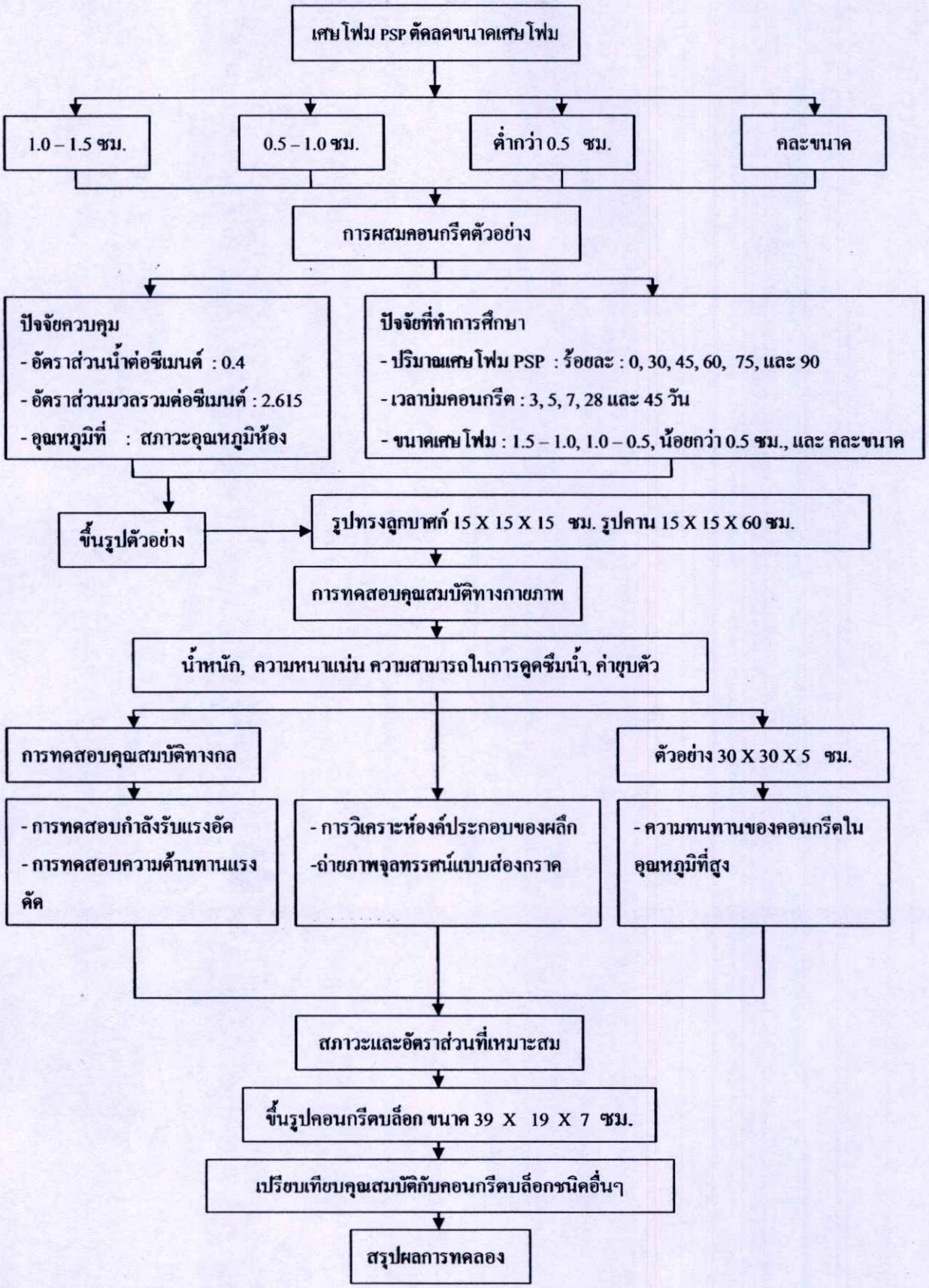
ขั้นตอนการหาขนาดเศษโฟม

1) เตรียมเศษโฟมที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิต นำเข้าเครื่องตัดย่อยขนาด

2) ปรับมุมใบมีดโดยให้ขนาดของเศษโฟมออกมาตามขนาดที่ต้องการ

3) นำเศษโฟมที่ตัดย่อยขนาดแล้วแบ่งใส่ถุง ถุงละ 0.1 กิโลกรัม จำนวน 5 ถุง

4) ทำการเขย่าเศษโฟมที่ตัดลดขนาดแล้วให้เข้ากัน ทำการสุ่มเศษโฟมขึ้นมาวัดขนาด ถุงละ 50 ชิ้นตัวอย่าง ใช้ที่วัดขนาดชนิดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์วัดขนาดชิ้นตัวอย่าง โดยขนาดเศษโฟมต้องไม่คลาดเคลื่อนเกินไปกว่าค่าที่ต้องการ 0.05 มิลลิเมตร ในทุกชิ้นตัวอย่าง จากเศษโฟมจำนวน 5 ถุง น้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม จำนวนที่สุ่มเศษโฟมขึ้นมาวัดขนาด 250 ชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.2 การเตรียมส่วนผสมคอนกรีต

เศษโฟมถูกนำมาใช้แทนมวลหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบา ในการเตรียมส่วนผสมคอนกรีตใช้วิธีตามมาตรฐาน ACI CODE (พิภพ, 2546) ซึ่งวิธีการคำนวณอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ ก-1 ถึง ก-8 ในภาคผนวก ก. โดยเกณฑ์การแทนที่หินฝุ่นนั้นออกแบบโดยเน้นการใช้เศษโฟมแทนที่หินฝุ่นให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ในภาคผนวก ข. แต่ยังคงมีความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตประเภทต่างๆ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ชุด ดังนี้

1) ชุดควบคุม : คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษโฟมใช้วิธีตามมาตรฐาน ACI CODE (พิภพ, 2546) ในการผสมคอนกรีตสำหรับชุดควบคุม ใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แสดงวิธีคำนวณใน ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตชุดควบคุม ในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสมคอนกรีต	อัตราส่วน (กก.)
ซีเมนต์	563.00
ทราย	729.00
หินฝุ่น	777.20
น้ำ	225.00

2) ชุดทดลอง : คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษโฟมโดยการแทนที่หินฝุ่นด้วยอัตราส่วนร้อยละต่างๆ ออกแบบตามตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงอัตราส่วนของคอนกรีตที่แทนที่หินฝุ่นด้วยเศษโฟม ในสัดส่วนต่าง ๆ รวมทั้งน้ำหนักที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสภาวะต่าง ๆ (ดูรายละเอียดวิธีคำนวณใน ภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม ในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสมคอนกรีต	%แทนที่โฟมโดยปริมาตร					
	0	30	45	60	75	90
ซีเมนต์ (กก.)	563.00	563.00	563.00	563.00	563.00	563.00
โฟม (กก.)	0.00	3.48	5.22	6.96	8.70	10.44
หินฝุ่น (กก.)	777.20	554.04	427.46	310.88	194.30	77.00
ทราย (กก.)	729.00	729.00	729.00	729.00	729.00	729.00
น้ำ (กก.)	225.00	225.00	225.00	225.00	225.00	225.00

โดยทำการศึกษาตามปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยควบคุมและปัจจัยที่ศึกษาในการทดสอบคอนกรีต

ปัจจัยควบคุม	ปัจจัยที่ทำการศึกษา
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ WCR เท่ากับ 0.4 อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ เท่ากับ 2.615 อุณหภูมิ : สภาวะอุณหภูมิห้อง	ปริมาณเศษโฟม PSP (ร้อยละ) : 0, 30, 45, 60, 75 และ 90 ระยะเวลาบ่มคอนกรีต (วัน) : 3, 5, 7, 28 และ 45 ขนาดเศษโฟม (ซม.) : ต่ำกว่า 0.5, 0.5–1.0, 1.0 –1.5 และ คละขนาด

3.3.3 การเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง

3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 192)

ตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15 X 15 X 15 เซนติเมตร ใช้สำหรับการทดสอบทางด้านกายภาพ และทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยมีวิธีเตรียมตัวอย่างดังนี้

1) เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 X 15 X 15 เซนติเมตร ทาน้ำมันภายในแบบหล่อตัวอย่างทุกด้าน

2) ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ในภาคผนวก ข. (Mixed Design) ในการวัดส่วนผสมจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

3) ตักคอนกรีตใส่แบบหล่อตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นให้มีปริมาตรของคอนกรีตเท่าๆกัน เหล็กกระทุ้ง (Tapping rod) ทำการกระทุ้ง 25 ครั้งทุก ๆ ชั้น

4) ปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบ ปล่อยไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ ข-2 ในภาคผนวก ข.

5) ทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อตัวอย่างทดสอบ แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำด้วย

3.3.3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบรูปคาน (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 192)

ตัวอย่างทดสอบรูปคานขนาด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร ใช้สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดัด โดยมีวิธีเตรียมตัวอย่างดังนี้

1) เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ ข-3 ในภาคผนวก ข. ทาน้ำมันภายในแบบหล่อตัวอย่างทุกด้าน

2) ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ (Mixed Design) ในการวัดส่วนผสมจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

3) ตักคอนกรีตใส่แบบหล่อตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น ในแต่ละชั้นให้มีปริมาตรของคอนกรีตเท่าๆกัน เหล็กกระทุ้ง (Tapping rod) ทำการกระทุ้ง 60 ครั้งทุก ๆ ชั้น

4) ปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบ ปล่อยไว้ประมาณ 24 เซนติเมตร.

5) ทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อตัวอย่างทดสอบ แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำด้วย

3.3.3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบความทนทานอุณหภูมิสูง (ประยุกต์จากวิธีมาตรฐาน ASTM E 119)

ตัวอย่างทดสอบขนาด 30 X 30 X 5 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความทนทานอุณหภูมิสูง โดยมีวิธีเตรียมตัวอย่างดังนี้

1) เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 30 X 30 X 5 เซนติเมตร ทาน้ำมันภายในแบบหล่อตัวอย่างทุกด้าน

2) ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ (Mixed design) ในการวัดส่วนผสมจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

3) ตักคอนกรีตใส่แบบหล่อตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นให้มีปริมาตรของคอนกรีตเท่าๆกัน เหล็กกระทุ้ง (Tapping Rod) ทำการกระทุ้ง 25 ครั้งทุก ๆ ชั้น

4) ปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบ ปล่อยไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง

5) ทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อตัวอย่างทดสอบ แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำด้วย

3.3.3.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตบล็อก ตามวิธีที่ผลิตคอนกรีตขายทั่วไป

1) เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 39 X 19 X 7 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความสามารถในการลดเสียง และเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายในตลาดทั่วไป

2) ผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมคอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้ (Mixed Design) ในการวัดส่วนผสมจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักและควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

3) อัดคอนกรีตใส่แบบหล่อตัวอย่าง โดยเครื่องอัดแบบเครื่องระบบสายพาน

4) ทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อตัวอย่างทดสอบ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำด้วย

3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต (ศิริวัตน์, 2542)

3.3.4.1 การหาน้ำหนักคอนกรีตตัวอย่าง

1) นำคอนกรีตตัวอย่างที่บ่มได้ตามระยะเวลากำหนด ใช้ผ้าเช็ดให้แห้ง

2) นำมาชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกข้อมูล

3.3.4.2 การหาความหนาแน่นคอนกรีตตัวอย่าง

1) วัดขนาดของคอนกรีตตัวอย่าง ทำการชั่งน้ำหนัก จดบันทึก

2) นำข้อมูลขนาดที่บันทึกไว้มาคำนวณปริมาตร และนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่น

3.3.4.3 การหาความสามารถในการดูดซึมน้ำ (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C140-96b)

1) นำคอนกรีตตัวอย่าง ชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกข้อมูล ก่อนนำลงบ่มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ ข-4 ในภาคผนวก ข.

2) คอนกรีตตัวอย่างที่บ่มได้ตามระยะเวลาบ่มตามกำหนดนำขึ้นจากน้ำ ใช้ผ้าเช็ดให้แห้ง

3) ชั่งน้ำหนัก แล้วจดบันทึกข้อมูล

4) จากนั้นนำค่าข้อมูลก่อนนำลงบ่มในน้ำและข้อมูลหลังนำลงบ่มน้ำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความสามารถดูดซึมน้ำ

3.3.4.4 การทดสอบค่ายุบตัว (Slump Test) (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 143)

1) นำอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump mold) ไปล้างน้ำเพื่อให้เปียก แล้วจึงนำมาวางบนถาดพื้นเรียบ

2) นำคอนกรีตใส่ลงในอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ ข-5 ในภาคผนวก ข. โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น ในแต่ละชั้นให้มีปริมาตรของคอนกรีตเท่าๆกัน แล้วจึงใช้เหล็กกระทุ้ง (Tapping rod) ทำการกระทุ้ง 25 ครั้งทุกๆชั้น

3) ปาดแต่งผิวหน้าให้เรียบ โดยใช้เหล็กกระทุ้งกลิ้งหรือดันคอนกรีตส่วนที่ล้นเกินออก ดังแสดงในรูปที่ ข-6 ในภาคผนวก ข.

4) ยกอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump mold) ขึ้นไม่หมุน (เวลาตั้งแต่ใส่คอนกรีตลงใน Slump Mold จนถึงยกขึ้น ไม่ควรเกิน 2 ½ นาที)

5) ทำการวัดค่ายุบตัวของคอนกรีตรูปกรวย ดังแสดงในรูปที่ ข-7 ในภาคผนวก ข.

3.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต (ศิริวัตน์, 2542)

3.3.5.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

ก้อนตัวอย่างที่บ่มได้ตามระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ คือ 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน จะนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการรับแรงอัด ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษโฟมในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C 39

ขั้นตอนการทดสอบ

1) เตรียมตัวอย่างก้อนคอนกรีต ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.3.1 ที่บ่มได้ตามตามระยะเวลาบ่มตัวที่กำหนด ในแต่ละอัตราส่วนมาทำความสะอาด

2) นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นกด

3) เปิดเครื่องทดสอบโดยต้องควบคุมน้ำหนักแรงกดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 -3.5 กก./ตร.ซม/วินาที ดังแสดงในรูปที่ ข-8 ในภาคผนวก ข.

4) กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักกดที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ ข-9 ในภาคผนวก ข.

5) นำค่าน้ำหนักที่ได้ และพื้นที่หน้าตัดมาหาค่ากำลังอัดประลัย

3.3.5.2 การทดสอบหาความต้านทานแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)

ใช้คอนกรีตที่บ่มตามระยะเวลาบ่มตัวต่าง ๆ คือ 7 และ 28 วัน มาทำความสะอาด แล้วทดสอบที่เครื่องทดสอบกำลังอัด Universal Testing Machine ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานASTM C 78

ขั้นตอนการทดสอบ

1) เตรียมตัวอย่างรูปคานคอนกรีต ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.3.2 ที่บ่มได้ตามอายุตามที่กำหนด ติดเข้ากับเครื่องทดสอบ

2) แบ่งก้อนตัวอย่างวางตามยาว โดยเหลือบริเวณปลายไว้สองส่วน ๆ ละ 7.5 เซนติเมตร ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนละ 15 ซม.

3) นำแท่นกดด้านบน วางบนก้อนตัวอย่างให้ตรงกับจุดกึ่งกลาง

4) ควบคุมน้ำหนักแรงกดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 0.14 – 0.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

5) กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักกดที่ได้ นำมาคำนวณหาค่าแรงดัด

3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกในส่วนผสมของคอนกรีต

การวิเคราะห์ส่วนประกอบของคอนกรีตผสมโฟม เพื่อศึกษาการจับตัวระหว่างเศษโฟมที่ใส่ลงไปในคอนกรีตเพื่อแทนในส่วนของมวลหยาบ ใช้ก้อนตัวอย่างที่ทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้วในหัวข้อ 3.3.5.1 นำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบของคอนกรีตผสมโฟม โดยวิธีการ X-ray Diffractometer (XRD) ตามวิธีมาตรฐาน เพื่อดูว่าองค์ประกอบของคอนกรีตผสมโฟม เปลี่ยนไปหรือแตกต่างอย่างไรกับคอนกรีตที่ไม่ผสมโฟม และการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.7 การศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

การศึกษาด้านความปลอดภัยโดยการทดสอบในกรณีที่คอนกรีตได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยทดสอบความทนทานของคอนกรีตผสมเศษโฟม PSP ในอุณหภูมิที่สูง

ความทนทานของคอนกรีตในอุณหภูมิที่สูง ประยุกต์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E 119 โดยออกแบบส่วนผสม ที่ได้ในสภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3.5.1 เข้าเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 538 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 0.5, 1, และ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ ข-10 ในภาคผนวก ข. และตัดคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหลังจากทำการเผาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ ข-11 ถึง ข-12 ในภาคผนวก ข. ทำการบันทึกแล้วคำนวณหาค่ากำลังอัดประลัย

3.3.8 การเปรียบเทียบคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟม PSP และคอนกรีตบล็อกที่มีจำหน่าย

ขั้นตอนการทดสอบ

1) นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคอนกรีตตัวอย่าง มาผลิตคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟม PSP ขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดของคอนกรีตบล็อกตามมาตรฐานที่มีการผลิตจำหน่ายโดยทั่วไป จำนวน 12 บล็อก

2) ผสมส่วนผสมเข้าด้วยกันภายในโม่ผสม ดังแสดงในรูปที่ ข-13 ถึง ข-14 ในภาคผนวก ข.

3) เมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว ทำการเปิดโม่ให้ส่วนผสมไหลไปตามสายพานเพื่อที่จะปล่อยลงไปในบล็อกพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ ข-15 ในภาคผนวก ข.

4) นำส่วนผสมลงในแม่พิมพ์โดยใช้ค้อนยางเคาะบล็อกพิมพ์ให้เกิดการสั่นสะเทือนเพื่อทำให้ส่วนผสมมีการเรียงตัวกันดีขึ้น

5) อัดส่วนผสมในพิมพ์ให้แน่นอีก โดยทำการกดจากด้านบนของพิมพ์ลึกลงไปจากขอบพิมพ์ประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ ข-16 ในภาคผนวก ข.

6) นำคอนกรีตบล็อกออกมาผึ่งลม ดังแสดงในรูปที่ ข-17 ในภาคผนวก ข. ประมาณ 24 ชั่วโมง นำคอนกรีตบล็อกไปบ่มเก็บไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

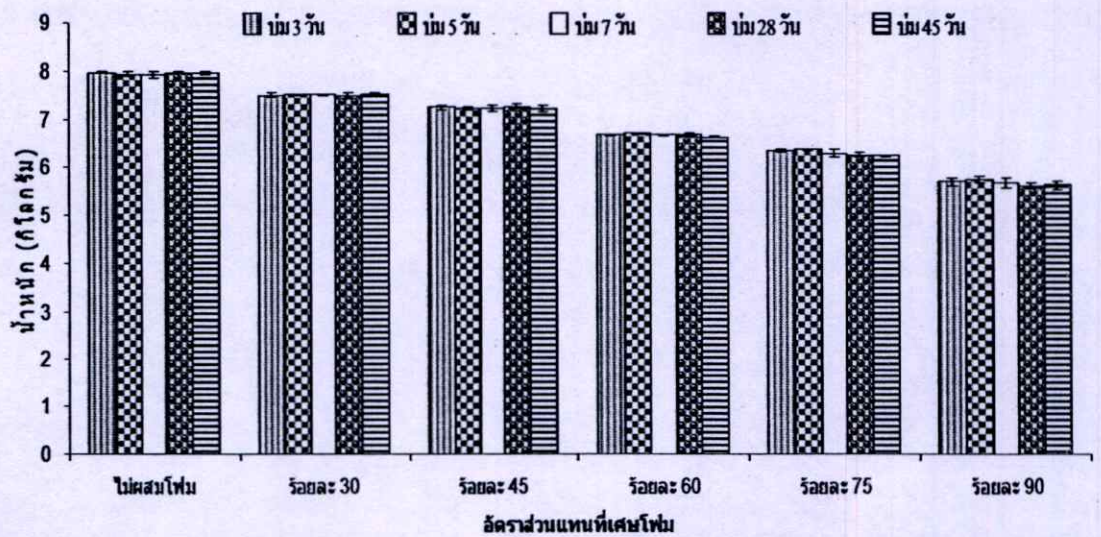
7) ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักคอนกรีตบล็อก ดังแสดงในรูปที่ ข-18 ในภาคผนวก ข. วิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกผสมโฟม และเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเศษโฟมกับคอนกรีตที่ขายตามท้องตลาดชนิดต่าง ๆ

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

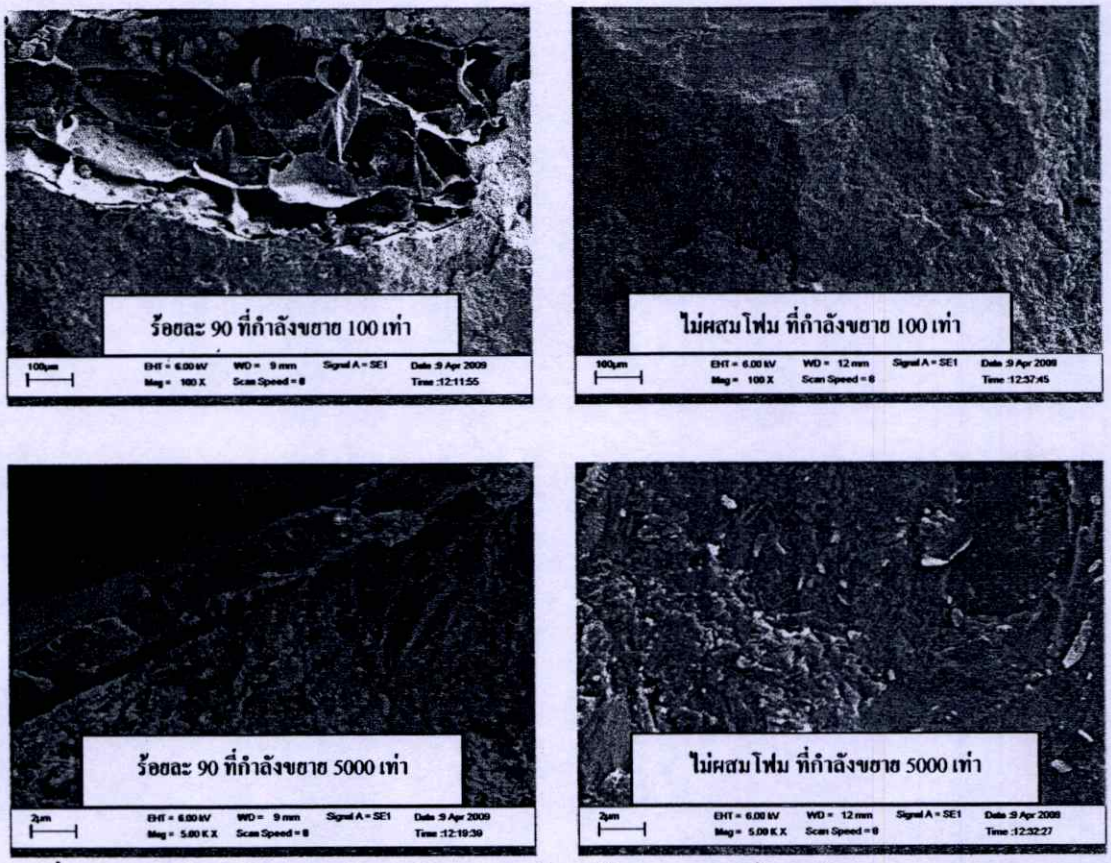
4.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการแทนที่ของเศษโฟมในคอนกรีต

4.1.1 ปริมาณเศษโฟมแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต

ปริมาณเศษโฟมที่แทนมวลหยาบในคอนกรีต ได้ออกแบบคอนกรีตตัวอย่างดังนี้ คอนกรีตแบบไม่ผสมโฟม และคอนกรีตแบบผสมโฟมที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 45, 60, 75, 90 และ 100 ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยใช้เศษโฟมแบบคละขนาดมาเป็นตัวอย่างโดยศึกษาน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1 และรายละเอียดของผลการทดสอบสำหรับคอนกรีตผสมเศษโฟมขนาดต่างๆ ในตารางที่ ค-2 ถึง ค-4 ภาคผนวก ค.) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเศษโฟมในการแทนที่มวลหยาบ น้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าลดลงเป็นเพราะโฟมมีน้ำหนักเบากว่าหินฝุ่น เมื่ออัตราการแทนที่ของเศษโฟมเพิ่มขึ้น ปริมาตรของหินฝุ่นที่ลดลง ส่งผลให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลง จากการทดลองพบว่า การแทนที่จนถึงร้อยละ 90 ยังคงขึ้นรูปได้แต่ที่อัตราส่วนเศษโฟมร้อยละ 100 คอนกรีตไม่สามารถขึ้นรูปได้ เพราะเหลวเกินไปไม่ก่อตัว และมีค่ายุบตัวที่เกินมาตรฐานงานประเภทต่างๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตไม่ผสมโฟมและคอนกรีตผสมโฟมในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 90 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมโฟมมีช่องว่างของคอนกรีตเกิดขึ้นเพราะโฟมมีความพรุนเป็นส่วนทำให้คอนกรีตน้ำหนักเบาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2

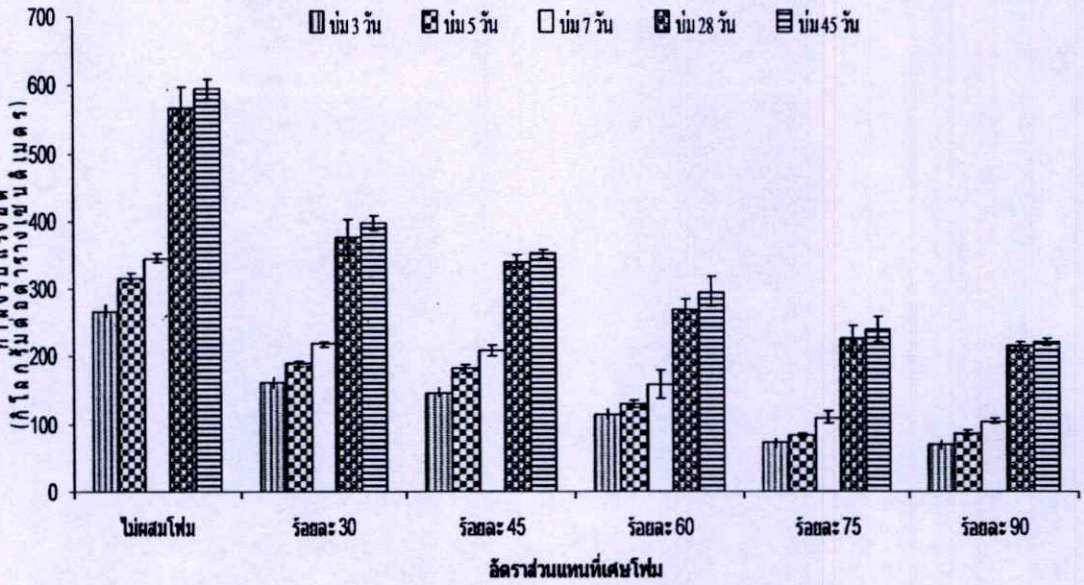


รูปที่ 4.1 น้ำหนักคอนกรีตผสมโฟมแบบคละขนาดในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตผสมโฟมในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 90 และคอนกรีตไม่ผสมโฟม ที่กำลังขยายต่างๆ

การศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-5 ภาคผนวก ค.) พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามอัตราส่วนของเศษโฟมที่แทนที่ลงไปในคอนกรีตตัวอย่าง เนื่องจากมวลหยาบที่ทำหน้าที่รับกำลังแรงอัดในคอนกรีตมีปริมาณลดลงเมื่อเศษโฟมเข้าแทนที่ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงอัดมากขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองสังเกตว่าค่าที่อ่านได้สำหรับคอนกรีตผสมโฟมไม่สม่ำเสมอสันนิษฐานได้ว่าเศษโฟมมีส่วนทำให้คอนกรีตเกิดความยืดหยุ่นเป็นตัวทดแทนกำลังรับแรงอัดที่สูญเสียไป ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานทดสอบของ ปีใหม่ และคณะ (2543)



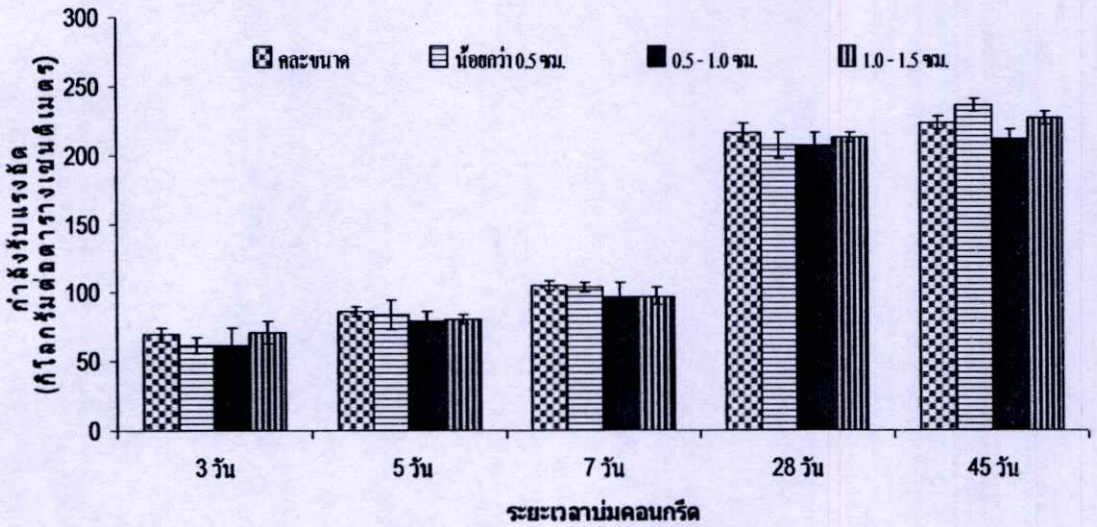
รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

4.1.2 ระยะเวลาบ่มคอนกรีต

การศึกษาระยะเวลาบ่มคอนกรีต ได้ออกแบบคอนกรีตตัวอย่างดังนี้ คอนกรีตแบบไม่ผสมโฟม และคอนกรีตแบบผสมโฟมที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 45, 60, 75 และ 90 และทำการศึกษาผลของระยะเวลาบ่มคอนกรีตต่อกำลังรับแรงอัด โดยทำการบ่มคอนกรีตที่ 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3 โดยพบว่าที่ทุกอัตราส่วนการแทนที่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น คอนกรีตตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการบ่มน้ำจะช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม (ณรงค์, 2539) จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน และ 45 วัน มีค่ารับกำลังอัดใกล้เคียงกัน คือเพิ่มขึ้นไม่มาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ระยะเวลาที่ 28 วัน มีความสมบูรณ์ขึ้นประมาณร้อยละ 80 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค.) จากผลการทดสอบสามารถกำหนดระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมสำหรับงานแต่ละประเภท โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการใช้งานคอนกรีตแต่ละประเภทดังนี้ คือ ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน คือ กำลังรับแรงอัดมากกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับทำคอนกรีตบล็อก ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน สำหรับงานก่อ คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100 - 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และระยะเวลาบ่ม 28 วัน สำหรับงานโครงสร้าง คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 180 - 480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.1.3 ขนาดเศษโฟมแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต

การศึกษาผลของขนาดเศษโฟมแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต ได้แบ่งขนาดของเศษโฟมที่แทนที่ในคอนกรีตตัวอย่างดังนี้ แบบคละขนาด, ขนาดต่ำกว่า 0.5 เซนติเมตร, 0.5 – 1.0 เซนติเมตร และ 1.0 – 1.5 เซนติเมตร โดยศึกษากำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-5 ถึง ค-9 ภาคผนวก ค.) พบว่าขนาดเศษโฟมแต่ละขนาดที่ศึกษาไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตตัวอย่าง และจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมจากเศษโฟมแต่ละขนาดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-1 ถึง ง-5 ภาคผนวก ง.) จึงเลือกใช้แบบคละขนาดมาแทนที่หินในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ เพราะเป็นการลดเวลาในการผลิตคอนกรีตไม่ต้องทำการปรับเทียบขนาดมุมของใบมีดเครื่องตัดอยู่ตลอด รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการคัดขนาด



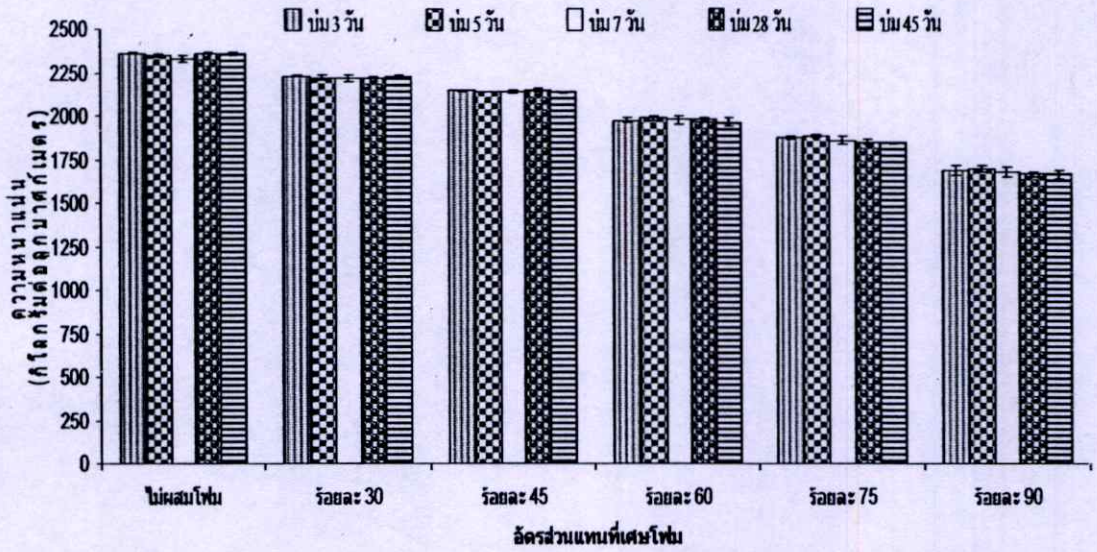
รูปที่ 4.4 ผลของขนาดเศษโฟมต่อกำลังรับแรงอัดโดยใช้คอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตตัวอย่าง

4.2.1 การหาความหนาแน่นของคอนกรีตตัวอย่าง

การหาความหนาแน่นของคอนกรีต ในการทดสอบที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 0, 30, 45 60, 75 และ 90 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตผสมเศษโฟมแบบคละขนาด ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค.) โดยพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตตัวอย่างลดลงตามการเพิ่มอัตราส่วนของเศษโฟมที่ผสมในคอนกรีต จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตในแต่ละอัตราส่วนการแทนที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-6 ภาคผนวก ง.)

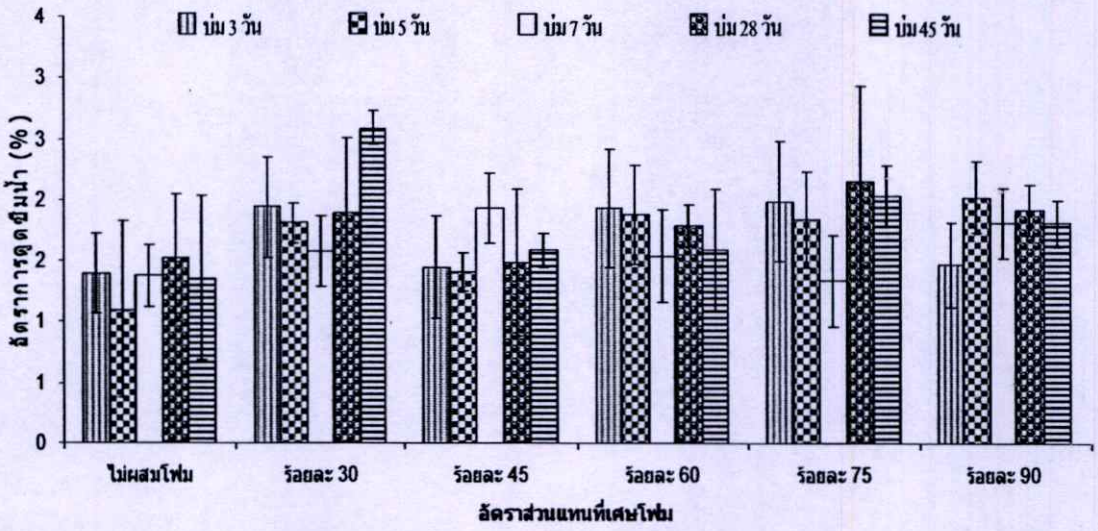
โดยคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ของระยะเวลาการบ่ม 3 วัน สำหรับคอนกรีตบล็อกมีค่าความหนาแน่น 1,686.90 ± 28.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน สำหรับงานก่อมีค่าความหนาแน่น 1,679.90 ± 28.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สำหรับงานโครงสร้างมีค่าความหนาแน่น 1,666.70 ± 12.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน

4.2.2 การหาความสามารถในการดูดซึมน้ำ

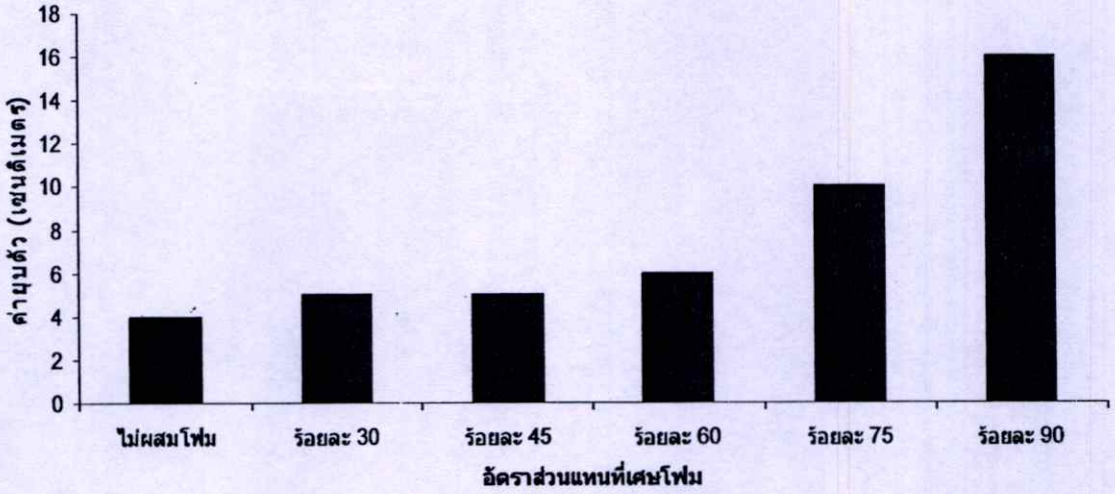
การหาความสามารถในการดูดซึมน้ำ สำหรับคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 0, 30, 45, 60, 75 และ 90 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตผสมเศษโฟมแบบคละขนาด ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค.) พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมแต่ละอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-7 ภาคผนวก ง.) ทั้งนี้น่าจะมาจากการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ของคอนกรีตทำให้เกิดการยึดเกาะกันแน่นขึ้นระหว่างอนุภาคทำให้ความหนาแน่นมวลรวมมากขึ้น เป็นการลดช่องว่างทำให้น้ำเข้าไปแทรกได้น้อยลง จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตไม่ผสมโฟม มีความสามารถในการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.90 ± 0.26 และที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 มีความสามารถในการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.79 ± 0.29 และในทุกอัตราส่วนผสมเศษโฟมพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานคอนกรีตที่กำหนดไว้ คือร้อยละ 25 สำหรับคอนกรีตประเภทต่างๆ



รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน

4.2.3 การทดสอบค่ายุบตัว

การทดสอบค่ายุบตัวเป็นการวัดความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด ในการทดลองใช้ตัวอย่างคอนกรีตผสมเศษโฟมแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 30, 45, 60, 75 และ 90 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค.) โดยพบว่าการเพิ่มการแทนที่เศษโฟมทำให้ค่ายุบตัวสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าค่ายุบตัวในแต่ละอัตราส่วนผสมเศษโฟมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-8 ภาคผนวก ง.) โดยที่การยุบตัวค่อนข้างมากเป็นเพราะเมื่ออัตราส่วนแทนที่ของเศษโฟมเพิ่มขึ้น เศษโฟมไม่ดูดซึมน้ำจึงทำให้น้ำไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และทรายทำให้เหลวขึ้น มีความสามารถในการเทได้ดี แต่มีค่ายุบตัวที่มากเกินไปมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับงานทดสอบของ ปีใหม่ และคณะ (2543) จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนเศษโฟมร้อยละ 90 มีค่ายุบตัว 16 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สำหรับงานก่อผนังบาง คือ มีค่ายุบตัวไม่เกิน 15 ± 3 เซนติเมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อและงานโครงสร้างที่อัตราส่วนเศษโฟมร้อยละ 90 พบว่ามีค่ายุบตัวเกินมาตรฐาน เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเศษโฟมร้อยละ 75 พบว่ามีค่ายุบตัว 10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ 10 ± 3 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ACI CODE (พิภพ, 2546) และสำหรับคอนกรีตบล็อกไม่ได้เน้นค่าการยุบตัวในมาตรฐานอุตสาหกรรม 58/2533

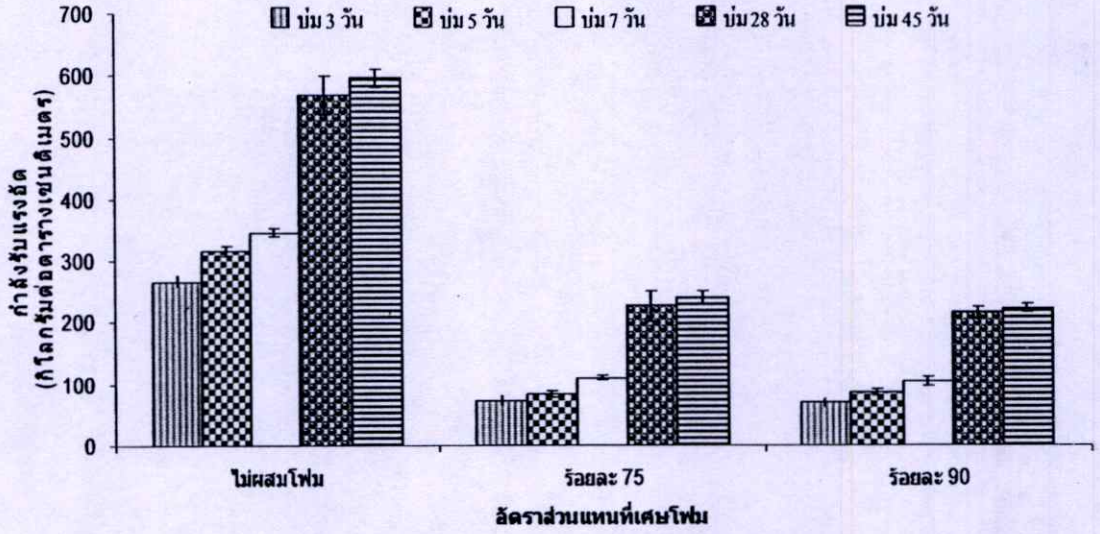


รูปที่ 4.7 ค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนผสมเศษโฟมต่างๆ
(ไม่มีค่า error bar เพราะค่าการยุบเท่ากันในการทดลองของแต่ละอัตราส่วนผสมโฟม)

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตตัวอย่าง

4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

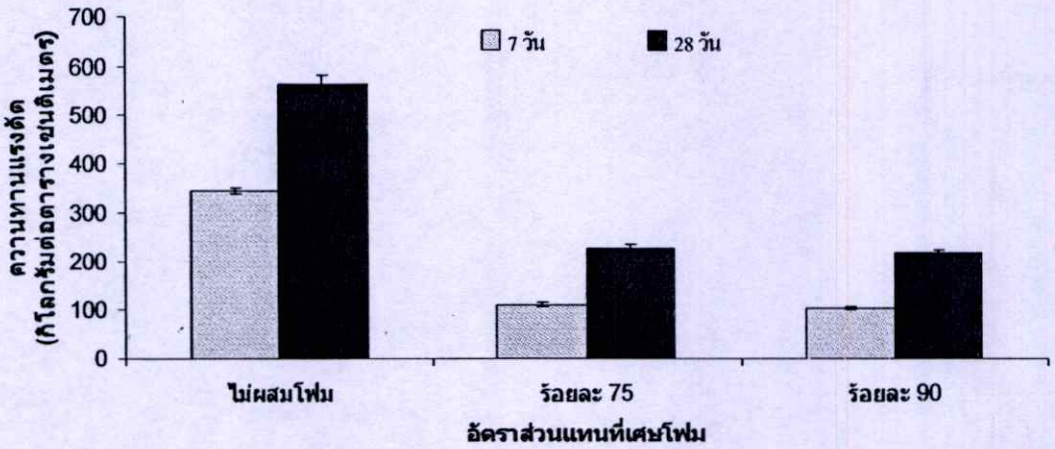
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง ในการทดสอบที่อัตราส่วนแทนที่เศษโฟมร้อยละ 0, 75 และ 90 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตผสมเศษโฟมแบบคละขนาด ที่ระยะเวลาบ่มน้ำที่ 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน โดยศึกษากำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-5 ภาคผนวก ค.) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ง-10 ภาคผนวก ง.) จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วันได้ค่ากำลังรับแรงอัด 69.50 ± 5.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตบล็อก คือ กำลังรับแรงอัดมากกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากข้อกำหนดของค่ายุบตัว จึงเลือกใช้อัตราส่วนผสมโฟมร้อยละ 75 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 111.00 ± 10.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตสำหรับงานก่อ คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100 - 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และระยะเวลาบ่ม 28 วัน เป็นระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์มีค่ากำลังรับแรงอัด 226.53 ± 20.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตโครงสร้าง คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 180 - 480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 5, 7, 28 และ 45 วัน

4.3.2 การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตตัวอย่าง

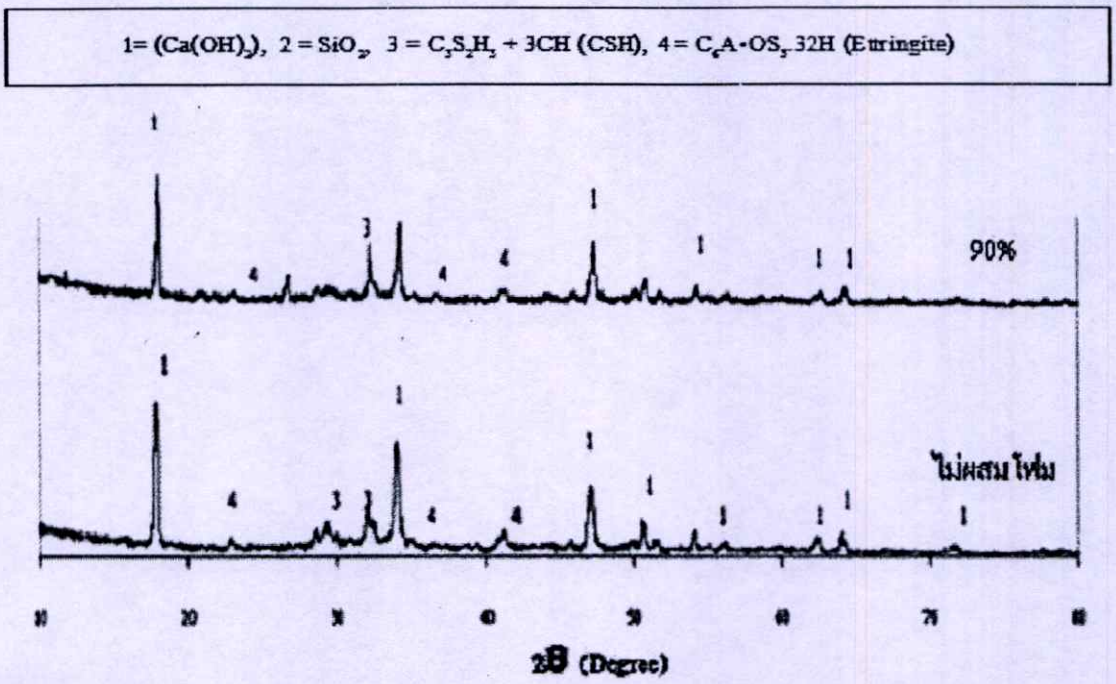
การทดสอบความต้านทานแรงดัดของคานคอนกรีตตัวอย่าง เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าแรงดึงในลักษณะของแรงดึงภายใต้การดัด แรงดึงจะเกิดขึ้นอยู่กับรูปร่างความหยาบของผิววัสดุและการจัดวางน้ำหนักที่มากระทำบนคอนกรีตตัวอย่าง ในการทดสอบความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตผสมเศษโฟมร้อยละ 0, 75 และ 90 โดยศึกษาความต้านทานแรงดัด โดยใช้คานคอนกรีตตัวอย่าง ที่ระยะเวลาบ่มน้ำที่ 7 และ 28 วัน ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-9 ภาคผนวก ค.) พบว่าความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม จากการทดสอบคานคอนกรีตตัวอย่างล้วนที่ไม่ได้ผสมเศษโฟม เมื่อเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวล่างของคานจะเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อทำการผสมเศษโฟมมีอัตราเพิ่มขึ้นคานจะเกิดการแตกร้าวและพังทลายช้ากว่า เนื่องจากเศษโฟมที่กระจายอยู่บริเวณหน้าตัดแตกร้าวมีการยึดเกาะตัวกันอยู่แม้ว่าคอนกรีตจะแตกออกจากกัน จนกระทั่งเมื่อการแตกร้าวมากขึ้นจนน้ำหนักของคานคอนกรีตมีค่าน้ำหนักมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของโฟม คานจะแตกออกจากกันเป็น 2 ท่อน โดยที่อัตราส่วนแทนที่เศษโฟมร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ได้ความต้านทานแรงดัด 104.93 ± 3.46 และ 215.97 ± 6.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ มีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดไม่เกินร้อยละ 23



รูปที่ 4.9 ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน

4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกในส่วนผสมของคอนกรีต

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลึกในคอนกรีต โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งโครงสร้างของสารแต่ละชนิดจะมีมุมสะท้อนกลับในตำแหน่งและปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสารประกอบต่างๆ ทำให้ระบุได้ถึงองค์ประกอบของสารชนิดนั้น ผลการศึกษาคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 และคอนกรีตไม่ผสมเศษ พบว่าคอนกรีตไม่ผสมโฟมอายุ 7 วัน มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมออกไซด์ ($Ca(OH)_2$), $C_6A\bullet\underline{O}S_3.32H$ (Ettringite) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานบ้างแล้ว ในขณะที่คอนกรีตผสมโฟมมีการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเศษโฟมไม่มีส่วนในเกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์หรือส่วนผสมอื่นของผลึกในคอนกรีต เศษโฟมมีหน้าที่เป็นตัวประสานแทนมวลหยาบในคอนกรีตเท่านั้น

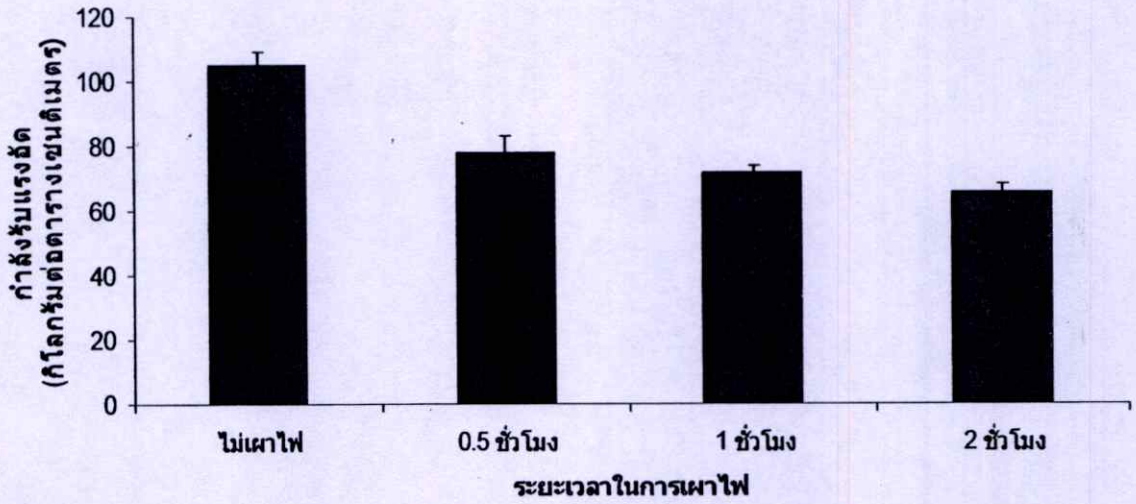


รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ของคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 และคอนกรีตไม่ผสมเศษโฟม ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

4.5 ผลการทดสอบความทนทานของคอนกรีตในอุณหภูมิที่สูง

การทดสอบความสามารถในการทนทานของคอนกรีตผสมเศษโฟมที่อุณหภูมิสูง โดยนำคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ไปหล่อเป็นคอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบ ขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร ทำการบ่มระยะเวลา 7 วัน ผึ่งแดด 1 วัน และทำการอบในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากเนื้อคอนกรีตเพราะเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการระเบิดภายในเตาเผาได้ โดยศึกษากำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค.-11 ภาคผนวก ค.) การทดสอบเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาขึ้นจนถึง 538 องศาเซลเซียส แล้วทำการคงอุณหภูมิไว้ที่ 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าที่ 0.5 ชั่วโมง มีค่ากำลังรับแรงอัด 77.80 ± 5.30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อระยะเวลาในการให้อุณหภูมิสูงที่นานขึ้นที่ 1 และ 2 ชั่วโมง คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอยู่ที่ 72.00 ± 1.60 และ 65.50 ± 3.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงว่าระยะเวลาการเผาไหม้ทำให้เกิดความอ่อนแอของคอนกรีตตัวอย่างขึ้นเรื่อยๆ เมื่อคอนกรีตได้รับอุณหภูมิที่สูงมากทำให้สูญเสียกำลังรับแรงอัด (ชัยรัตน์ และคณะ, 2544) จนทำให้เกิดการทำลายของคอนกรีตตัวอย่างได้หากมีการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายชั่วโมง อย่างไรก็ตามในการทดสอบที่ได้มาตรฐาน ASTM E-119 ต้องใช้เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่า 600 องศาเซลเซียส แต่ในการทดสอบใช้อุณหภูมิที่ 538 องศาเซลเซียส เนื่องจากข้อจำกัดของเตาเผาที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดได้ 538 องศาเซลเซียส ซึ่งหากสามารถ

เพิ่มอุณหภูมิสูงมากขึ้นกว่า 600 องศาเซลเซียส คาดว่าโฟมในคอนกรีตซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้หมดไป ซึ่งมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และในกรณีที่มีไฟไหม้ขั้นรุนแรงอุณหภูมิจะสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป

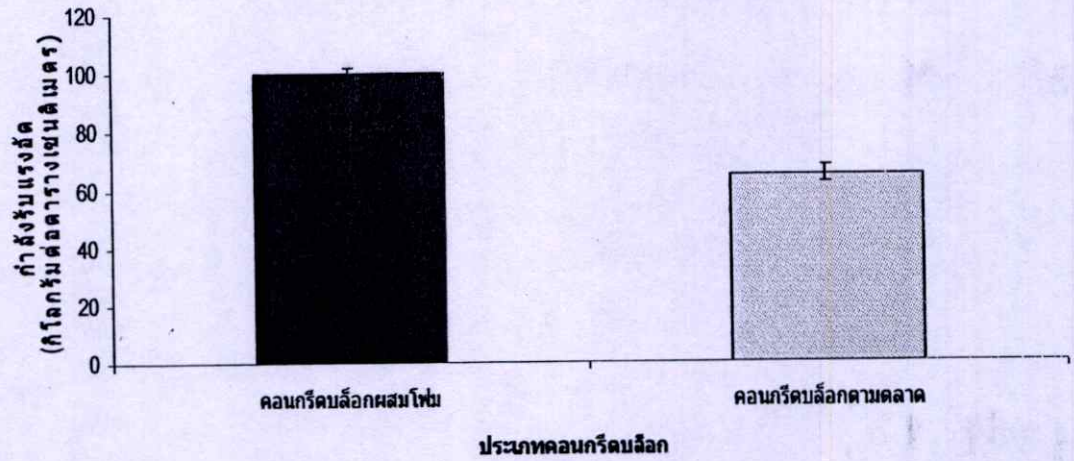


รูปที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมโฟมในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันโดยการเผาที่ 0.5, 1, 2 ชั่วโมง และไม่เผาไฟ

4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อก

4.6.1 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก

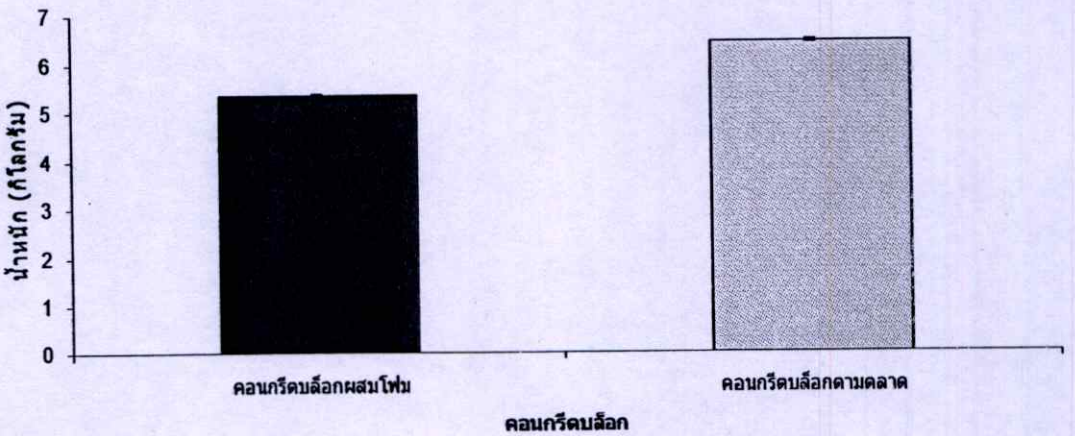
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก โดยการทดสอบคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ขึ้นรูปเป็นบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกขนาดเดียวกันที่มีขายตามท้องตลาด โดยศึกษากำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่โฟมผสม และคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด มีค่ากำลังรับแรงอัด 100.22 ± 1.71 และ 65.06 ± 3.03 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเศษโฟมมีค่ามากกว่า เป็นเพราะคอนกรีตบล็อกที่ขายในท้องตลาดไม่มีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต เน้นแต่ปริมาณการผลิตต่อวันให้ได้มากที่สุด ขั้นตอนการผสมน้ำในการผสมคอนกรีตไม่มีการชั่งตวงปริมาตรที่แน่นอน ใช้การสัมผัสด้วยมือแทน นอกจากนี้ระยะเวลาบ่มคอนกรีตยังไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการขายถ้ายังไม่ได้ขายออกไปจะทำการบ่มกระสอบเปียกน้ำไว้จนกว่าจะขายได้



รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด

4.6.2 การเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีตบล็อก

การหาน้ำหนักของคอนกรีตบล็อก โดยนำคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 ขึ้นรูปเป็นบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกขนาดเดียวกันที่มีขายตามท้องตลาด ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.13 โดยพบว่าน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 และคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด มีน้ำหนัก 5.34 ± 0.05 และ 6.43 ± 0.03 กิโลกรัม ตามลำดับ น้ำหนักคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 มีน้ำหนักน้อยกว่า 1.09 กิโลกรัม เป็นเพราะคอนกรีตบล็อกที่ขายในท้องตลาดมีปริมาณของหินฝุ่นสูงกว่าจึงมีน้ำหนักมาก การที่มีน้ำหนักน้อยกว่าทำให้ลดน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นการลดต้นทุนในการก่อสร้าง



รูปที่ 4.13 น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด

4.6.3 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตบล็อก

การพิจารณาด้านราคาต่อความคุ้มค่าในการผลิตคอนกรีตบล็อกผสมเศษโฟมเพื่อการค้า ได้คำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 3.2 และข้อมูลราคาวัสดุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากการคำนวณทำให้ได้ราคาเปรียบเทียบของการผลิตคอนกรีตบล็อกผสมโฟมกับคอนกรีตบล็อกในท้องตลาด พบว่าต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมโฟมมีราคาถูกกว่า 0.20 บาทต่อก้อน ซึ่งราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกเท่ากับ 2.6 บาทต่อก้อน และถ้าคิดราคาวัสดุคอนกรีตผสมโฟมเพื่อนำไปใช้สำหรับงานคอนกรีตประเภทต่างๆ มีราคาเท่ากับ 1,725.2 บาท ต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.1 ราคาต้นทุนการทำคอนกรีต (ราคาวัสดุต่าง ๆ วันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2552)

วัสดุ	ราคาต่อ กก. (บาท)	อัตราผสมคอนกรีตบล็อก ผสมโฟม 1 ลบ.ม. (650 ก้อน)	ราคา (บาท)	อัตราผสมคอนกรีตบล็อก ตามตลาด 1 ลบ.ม. (650 ก้อน)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์	2.80	563.0 กิโลกรัม	1576.4	563.0 กิโลกรัม	1576.4
ทรายหยาบ	0.11	729.0 กิโลกรัม	80.1	-	-
หินฝุ่น	0.12	77.7 กิโลกรัม	9.3	2150.0 กิโลกรัม	258.0
เศษโฟม	5.50	10.4 กิโลกรัม	57.2	-	-
น้ำประปา	0.01	225.0 กิโลกรัม	2.2	225.0 กิโลกรัม	2.2
ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.			**1725.2**		**1836.2**
ราคาคอนกรีตบล็อกต่อ 1 ก้อน			**2.6**		**2.8**

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 เศษโฟม PSP มีความเป็นไปได้ในการแทนที่มวลหยาบในคอนกรีตประเภทคอนกรีตบล็อก คอนกรีตงานก่อ และงานโครงสร้างได้ โดยพบว่าการแทนที่ด้วยเศษโฟมมากขึ้นมีผลทำให้น้ำหนักและความหนาแน่นลดลง แต่ค่ากำลังรับแรงอัดก็ลดลงด้วย ปริมาณเศษโฟมที่เหมาะสมในการแทนที่มวลหยาบในคอนกรีต มีค่าร้อยละ 90

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ปริมาณการแทนที่ ระยะเวลาการบ่ม การเพิ่มระยะเวลาการบ่มคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมของคอนกรีตแทนที่เศษโฟมร้อยละ 90 สำหรับการนำมาทำคอนกรีตบล็อก คือ 3 วัน ระยะเวลาบ่มสำหรับงานก่อ คือ 7 วัน และระยะเวลาบ่มสำหรับงานโครงสร้าง คือ 28 วัน ส่วนขนาดของเศษโฟมไม่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต จึงเลือกเศษโฟมแบบคละขนาดในการเตรียมคอนกรีต

5.1.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าคอนกรีตผสมเศษโฟมในอัตราส่วนร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน น้ำหนักเฉลี่ย 5.67 ± 0.10 กิโลกรัม น้ำหนักลดลง 2.30 กิโลกรัมจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเศษโฟม คิดเป็นร้อยละ 29.50 ของน้ำหนักที่ลดลง ความหนาแน่นเท่ากับ 1680.00 ± 28.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลดลงคิดเป็น ร้อยละ 28.47 ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำไม่มีความแตกต่างกันเท่ากับ 1.79 ± 0.29 % พบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมโฟมร้อยละ 90 การยุบตัวมีค่า 16 เซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์สำหรับงานก่อผนังบาง ส่วนงานก่อและงานโครงสร้างเหมาะสมที่อัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 75 การยุบตัวมีค่า 10 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตบล็อกไม่ได้เน้นค่าการยุบตัว

5.1.4 การศึกษาคุณสมบัติทางกล พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วันค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่า 69.50 ± 5.70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตบล็อก คือ กำลังรับแรงอัดมากกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เท่ากับ 111.00 ± 10.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สำหรับงานก่อ คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 100 - 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เท่ากับ 226.53 ± 20.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์สำหรับงานโครงสร้าง คือ กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 180 - 480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตผสมโฟมที่ร้อยละ 75 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน เท่ากับ 104.93 ± 3.46 และ 215.97 ± 6.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

5.1.5 การศึกษาอัตราส่วนการแทนที่เศษโฟม และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในงานประเภทต่างๆ พบว่าอัตราการผสมโฟมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อก คือ ร้อยละ 90 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน อัตราผสมโฟมที่เหมาะสมสำหรับงานก่อ คือ ร้อยละ 75 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และอัตราผสมโฟมเหมาะสมสำหรับงานโครงสร้าง คือ ร้อยละ 75 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

5.1.6 การวิเคราะห์ผลึกในโครงสร้างคอนกรีต พบว่าคอนกรีตไม่ผสมโฟมและผสมโฟมมีองค์ประกอบของผลึกไม่แตกต่างกัน เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยปกติ แสดงให้เห็นว่าเศษโฟมไม่ได้มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน

5.1.7 ความทนทานคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง 538 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงจาก 77.8 ± 5.3, เป็น 72.0 ± 1.6 และ 65.5 ± 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

5.1.8 การเปรียบเทียบกับบล็อกที่มีขายในท้องตลาด เมื่อขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร ที่มีอัตราส่วนผสมเศษโฟมร้อยละ 90 มีค่ากำลังรับแรงอัดและน้ำหนัก 100.22 ± 1.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีกำลังรับแรงอัดมากกว่า บล็อกคอนกรีตที่มีขายตามท้องตลาด 35.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีน้ำหนัก 5.34 ± 0.05 กิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าบล็อกคอนกรีตที่มีขายตามท้องตลาด 1.09 กิโลกรัม โดยคอนกรีตบล็อกผสมโฟมมีต้นทุนการผลิตของวัสดุถูกกว่า 0.20 บาทต่อก้อน และราคาวัสดุคอนกรีตผสมโฟม เพื่อนำไปใช้สำหรับงานคอนกรีตประเภทต่างๆ มีราคาเท่ากับ 1,725.2 บาท ต่อลูกบาศก์เมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาการแทนที่ของเศษโฟมในมวลละเอียด เพื่อลดน้ำหนักคอนกรีตเพิ่มขึ้น

5.2.2 ควรศึกษาในด้านการนำเศษโฟม ไปใช้ในงานก่อสร้างเกี่ยวกับงานฐานรากหรือฐานตึกที่มีแรงกด หรือแรงสั่นสะเทือน หรือนำไปใช้ผสมในการผลิตคอนกรีตประเภทต่าง ๆ

5.2.3 ศึกษาความเป็นพิษของคอนกรีตผสมโฟม ในกรณีเกิดไฟไหม้ เพื่อหาสารมีพิษที่ออกมากับควันไฟ

5.2.4 การทดสอบความทนทานอุณหภูมิสูงในกรณีเกิดไฟไหม้ ควรศึกษาที่อุณหภูมิไฟไหม้จริง

5.2.5 ควรศึกษาการใช้งานของคอนกรีตผสมเศษโฟมในการลดเสียงการลดเสียง

5.2.6 ควรทำการศึกษานำเศษโฟมที่ใช้แล้ว มาแทนวัสดุมวลหยาบในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

เอกสารอ้างอิง

เขตสยาม สุขาทิพย์, ธนาวุฒิ คะโยธา และวัชราวุธ ศรีพวงเพิด. 2545. **คอนกรีตเบา.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2536. **คอนกรีตเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ :บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด.

ชัยรัตน์ วงศ์จารุพรรณ, ณรงค์ฤทธิ์ ว่องไว และราม วัฒนาวีรวงศ์. 2544. **ผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมคอนกรีตและเศษโฟม** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พิภพ สุนทรสมัย. 2546. **คู่มือออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต โดยวิธี ACI CODE.** กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

ธวัชชัย วนาพิทักษ์กุล, วีรชัย งามเจริญมงคล และศรายุธ ทองยศ. 2541. **คอนกรีตผสมโฟม.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ณรงค์ บุญเสนอ. 2539. **ความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ประเภทพลาสติกไฟเบอร์กลาสมาใช้ทดแทนมวลหยาบในการผลิตกระเบื้องคอนกรีต** ภาควิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เทอดศักดิ์ แก้วศรี. 2543. **ซีเมนต์ผสมเส้นใย** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

ประเสริฐ ดำรงชัย. 2542. **วัสดุก่อสร้าง.** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน และสิทธิโชค หอมกระจาย. 2538. **คอนกรีตเบา.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีใหม่ อาจสาคร, อัศวิน เลิศโสภา และโอภาส วิศรุตธรรม. 2543. **วัสดุผสมคอนกรีตและเศษโฟม** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. **คอนกรีตเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 8. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วันดี สันติวุฒิเมธี 2550. **สารคดีสมาคมสร้างสรรค์ไทย.** ส. สารคดี กรุงเทพมหานคร.

ศรานุช แย้มผกา, และสุเทพ อินทกรณ์. 2538. **การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ศิริวัตน์ ไชยชนะ 2542. **ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก**. มอก. 58-2530.

สมคิด เศียรอุ่น, สมชาย โฆศิริมงคล และสมปอง โกพระ. 2537. **คอนกรีตผสมโฟม**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุวัฒน์ พาหุสุวัณโณ. 2543. **คอนกรีตผสมเถ้าลอย** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

อิทธิพร ศิริสวัสดิ์. 2540. **การนำเถ้าหนักมาใช้แทนที่มวลละเอียดในงานคอนกรีต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อรุณ ชัยเสรี. 2541. **เกร็ดความรู้เกี่ยวกับการควบคุมงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก** กรุงเทพฯ : ส. เอเซียเพรส.

อรุโนทัย วิรติการ. 2545. **การใช้ประโยชน์จากกากตะกรันที่ได้จากการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่หมดอายุเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

Babu, D.S., Ganesh, B. K. and Wee, T-H. 2006. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cem. Concr. Compos**. 41, 1381-1393.

Chen, B. and Liu, J. 2005 Mechanical properties of polymer-modified concretes Containing expanded polystyrene beads **Constructionand Building Materials.** 8, 429-433.

Liu, H-l., Deng, A. and Chu, J. 2006 Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill **Geotextiles and Geomembrances** 24, 331-338.

Klempner, D. and Frisch, K.C 1991. **Handbook of polymeric foam and foam technology.** New York: Hanser.

Laukaitis, A., Zurauskas, R. and Keriene, J. 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties **Cem Concr Compos**. 27, 41-47.

Yoonz, G., Jeon, S. and Kim, B. 2004. Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials. **Marials Georesources and Geotechnology**. 22, 215-229.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

ขั้นตอนการคำนวณ (พิภพ, 2546)

ขั้นตอนสำหรับการเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีต ในที่นี้ควรกระทำไปตามลำดับขั้นตอนที่กำหนด สิ่งแรกก็คือ ความต้องการหรือคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่จะใช้ ซึ่งมีดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด
2. ปริมาณซีเมนต์น้อยสุด
3. ปริมาณอากาศ
4. ค่ายุบตัว
5. ขนาดโตสุดของมวลรวมคละ
6. กำลังคอนกรีต
7. อาจมีความต้องการอื่น ๆ อีกนอกเหนือจากการคำนวณ เช่น สารผสมเพิ่มและซีเมนต์ชนิดพิเศษ เหล่านี้เป็นต้น

ข้อมูลสำหรับความจำเป็นเบื้องต้นเหล่านี้ มีหลักและวิธีการปฏิบัติตามขั้นต้นต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดค่ายุบตัว : หากค่ายุบตัวไม่ได้มีกำหนดไว้ให้ในความต้องการของงาน อาจใช้ตามตารางที่ ก-1 ช่วยในการกำหนดได้ ค่ายุบตัวต่างๆที่คอนกรีตแน่น และเป็นส่วนผสมที่มีความเข้มข้นเหนียวเหมาะแก่สภาพงานอย่างยิ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดขนาดโตสุดของมวลรวม : มวลรวมคละที่มีขนาดเรียงประกอบด้วยขนาดใหญ่ที่มีจำนวนมาก ย่อมจะเกิดช่องว่างน้อยกว่ามวลรวมคละที่มีขนาดใหญ่ ต้องการเนื้อปูนหรือมอร์ต้าน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม มีข้อกำหนดไว้ว่าขนาดของมวลรวมใหญ่สุดไม่ควรเกิน 1/5 เท่าของขนาดโครงสร้างที่แคบที่สุด หรือ 1/3 เท่าของความหนาแน่นพื้น หรือ 3/4 เท่าของระยะต่ำสุดของเหล็กเสริมที่อยู่ในแนวเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดปริมาณน้ำผสมและปริมาณอากาศ : ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตรที่จะทำให้เกิดค่ายุบตัวตามกำหนดในขั้นตอนแรกนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของรูปทรงและขนาดเรียงของมวลคละ และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณฟองอากาศอีกด้วย ในตารางที่ ก-2 เป็นตารางที่ช่วยในการประมาณการของจำนวนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต สำหรับมวลรวมคละขนาดต่าง ๆ ทั้งเป็นคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่กักฟองอากาศ เนื่องจากขนาดและรูปร่างของมวลรวมที่อาจวัดได้ไม่แน่นอน อาจทำให้ค่าในตารางที่ให้ไว้ผิดพลาดไปบ้างเล็กน้อย แต่ก็คิดว่าจะยังคงถูกต้องเพียงพอสำหรับใช้ในการประมาณขั้นแรกนี้ และจำนวนน้ำหนักที่แตกต่าง

กันจากความที่น่าจะเป็นจริงเพียงเล็กน้อยนี้ ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเลย ทั้งนี้เพราะยังมีแฟคเตอร์อื่นๆ อีกมากที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 4 การเลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (WCR) : ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต้องการในการผสมคอนกรีตนั้น มิใช่เพียงเพื่อให้คอนกรีตเกิดกำลังตามความต้องการเท่านั้น แต่ยังเพื่อช่วยให้เกิดความคงทนและสามารถที่จะตกแต่งได้อีกด้วย จะเห็นว่าค่า WCR เดียวกันจะทำให้คอนกรีตมีกำลังแตกต่างกันได้ ถ้าใช้มวลรวมคละหรือประเภทของซีเมนต์ที่แตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ที่ควรจะได้ก่อให้เกิดการปรับปรุงหรือแก้ไขค่า WCR ให้สอดคล้องกันกับวัสดุที่นำมาใช้งานจริงๆ สำหรับงานคอนกรีตต่างๆ คิดจากคอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างดีในห้องปฏิบัติการครบ 28 วัน ซึ่งจากข้อความนี้ แน่นอนเมื่อต้องการจะเลือกใช้ค่า WCR ในการทำงานจริงๆ ควรเลือกใช้ค่า WCR ของคอนกรีตที่สูงกว่าต้องการไว้บ้าง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่าเฉลี่ยในงานจริงต่ำกว่ากำหนด

สำหรับในสภาวะที่ทารุณเหลือหลาย (Severe Condition) ค่า WCR ควรจะต่ำยิ่งขึ้นเพื่อที่จะทำให้กำลังของคอนกรีตได้ตามต้องการ

ตารางที่ ก-1 ค่ายุบตัวสำหรับงานประเภทต่างๆ

ประเภทงาน	ค่ายุบตัว (เซนติเมตร)	
	สูงสุด	ต่ำสุด
ฐานราก ค.ส.ล.	5	2
ฐานรากคอนกรีตล้วน, เคซองและผนังกันดิน	6	2
คานและกำแพง ค.ส.ล.	10	2
เสา ค.ส.ล.	10	2
แผ่นพื้นและถนน	6	2
คอนกรีตขนาดใหญ่	6	2
ผนังบาง	15	2

หมายเหตุ อาจเพิ่มค่ายุบตัวได้อีก 3 เซนติเมตร หากใช้กรรมวิธีอื่นทำให้คอนกรีตแน่น นอกจากวิธีตามปกติ

ตารางที่ ก-2 ปริมาณน้ำผสมคอนกรีต

ค่ายุบตัวของคอนกรีต	ปริมาณน้ำ, กก.ต่อ ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมคละขนาดโตสุด มิลลิเมตร							
เซนติเมตร	10	12.5	20	25	40	50	70	150
				คอนกรีตธรรมดา				
3 ถึง 5	205	200	185	180	150	155	145	125
8 ถึง 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 ถึง 18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณอากาศที่เกิดในคอนกรีตธรรมดา, %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
				คอนกรีตกระจายฟองอากาศ				
3 ถึง 5	180	175	165	150	145	140	135	120
8 ถึง 10	200	190	180	175	160	153	150	135
15 ถึง 18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณอากาศที่เกิดในคอนกรีตธรรมดา, %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณปริมาณซีเมนต์ : ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการในหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นขึ้นอยู่กับค่าที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ที่ผ่านมา โดยที่จำนวนซีเมนต์จะเท่ากับจำนวนน้ำที่ใช้ผสม (ขั้นตอนที่ 3) หารด้วยค่า WCR (ขั้นตอนที่ 4)

$$\text{ปริมาณซีเมนต์} = \frac{\text{จำนวนน้ำที่ใช้ผสม}}{\text{ค่า WCR}}$$

ขั้นตอนที่ 6 การประเมินมวลรวมหยาบ : ปริมาณมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตหาได้จากตารางที่ ก-5 คูณด้วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) ของมวลรวมซึ่งมีหน่วยเป็น $Kg./m^3$ จะเห็นว่าสำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถในการทำงานที่เท่ากัน ปริมาณของมวลรวมหยาบขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมหยาบและค่า finess modulus ของมวลรวมละเอียดเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 7 การประมาณปริมาณมวลละเอียด : การประมาณมวลรวมละเอียดนั้น สามารถกระทำได้สองวิธีคือ วิธีน้ำหนัก (the weight method) หรือปริมาตร (the absolute volume method)

วิธีน้ำหนัก (the weight method) นี้เริ่มต้นจากน้ำหนักของคอนกรีตจะต้องถูกสมมุติขึ้นก่อน โดยอาจประมาณเอาจากประสบการณ์ จากนั้นน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่ต้องการก็จะหาได้ง่าย จากการน้ำหนักคอนกรีตสดหักออกจากน้ำหนักของคอนกรีตก็จะได้ค่าใกล้เคียงขึ้น

ตารางที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำ – ซีเมนต์

กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน, กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	อัตราส่วนน้ำ – ซีเมนต์โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตกระจายฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.48
250	0.62	0.55
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ กำลังคอนกรีต คิดจากตัวอย่างทรงกระบอกขนาด Ø 15 x 30 เซนติเมตร บ่มจนชื้นได้อายุ 28 วัน ที่อุณหภูมิ 23 + 1.47 °C ถ้าเทียบกับตัวอย่างลูกบาศก์ค่าจะสูงกว่าประมาณ 20 %

ตารางที่ ก-4 อัตราส่วนน้ำ – ซีเมนต์ที่ยอมให้สำหรับงานภายใต้สภาวะพิเศษ

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกชื้นตลอดเวลาหรือทนต่ออากาศหนาว	คอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลหรือซัลเฟต
ชิ้นส่วนเล็กๆ อาทิ ราว, ขอบกั้น, บัว หรือ หน้าตัด ที่มีระยะหุ้มต่ำกว่า 3 ซม.	0.45	0.40
โครงสร้างทั่วไป	0.50	0.45

ตารางที่ ก-5 ปริมาตรของหินต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร

หินขนาดโตสุด มิลลิเมตร	ปริมาตรของหินต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายที่มีค่าแห่งความละเอียดแตกต่างกัน			
	2.40	2.50	2.80	3.00
10	0.30	0.48	0.45	0.48
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.66	0.62	0.60
25	0.71	0.68	0.68	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70
50	0.78	0.78	0.74	0.72
70	0.81	0.79	0.77	0.45
150	0.87	0.85	0.83	0.81

ตารางที่ ก-6 น้ำหนักคอนกรีตสด

หินขนาดโตสุด มิลลิเมตร	น้ำหนักคอนกรีตสด กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตกระจายฟองอากาศ
10	2285	2180
12.5	2318	2235
20	2355	2280
25	2375	2315
40	2420	2355
50	2445	2375
70	2485	2400
150	2506	2435

สำหรับน้ำหนักคอนกรีต ถ้าต้องการจะคำนวณให้ได้ค่าจริง จะหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$U_M = 10G_a(100 - A) + C_m(1 - G_a / G_c) - w_m(G_a - 1)$$

ที่ซึ่ง

U_M = น้ำหนักคอนกรีตสด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

G_a = ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวมผสม (หยาบ + ละเอียด)

G_c = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ (ทั่วๆ ไปเท่ากับ 3.15)

A = ปริมาณอากาศ (%)

w_m = ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_m = ปริมาณซีเมนต์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

สำหรับวิธีปริมาตร (the absolute volume method) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาปริมาณของมวลรวมละเอียดที่ได้ค่าแน่นอนขึ้นไปอีก ซึ่งแน่นอนย่อมเกี่ยวข้องกับปริมาตรส่วนผสมต่างๆ ที่อยู่ในคอนกรีต ในที่นี้คือ น้ำ, อากาศ, ซีเมนต์ และมวลหยาบ นำปริมาตรเหล่านี้ไปหักออกจากปริมาตรของคอนกรีต ก็จะได้ปริมาตรของมวลรวมละเอียด ปริมาตรของวัสดุต่างๆ ที่อยู่ในคอนกรีต อาจหาได้โดยเอาน้ำหนักหารด้วยความหนาแน่นของตัวมันเอง

ขั้นตอนที่ 8 การปรับค่าสำหรับความชื้นในมวลรวมคละ : ปริมาณของมวลรวมคละที่ได้จากการชั่งน้ำหนักนั้น จะต้องอยู่ในขอบข่ายของความชื้นที่อนุญาตให้มวลคละ โดยทั่วไปมวลรวมคละจะต้องมีความชื้น โดยจะมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ถูกซึมและเคลือบผิวอยู่ ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะใส่เข้าไปผสมจะต้องลดลงตามจำนวนของความชื้นในมวลรวมคละ จากข้อมูล

ความหนาแน่นของหิน = 2,680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นหลวมของหิน = 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นของโฟม = 40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

(ปีใหม่ และคณะ, 2543)

ขนาดมวลใหญ่สุด (หินและโฟม) = 10 มิลลิเมตร

จะคำนวณได้ดังนี้

1. Design Strength ที่ 28 วัน เท่ากับ 400 ksc. ดังนั้นใช้ water cement ratio ที่ 0.4 (จากตารางที่ ก-3)

2. Design Slump เท่ากับ 8-10 เซนติเมตร และขนาดมวลรวมใหญ่สุด (ขนาดหินและโฟม) เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ใช้น้ำ 225 กิโลกรัม (จากตารางที่ ก-2)

3. จาก WCR = 0.4 และน้ำ = 225 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ปูน 563 กิโลกรัม

4. จากขนาดมวลรวมใหญ่สุด (ขนาดหินและโฟม) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร จะได้น้ำหนักคอนกรีตสด ประมาณ 2,285 กิโลกรัม

5. จากขนาดมวลรวมใหญ่สุด (ขนาดหินและโฟม) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร จะได้น้ำหนักคอนกรีตสด ประมาณ 2,285 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะได้ปริมาตรมวลรวมเท่ากับ 0.48 ลูกบาศก์เมตร

6. โดยจากความหนาแน่นหลวมของหิน 1,600 kg./ m^3 จะได้น้ำหนักหินเท่ากับ 0.48 x 1,600 = 768 กิโลกรัม และความหนาแน่นหิน 2,680 kg./ m^3 จะหาปริมาตรมวลรวมได้ = 0.48 x 1,600/2,680 = 0.29 ลูกบาศก์เมตร

7. ดังนั้นจะได้น้ำหนักทรายเท่ากับ

= น้ำหนักคอนกรีตสด – (น้ำหนักน้ำ + น้ำหนักปูน + น้ำหนักหิน)

= 2,285 – (225 + 563 +768)

= 729 กิโลกรัม

จากข้อมูลทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลข้างต้นจะได้ปริมาณวัสดุต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรเท่ากับ

น้ำ 225 กิโลกรัม

ปูน 563 กิโลกรัม

ทราย 729 กิโลกรัม

มวลรวมหยาบ 0.29 ลูกบาศก์เมตร

วิธีการคำนวณปริมาณโฟมที่ใช้ในการแทนที่หิน

จากปริมาตรของมวลรวมหยาบ = 0.29 ลูกบาศก์เมตร

ปริมาตรโฟม = A x 0.29 / 100 ลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักโฟม (B) = A x 0.29 x 40 / 100 กิโลกรัม

ปริมาตรหิน = (100 - A) x 0.29 / 100 ลูกบาศก์เมตร

น้ำหนักหิน (C) = (100 - A) x 0.29 x 2680 / 100 กิโลกรัม

Unit weight = 225 + 563 +B +C กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตัวอย่างการคำนวณหินฝุ่นที่ร้อยละ 30

น้ำหนักหิน (C) = (100 - 30) x 0.29 x 2680 / 100 กิโลกรัม

น้ำหนักหิน (C) = 554.04 กิโลกรัม

ตารางที่ ก-7 สัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม

A	% foam bymass	0	30	45	60	75	90
B	foam (kg)	0.00	3.48	5.22	6.96	8.70	10.44
C	rock (kg)	777.20	554.04	427.46	310.88	194.30	77.00

ตารางที่ ก-8 สัดส่วนในการออกแบบคอนกรีตผสมเศษโฟม ในคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสมคอนกรีต	ปริมาณโฟม % (มวลหยาบโดยปริมาตร)					
	0	30	45	60	75	90
ซีเมนต์ (กก.)	563.00	563.00	563.00	563.00	563.00	563.00
โฟม (กก.)	0.00	3.48	5.22	6.96	8.70	10.44
หินฝุ่น (กก.)	777.20	554.04	427.46	310.88	194.30	77.00
ทราย (กก.)	729.00	729.00	729.00	729.00	729.00	729.00
น้ำ (กก.)	225.00	225.00	225.00	225.00	225.00	225.00

ภาคผนวก ข.

วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

ภาคผนวก ข-1

การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ASTM : C 143

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้น หากมากไปหรือน้อยเกินไป ก็จะเป็นเหตุให้คอนกรีตเสียกำลังเมื่อแข็งตัวเต็มที่ คอนกรีตที่มีปริมาตรน้ำผสมมากก็จะมีการยุบตัวค่อนข้างสูง วิธีนี้สามารถทดสอบได้ทั้งห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม

วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. คอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ด้วยอัตราส่วนผสมตามต้องการ
2. แบบทดสอบมาตรฐานที่ทำด้วยโลหะ ซึ่งซีเมนต์ไม่ยึดเกาะผิว ลักษณะเป็นแบบรูปกรวยกลมปลายเปิดทั้งสองด้าน โดยปลายส่วนที่เป็นฐานสำหรับงานสัมผัสพื้น จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร และรูปกรวยจะสอบเล็กลงจนเหลือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายด้านบน 102 มิลลิเมตร แบบมีความสูง 305 มิลลิเมตร แผ่นโลหะที่นำมาเป็นแบบดังกล่าว ต้องมีความหนาไม้น้อยกว่า 1.61 มิลลิเมตร และมีที่สำหรับเท่าเหยียบและมือจับอยู่ตรงข้ามกันทั้งสองด้าน
3. เหล็กกระทุ้ง เป็นแท่งเหล็กกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และมีความยาวประมาณ 600 มิลลิเมตร ปลายด้านกระทุ้งจะเป็นมนโค้งครึ่งวงกลม
4. เกรียงเหล็ก
5. ไม้บรรทัดเหล็ก

ขั้นตอนการทดลอง

1. พื้นที่สำหรับวางกรวยควรเป็นพื้นที่แข็ง ราบเรียบและไม่ดูดซึมน้ำเมื่อวางกรวยเรียบร้อยแล้วใช้เท้าทั้งสองข้างเหยียบกดลงบนที่สำหรับเท้าเหยียบให้แน่น
2. นำคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ เทใส่ในกรวย โดยเทแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรเฉลี่ยเท่าๆ กัน แต่ละชั้นให้ใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง การกระทุ้งชั้นล่างสุดให้พยายามกระทุ้งด้วยการตั้งท่อนเหล็กให้ตรง ขณะกระทุ้งบริเวณรอบศูนย์กลางกรวย และเอียงเหล็กตามขอบกรวยเมื่อกระทุ้งแถวขอบกรวย การกระทุ้งชั้นบนสุด ให้พยายามเติมคอนกรีตให้เต็มแบบตลอดเวลาที่กระทุ้ง เสร็จแล้วปาดผิวให้เรียบ

3. ค่อยๆ ยกกรวยขึ้นในแนวดิ่งด้วยความเร็วสม่ำเสมอ อย่าให้กรวยเอียงหรือก่อให้การบิดใดๆ ยกกรวยให้พ้นภายใน 5-10 นาที และเวลาตั้งแต่เริ่มเทคอนกรีตลงในกรวยจนถึงขั้นสุดท้ายนี้ไม่ควรเกิน 2 นาที ครึ่ง
4. ให้วัดระยะการยุบตัวของคอนกรีตทันที โดยนำกรวยที่ยกออกแล้วมาวางข้างๆ เอาเหล็กกระทุ้งวางพาดบนขอบกรวย ให้ปลายเหล็กยื่นเข้ามาเหนือตัวอย่างคอนกรีตที่ยุบตัว แล้วใช้บรรทัดเหล็กวัดระยะ

ภาคผนวก ข-2

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ASTM : C 39

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่างๆ กัน โดยการใส่แรงอัดโดยตรงกับแบบหล่อคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 192

วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. คอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบ
2. เครื่องมือทดสอบกำลังอัด
3. แบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 X 15 X 15 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
5. ไม้บรรทัดเหล็ก

ขั้นตอนการทดลอง

ก. การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว

2. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุด ขณะเทคอนกรีตหรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

ข. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องมือผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่มีอยู่ตอนกลางที่เทออกมาจากเครื่องใหม่ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบ และใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวให้เรียบ

3. ทิ้งแบบไว้ในร่มประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มตามอายุที่ต้องการ

ค. การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตให้ทดสอบโดยเร็วที่สุด หลังจากนำขึ้นจากน้ำเมื่อครบอายุบ่ม ก่อนการทดสอบต้องทำการตรวจสอบระนาบหัวท้าย

ง. การคำนวณ

ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต จะหาได้จากสูตร

$$F_c = P/A$$

โดยที่

F_c = กำลังอัดประลัยของแท่นคอนกรีต มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น กิโลกรัม หรือ ปอนด์

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร หรือ ตารางนิ้ว โดยให้คิดจากขนาด 15 X 15 เซนติเมตร

ภาคผนวก ข-3

การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต

ASTM : C 78

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต สำหรับหาโมดูลัสแตกร้าว ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งของการหากำลังดึงของคอนกรีตโดยอ้อม โดยแบบหล่อคอนกรีตมาตรฐาน ASTM C 192

วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. คอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบ
2. เครื่องมือทดสอบกำลังอัด
3. แบบหล่อตัวอย่างขนาด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
5. ไม้บรรทัดเหล็ก

ขั้นตอนการทดลอง

ก. การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว

2. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุด ขณะเทคอนกรีตหรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

ข. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องมือผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่มีอยู่ตอนกลางที่เทออกมาจากเครื่องใหม่ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบ และใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวให้เรียบ

3. ทิ้งแบบไว้ในร่มประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มตามอายุที่ต้องการ

ค. การทดสอบกำลังอัด

1. ให้จัดตัวอย่างคานที่จะทดสอบ วางบนจุดที่รองรับ และแรงกระทำผ่านบล็อกสองจุด ตรงตามตำแหน่ง จากนั้นจึงเดินเครื่องทดสอบเพิ่มแรงกระทำบนคานอย่างสม่ำเสมอภายในช่วง คือ 0.14 – 0.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที จนกระทั่งคานทดสอบหัก

2. การวัดขนาดหน้าตัด ให้คิดเฉลี่ยจาการวัดสามค่า คือที่ปลายทั้งสองและที่กึ่งกลางของแท่งคานคอนกรีตทดสอบ

ง. การคำนวณ

1. ถ้าจุดเริ่มรอยหักที่ผิวรับแรงดึง เกิดภายในช่วงกลางคานซึ่งเป็นจุดที่เกิดการดัดบริสุทธิ์ จะได้ค่าโมดูลัสดังนี้

$$R = PL/bd^2$$

2. ถ้ารอยหักที่ผิวรับแรงดึงเกิดอยู่นอกช่วงกลาง แต่ไม่เบี่ยงเบนไปเกินกว่า 5% ของความยาวช่วงคาน จะหาค่าโมดูลัสแตกร้าวได้ดังนี้

$$R = 3Pa/bd^2$$

โดยที่ทั้งสองสมการดังกล่าว

R = โมดูลัสแตกร้าว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P = แรงกด มีหน่วยเป็น กิโลกรัม หรือ ปอนด์

L = ความยาวช่วงคานระหว่างที่รองรับ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

a = ระยะเฉลี่ยของรอยหักที่วัดตรงผิวแรงดึงถึงจุดรองรับด้านใกล้ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ภาคผนวก ข-4

การทดสอบความสามารถในการทนไฟ

ASTM : E 119

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบความสามารถในการทนไฟของวัสดุที่อุณหภูมิสูงและเวลาต่างๆ

วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

1. คอนกรีตตัวอย่างสำหรับทดสอบ
2. เตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
3. เครื่องผสมคอนกรีต
4. แบบหล่อตัวอย่างขนาด 30 X 30 X 5 เซนติเมตร
5. เครื่องชั่งขนาดใหญ่
6. ไม้บรรทัดเหล็ก
7. ตะแกรงเพื่อป้องกันวัสดุระเบิด

ขั้นตอนการทดลอง

ก. การเตรียมแบบหล่อ

1. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันด้านผิวในที่คอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว

2. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุด ขณะเทคอนกรีตหรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

ข. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

1. สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องมือผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่มีอยู่ตอนกลางที่เทออกมาจากเครื่องใหม่ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบ และใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้น เมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวให้เรียบ

3. ทิ้งแบบไว้ในร่มประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มตามอายุที่ต้องการ

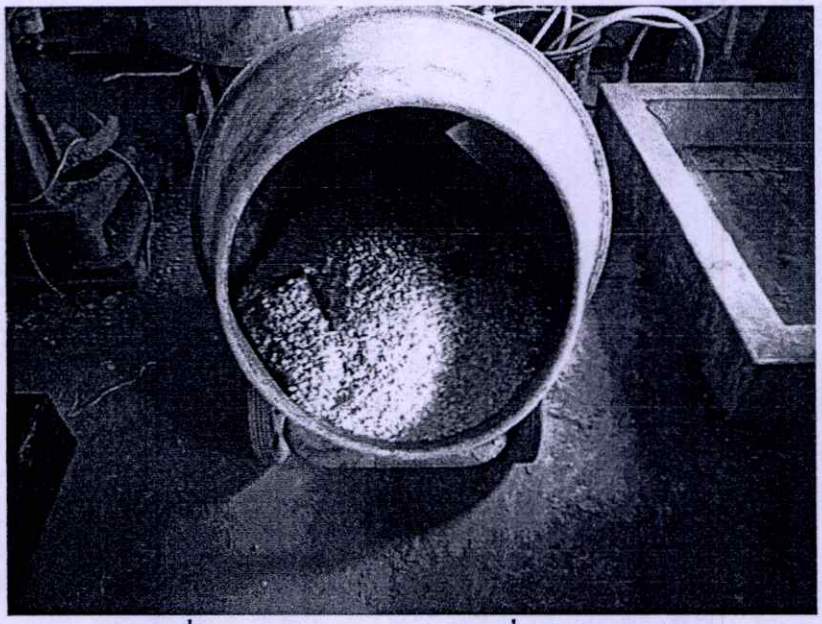
ค. การทดสอบการทนไฟ

การทดสอบการทนไฟ ทดสอบตามความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้

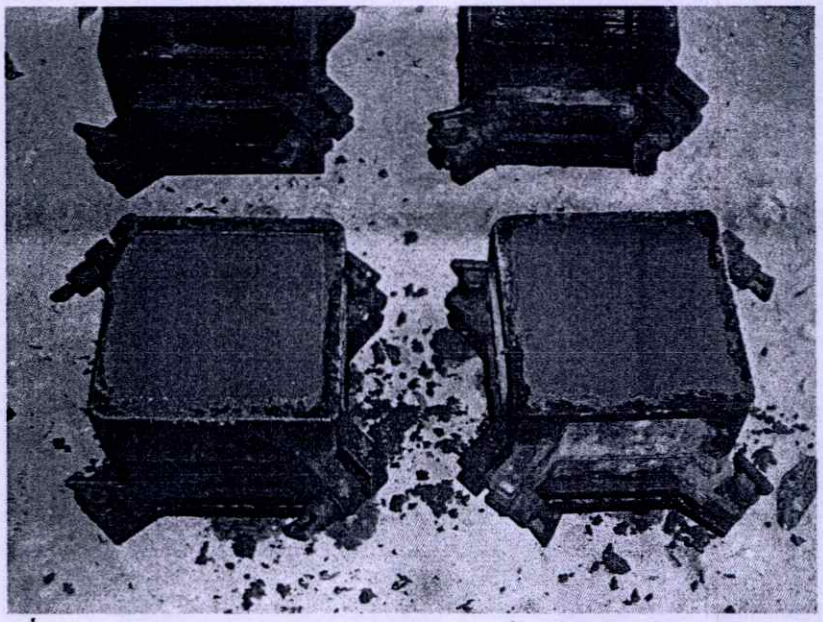
ในที่นี้จะทำการทดสอบตามที่มาตราฐานแนะนำที่ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิดังต่อไปนี้

538 องศาเซลเซียส	→	5	30 นาที
704 องศาเซลเซียส	→	5	45 นาที
927 องศาเซลเซียส	→	5	60 นาที
1010 องศาเซลเซียส	→	5	120 นาที

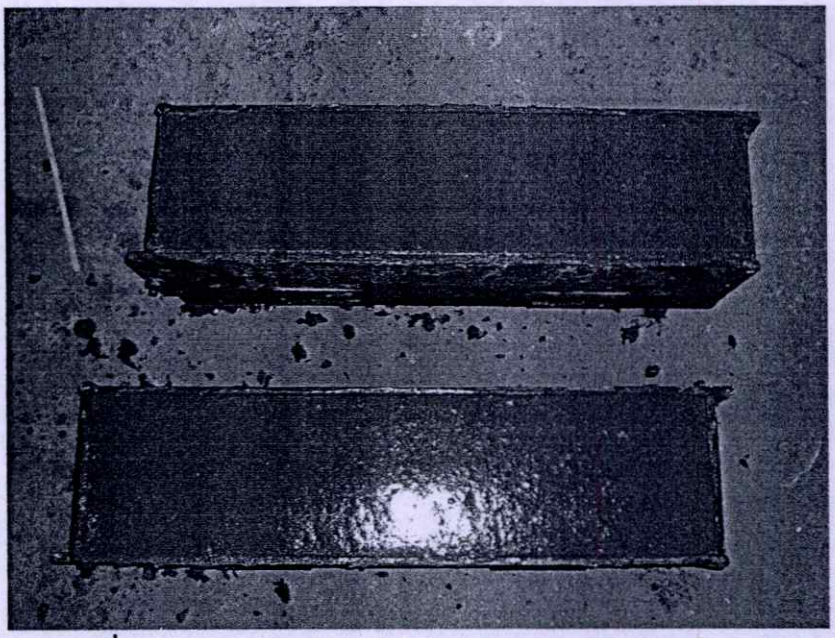
รูปการผลิตและทดสอบคอนกรีต



รูปที่ ข-1 การผสมคอนกรีตในเครื่องโม่คอนกรีต

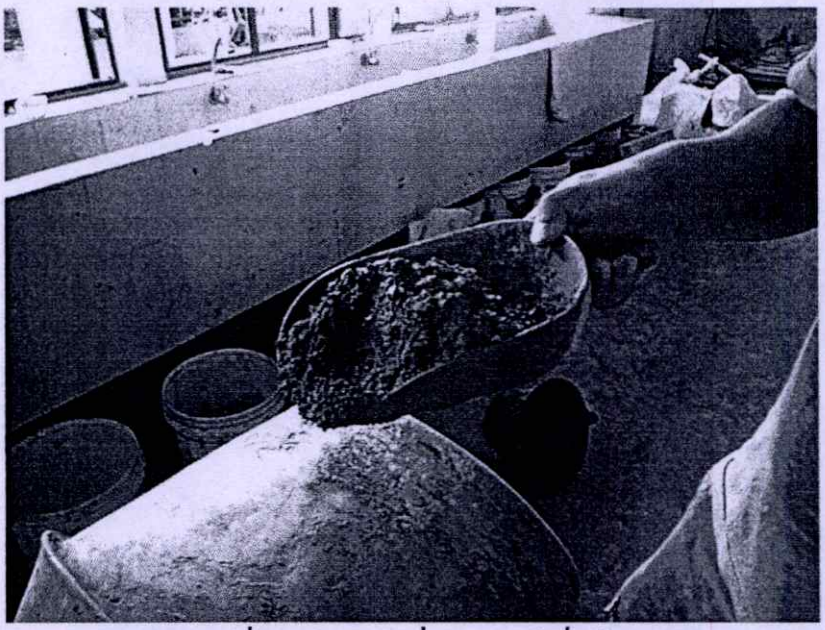


รูปที่ ข-2 แบบหล่อทดสอบแรงอัดทรงลูกบาศก์ 15 X 15 X 15 เซนติเมตร



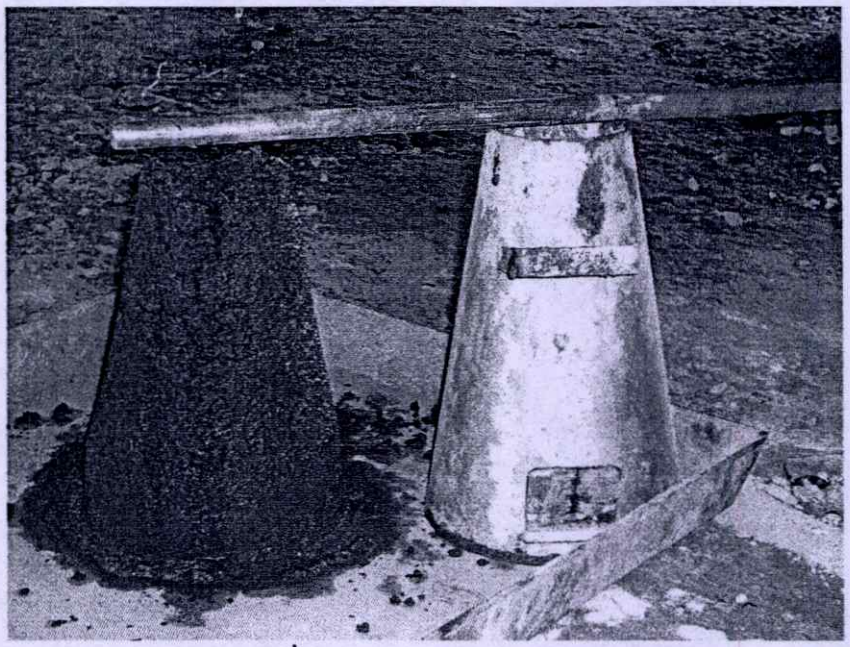
รูปที่ ข-3 แบบหล่อทดสอบแรงดัด 15 X 15 X 60 เซนติเมตร

รูปที่ ข-4 การบ่มน้ำ

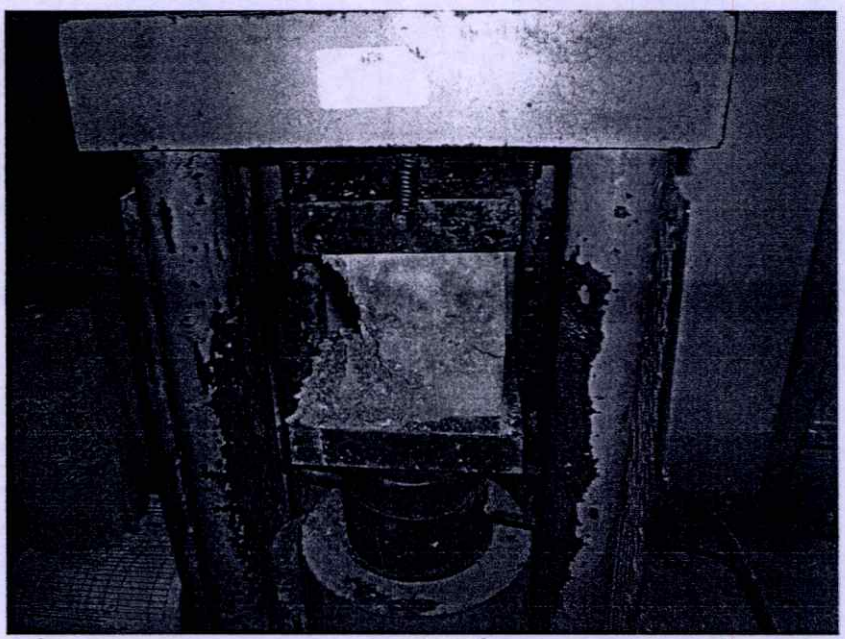


รูปที่ ข-5 คอนกรีตที่ผสมกันเข้าที่แล้ว

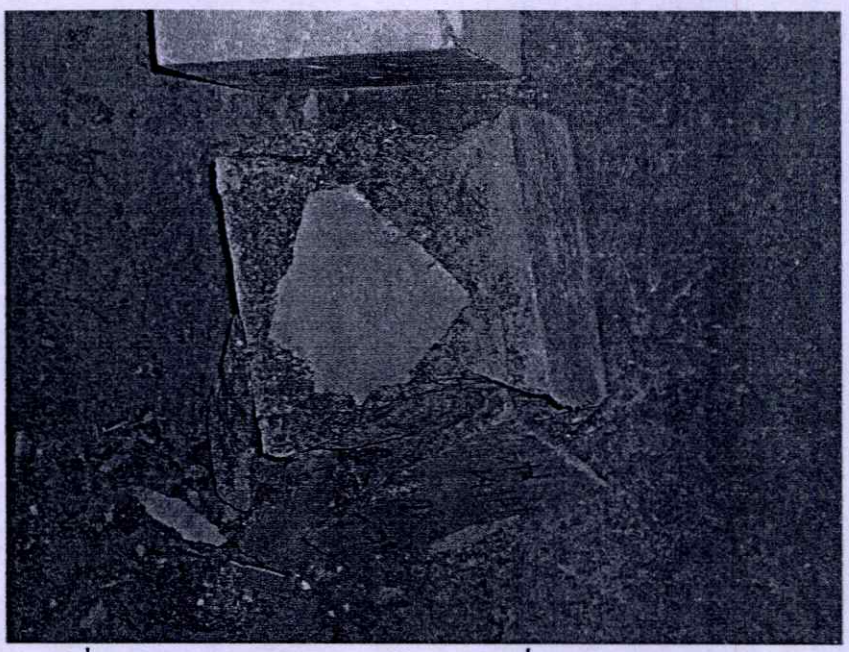
รูปที่ ข-6 การทดสอบหาค่าการยุบตัว



รูปที่ ข-7 ทำการวัดค่าการยุบตัว

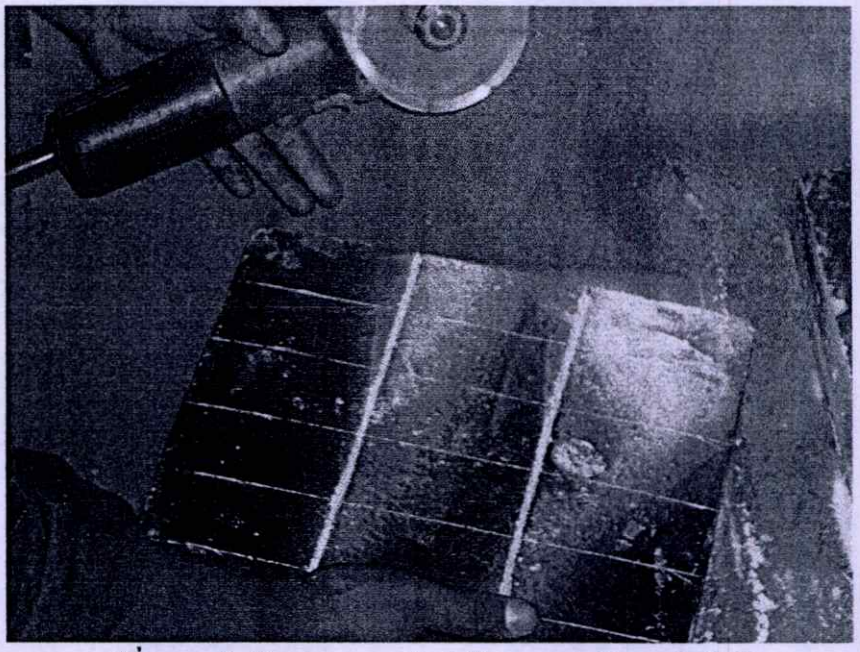


รูปที่ ข-8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง (Universal Testing Machine)

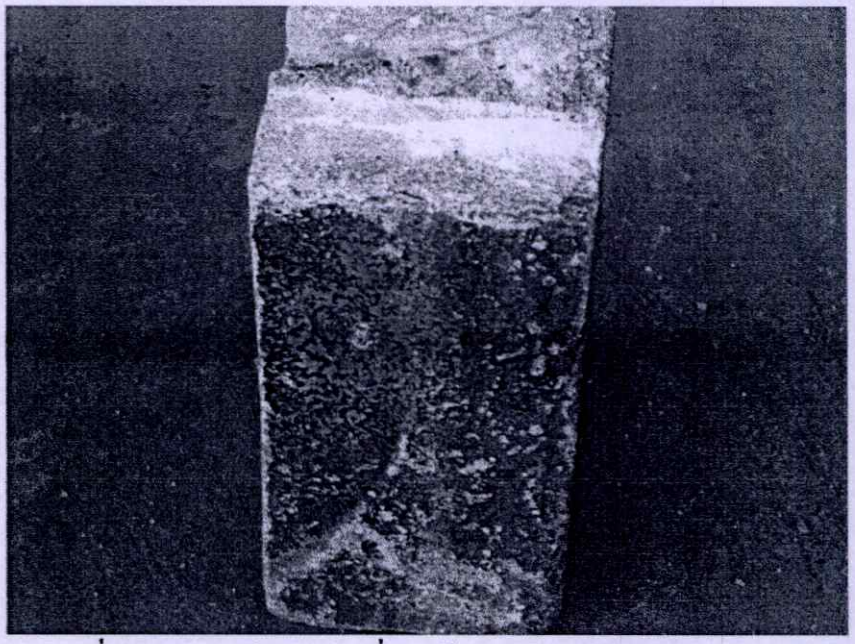


รูปที่ ข-9 การแตกหักของคอนกรีตตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัด

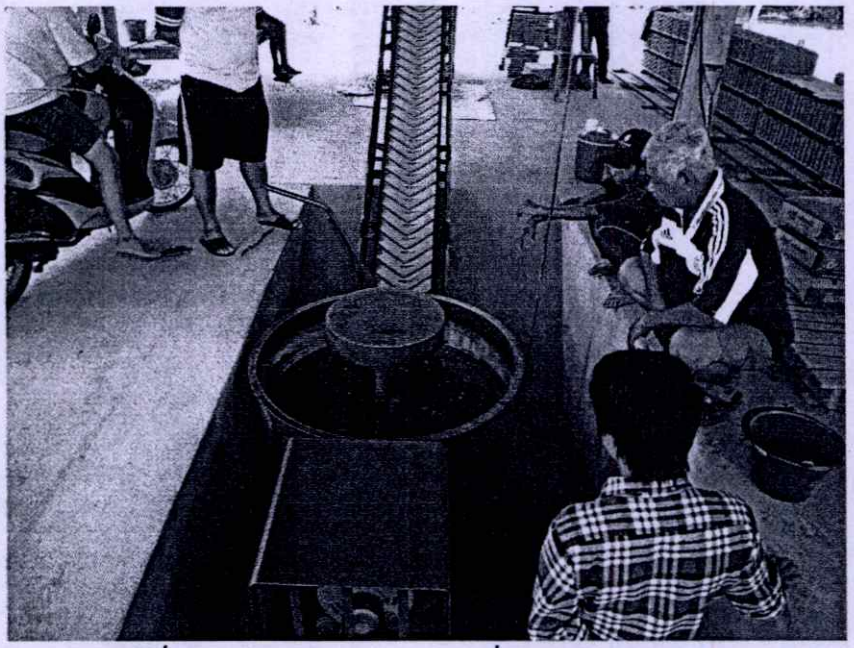
รูปที่ ข-10 คอนกรีตตัวอย่างที่นำออกมาจากเตาเผาไฟ



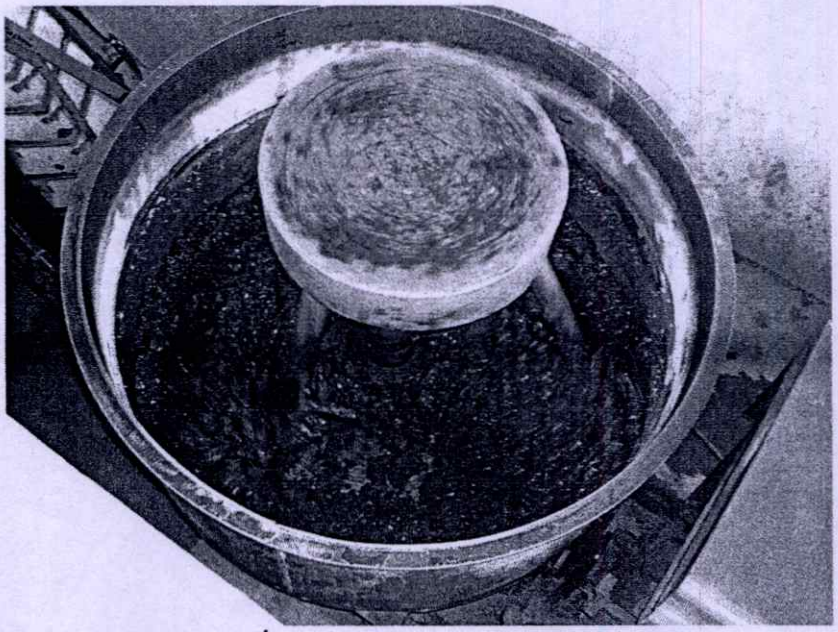
รูปที่ ข-11 ตัดตัวอย่างคอนกรีตนำไปทดสอบรับแรงกำลังอัด



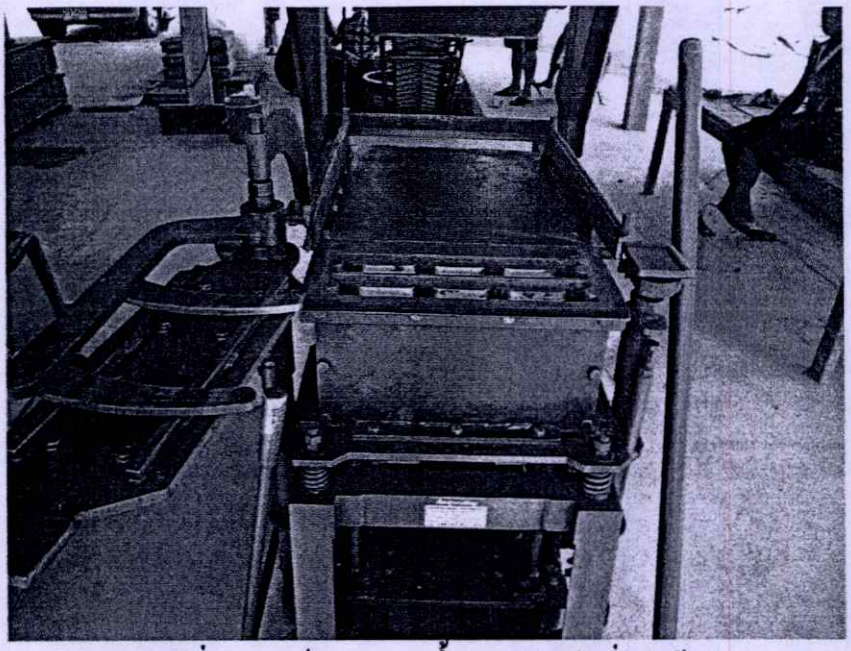
รูปที่ ข-12 คอนกรีตตัวอย่างที่ตัดแล้วขนาด 5 x 5 x 10 เซนติเมตร



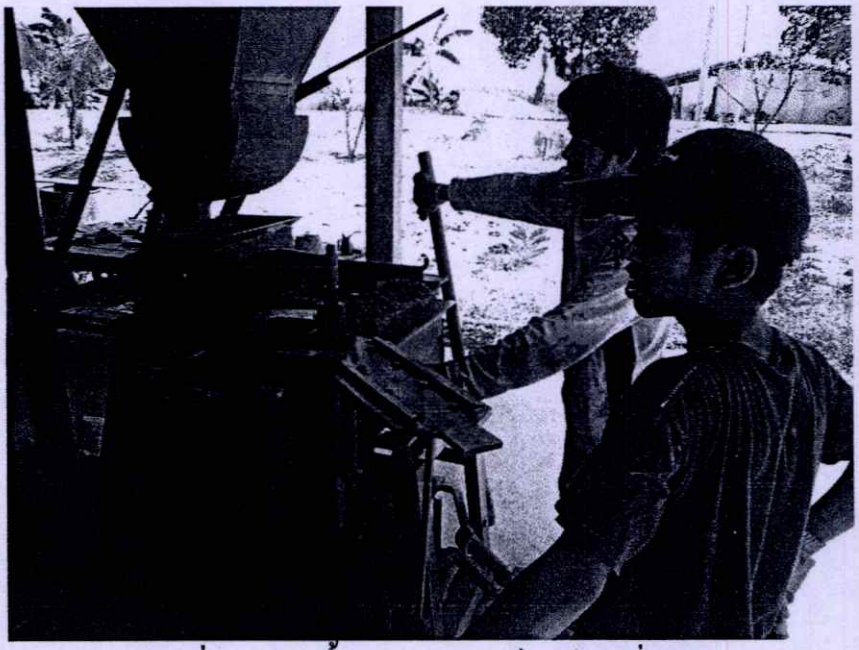
รูปที่ ข-13 โม่และสายพานของเครื่องอัดบล็อกคอนกรีต



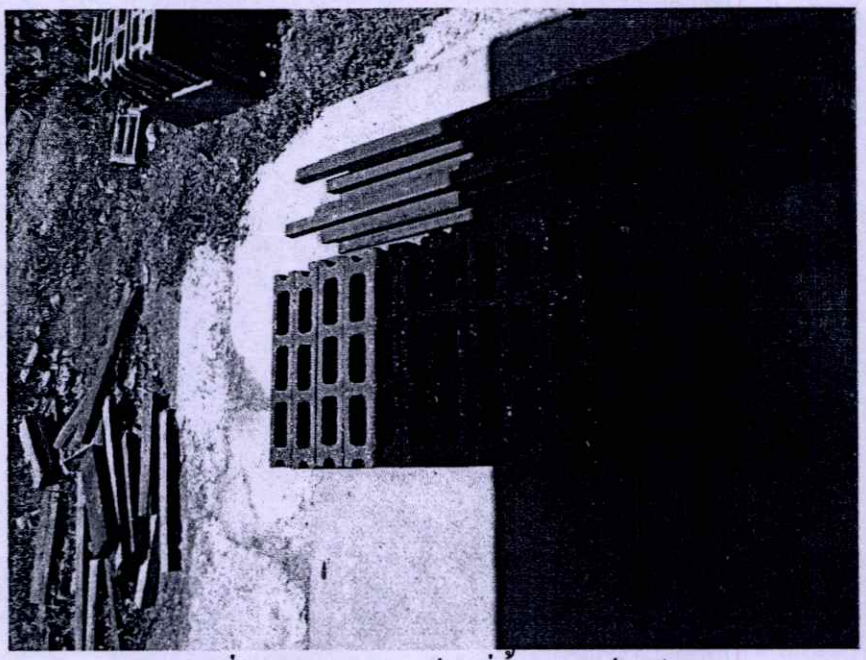
รูปที่ ข-14 การโม่ส่วนผสมคอนกรีต



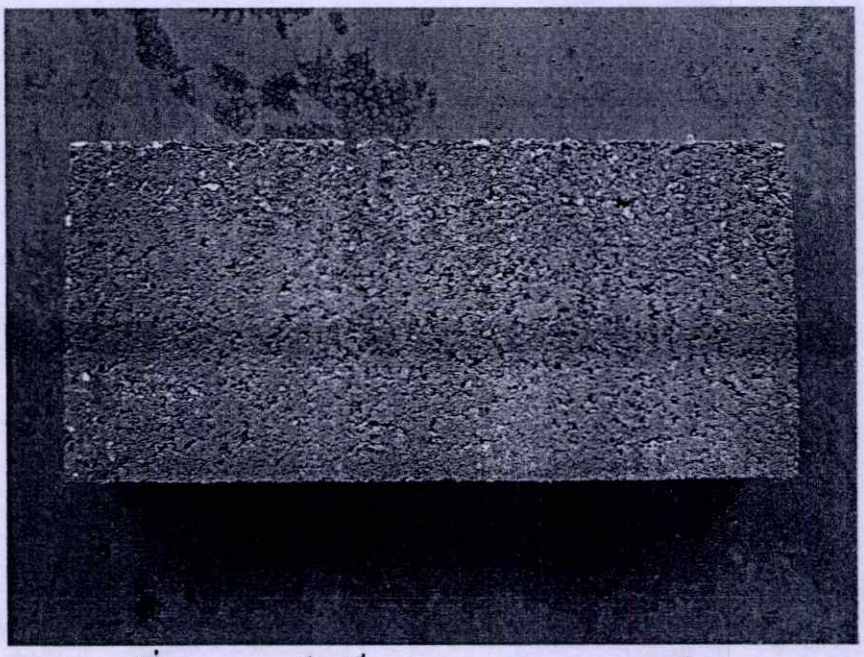
รูปที่ ข-15 บล็อกสำหรับขึ้นรูปคอนกรีตที่โม่แล้ว



รูปที่ ข-16 การขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องอัด



รูปที่ ข-17 คอนกรีตบล็อกที่ขึ้นรูปสำเร็จแล้ว



รูปที่ ข-18 คอนกรีตบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร

ภาคผนวก ค.

ตารางแสดงข้อมูลผลการทดสอบคอนกรีต

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)			Foam 0%				Foam 30%				Foam 45%			
No.	Cross Section	Height	Ages (days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	7.95	4	1.79	2355.6	7.55	5	2.30	2225.2	7.24	5	1.26	2145.2
2	15 x 15	15	3	7.98	4	2.18	2364.4	7.54	5	2.03	2234.1	7.23	5	1.54	2142.2
3	15 x 15	15	3	7.96	4	1.53	2358.5	7.51	5	1.49	2207.4	7.26	5	1.54	2151.1
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**7.96±0.02**	**4**	**1.83±0.32**	**2359.5±4.5**	**7.53±0.05**	**5**	**1.94±0.42**	**2222.2±4.9**	**7.24±0.02**	**5**	**1.45±0.42**	**2146.2±4.4**
4	15 x 15	15	5	7.91	4	2.59	2343.7	7.51	5	1.62	2225.2	7.23	5	1.83	2142.2
5	15 x 15	15	5	7.99	4	1.78	2367.4	7.49	5	1.90	2219.3	7.21	5	0.98	2136.3
6	15 x 15	15	5	7.92	4	1.15	2346.7	7.53	5	1.89	2231.1	7.22	5	1.40	2139.3
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**7.94±0.04**	**4**	**1.84±0.72**	**2352.6±12.9**	**7.51±0.02**	**5**	**1.80±0.16**	**2225.2±12.9**	**7.22±0.01**	**5**	**1.40±0.16**	**2139.3±3.0**
7	15 x 15	15	7	7.94	4	1.66	2352.6	7.51	5	1.35	2225.2	7.24	5	2.40	2145.2
8	15 x 15	15	7	7.69	4	1.85	2325.9	7.49	5	1.49	2219.3	7.21	5	1.69	2136.3
9	15 x 15	15	7	7.98	4	2.18	2364.4	7.52	5	1.90	2228.1	7.19	5	1.70	2130.4
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**7.87±0.07**	**4**	**1.90±0.26**	**2347.6±19.7**	**7.51±0.02**	**5**	**1.58±0.28**	**2224.2±19.1**	**7.21±0.03**	**5**	**1.93±0.28**	**2137.3±7.5**
10	15 x 15	15	28	7.98	4	1.92	2364.4	7.48	5	2.19	2201.5	7.28	5	1.39	2157.0
11	15 x 15	15	28	7.99	4	2.57	2367.4	7.51	5	2.32	2237.0	7.24	5	1.40	2145.2
12	15 x 15	15	28	7.95	4	1.53	2355.6	7.51	5	1.21	2210.4	7.25	5	1.68	2148.1
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**7.97±0.02**	**4**	**2.01±0.52**	**2362.4±6.2**	**7.50±0.06**	**5**	**1.91±0.60**	**2216.3±6.2**	**7.26±0.02**	**5**	**1.49±0.62**	**2150.1±6.2**
13	15 x 15	15	45	7.97	4	1.27	2361.5	7.52	5	2.31	2228.1	7.21	5	1.41	2136.3
14	15 x 15	15	45	7.93	4	1.28	2349.6	7.55	5	2.17	2237.0	7.22	5	1.83	2139.3
15	15 x 15	15	45	7.98	4	2.44	2364.4	7.53	5	2.03	2216.3	7.25	5	1.54	2148.1
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7.96±0.03**	**4**	**1.66±0.67**	**2358.5±7.8**	**7.53±0.04**	**5**	**2.17±0.14**	**2227.1±7.5**	**7.23±0.02**	**5**	**1.59±0.14**	**2141.2±6.2**

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%				Foam 75%				Foam 90%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	6.72	6	1.66	1991.1	6.31	10	1.90	1869.6	5.59	16	1.27	1656.3
2	15 x 15	15	3	6.65	6	2.15	1970.4	6.37	10	1.57	1887.4	5.71	16	1.78	1691.9
3	15 x 15	15	3	6.63	6	2.63	1964.4	6.32	10	2.53	1872.6	5.78	16	1.94	1712.6
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**6.67±0.05**	**6**	**2.15±0.48**	**1975.3±14.0**	**6.33±0.03**	**10**	**2.00±0.49**	**1876.5±9.5**	**5.69±0.10**	**16**	**1.66±0.35**	**1686.9±28.5**
4	15 x 15	15	5	6.74	6	2.43	1997.0	6.38	10	2.04	1890.4	5.81	16	1.40	1721.5
5	15 x 15	15	5	6.71	6	1.67	1988.1	6.39	10	1.56	1893.3	5.72	16	1.78	1694.8
6	15 x 15	15	5	6.66	6	2.30	1973.3	6.34	10	1.26	1878.5	5.69	16	1.97	1685.9
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**6.70±0.04**	**6**	**2.13±0.41**	**1986.1±12.0**	**6.37±0.03**	**10**	**1.62±0.39**	**1887.40±7.8**	**5.74±0.06**	**16**	**1.72±0.29**	**1700.7±18.5**
7	15 x 15	15	7	6.75	6	2.12	2000.0	6.21	10	1.61	1840.0	5.58	16	1.64	1653.3
8	15 x 15	15	7	6.62	6	1.37	1961.5	6.37	10	2.35	1887.4	5.66	16	1.62	1677.0
9	15 x 15	15	7	6.63	6	1.84	1964.4	6.28	10	2.07	1860.7	5.77	16	2.12	1709.6
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**6.67±0.07**	**6**	**1.78±0.38**	**1975.3±21.4**	**6.29±0.08**	**10**	**2.01±0.38**	**1862.7±23.8**	**5.67±0.10**	**16**	**1.79±0.29**	**1679.9±28.3**
10	15 x 15	15	28	6.73	6	2.12	1994.1	6.32	10	2.53	1872.6	5.59	16	1.82	1656.3
11	15 x 15	15	28	6.68	6	1.83	1979.3	6.24	10	1.60	1848.9	5.61	16	1.45	1662.2
12	15 x 15	15	28	6.63	6	1.84	1964.4	6.21	10	0.97	1840.0	5.67	16	1.80	1668.9
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**6.68±0.05**	**6**	**1.93±0.17**	**1979.2±14.8**	**6.26±0.06**	**10**	**1.70±0.79**	**1853.8±16.8**	**5.62±0.04**	**16**	**1.69±0.21**	**1662.4±12.3**
13	15 x 15	15	45	6.71	6	1.36	1988.1	6.24	10	1.28	1848.9	5.61	16	1.45	1662.2
14	15 x 15	15	45	6.62	6	1.69	1961.5	6.25	10	1.76	1851.9	5.57	16	1.46	1650.4
15	15 x 15	15	45	6.56	6	2.34	1943.7	6.21	10	1.61	1840.0	5.72	16	1.78	1694.8
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**6.63±0.08**	**6**	**1.80±0.50**	**1964.4±22.4**	**6.23±0.02**	**10**	**1.55±0.24**	**1846.9±6.2**	**5.63±0.08**	**16**	**1.56±0.19**	**1669.1±23.0**

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%				Foam 30%				Foam 45%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	7.95	4	1.79	2355.6	7.53	5	1.46	2231.1	7.21	5.5	1.41	2136.3
2	15 x 15	15	3	7.98	4	2.18	2364.4	7.49	5	1.07	2219.3	7.19	5.5	0.98	2130.4
3	15 x 15	15	3	7.96	4	1.53	2358.5	7.47	5	1.20	2213.3	7.18	5.5	2.28	2127.4
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**7.96±0.02**	**4**	**1.83±0.32**	**2359.5±4.5**	**7.50±0.03**	**5**	**1.24±0.20**	**2221.23±9.1**	**7.19±0.03**	**5.5**	**1.56±0.45**	**2131.3±4.5**
4	15 x 15	15	5	7.91	4	2.59	2343.7	7.45	5	1.48	2207.4	7.21	5.5	1.41	2136.3
5	15 x 15	15	5	7.99	4	1.78	2367.4	7.47	5	1.61	2213.3	7.22	5.5	2.12	2139.3
6	15 x 15	15	5	7.92	4	1.15	2346.7	7.48	5	1.20	2216.3	7.17	5.5	1.27	2124.4
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**7.94±0.04**	**4**	**1.84±0.72**	**2352.6±12.9**	**7.47±0.02**	**5**	**1.43±0.21**	**2212.33±4.5**	**7.20±0.02**	**5.5**	**1.60±0.46**	**2133.4±7.8**
7	15 x 15	15	7	7.94	4	1.66	2352.6	7.49	5	1.07	2219.3	7.16	5.5	1.70	2121.5
8	15 x 15	15	7	7.69	4	1.85	2325.9	7.52	5	1.33	2228.1	7.18	5.5	1.41	2127.4
9	15 x 15	15	7	7.98	4	2.18	2364.4	7.51	5	1.60	2225.2	7.21	5.5	1.55	2136.3
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**7.87±0.07**	**4**	**1.90±0.26**	**2347.6±19.7**	**7.51±0.02**	**5**	**1.33±0.26**	**2224.2±4.5**	**7.18±0.02**	**5.5**	**1.55±0.15**	**2128.4±7.5**
10	15 x 15	15	28	7.98	4	1.92	2364.4	7.47	5	1.20	2213.3	7.18	5.5	1.99	2127.4
11	15 x 15	15	28	7.99	4	2.57	2367.4	7.53	5	1.99	2231.1	7.16	5.5	1.56	2121.5
12	15 x 15	15	28	7.95	4	1.53	2355.6	7.52	5	1.46	2228.1	7.21	5.5	1.69	2136.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**7.97±0.02**	**4**	**2.0±0.52**	**2362.4±6.2**	**7.51±0.03**	**5**	**1.55±0.40**	**2224.1±9.5**	**7.18±0.03**	**5.5**	**1.75±0.22**	**2128.4±7.5**
13	15 x 15	15	45	7.97	4	1.27	2361.5	7.51	5	1.60	2225.2	7.22	5.5	2.85	2139.3
14	15 x 15	15	45	7.93	4	1.28	2349.6	7.45	5	1.61	2207.4	7.21	5.5	1.55	2136.3
15	15 x 15	15	45	7.98	4	2.44	2364.4	7.49	5	1.07	2219.3	7.18	5.5	1.84	2127.4
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7.96±0.03**	**4**	**1.66±0.67**	**2358.5±7.8**	**7.48±0.03**	**5**	**1.43±0.31**	**2217.3±9.1**	**7.20±0.03**	**5.5**	**2.08±0.68**	**2134.3±6.2**

ต่อ ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%				Foam 75%				Foam 90%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	6.71	6	2.08	1988.1	6.27	12	2.08	1857.8	5.72	16	2.27	1694.8
2	15 x 15	15	3	6.73	6	1.35	1994.1	6.37	12	1.35	1887.4	5.67	16	1.76	1680.0
3	15 x 15	15	3	6.74	6	1.78	1997.0	6.32	12	1.78	1872.6	5.68	16	1.76	1683.0
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**6.73±0.03**	**6**	**1.74±0.66**	**1993.0±10.3**	**6.32±0.05**	**12**	**1.74±0.24**	**1872.60±14.8**	**5.69±0.03**	**16**	**1.93±0.29**	**1685.9±0.03**
4	15 x 15	15	5	6.72	6	2.24	1991.1	6.36	12	2.24	1884.4	5.72	16	1.57	1694.8
5	15 x 15	15	5	6.64	6	1.79	1967.4	6.27	12	1.79	1857.8	5.63	16	2.13	1668.1
6	15 x 15	15	5	6.73	6	2.12	1994.1	6.24	12	2.12	1848.9	5.64	16	1.77	1671.1
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**6.70±0.07**	**6**	**2.05±0.46**	**1984.2±20.2**	**6.29±0.06**	**12**	**2.05±0.36**	**1863.7±18.5**	**5.66±0.05**	**16**	**1.82±0.28**	**1678.0±0.03**
7	15 x 15	15	7	6.69	6	1.80	1982.2	6.26	12	1.80	1854.8	5.67	16	2.82	1680.0
8	15 x 15	15	7	6.71	6	1.50	1988.1	6.29	12	1.50	1863.7	5.61	16	2.14	1662.2
9	15 x 15	15	7	6.64	6	2.23	1967.4	6.21	12	2.23	1840.0	5.67	16	2.29	1680.0
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**6.68±0.04**	**6**	**1.84±0.15**	**1979.2±11.2**	**6.25±0.04**	**12**	**1.84±0.32**	**1852.8±12.0**	**5.65±0.03**	**16**	**2.42±0.36**	**1674.0±0.03**
10	15 x 15	15	28	6.72	6	2.41	1991.1	6.30	12	2.41	1866.7	5.71	16	1.75	1691.9
11	15 x 15	15	28	6.59	6	1.95	1952.6	6.24	12	1.95	1848.9	5.68	16	1.58	1683.0
12	15 x 15	15	28	6.61	6	1.34	1958.5	6.33	12	1.34	1875.6	5.58	16	1.79	1653.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**6.64±0.03**	**6**	**1.90±0.22**	**1967.4±9.1**	**6.29±0.05**	**12**	**1.90±0.23**	**1863.7±13.6**	**5.66±0.07**	**16**	**1.71±0.11**	**1676.0±0.03**
13	15 x 15	15	45	6.64	6	2.58	1967.4	6.22	12	2.58	1843.0	5.76	16	2.26	1706.7
14	15 x 15	15	45	6.62	6	1.93	1961.5	6.31	12	1.93	1869.6	5.72	16	2.10	1694.8
15	15 x 15	15	45	6.58	6	1.49	1949.6	6.23	12	1.49	1845.9	5.66	16	1.77	1677.0
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**6.61±0.08**	**6**	**2.00±0.68**	**1959.5±24.1**	**6.25±0.05**	**12**	**2.00±0.81**	**1852.8±14.6**	**5.71±0.05**	**16**	**2.04±0.25**	**1692.8±0.03**

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%				Foam 30%				Foam 45%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	7.95	4	1.79	2355.6	7.47	5	1.20	2213.3	7.21	5	1.39	2136.3
2	15 x 15	15	3	7.98	4	2.18	2364.4	7.48	5	1.74	2216.3	7.22	5	1.80	2139.3
3	15 x 15	15	3	7.96	4	1.53	2358.5	7.53	5	2.79	2231.1	7.23	5	1.94	2142.2
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**7.96±0.02**	**4**	**1.83±0.32**	**2359.5±4.5**	**7.49±0.02**	**5**	**1.91±0.81**	**2220.2±9.5**	**7.22±0.01**	**5**	**1.71±0.29**	**2139.2±3.0**
4	15 x 15	15	5	7.91	4	2.59	2343.7	7.51	5	1.33	2225.2	7.24	5	1.93	2145.2
5	15 x 15	15	5	7.99	4	1.78	2367.4	7.49	5	1.60	2219.3	7.26	5	2.62	2151.1
6	15 x 15	15	5	7.92	4	1.15	2346.7	7.51	5	1.07	2225.2	7.24	5	1.80	2145.2
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**7.94±0.04**	**4**	**1.84±0.72**	**2352.6±12.9**	**7.50±0.02**	**5**	**1.33±0.27**	**2223.2±3.4**	**7.25±0.01**	**5**	**2.12±0.44**	**2147.1±3.4**
7	15 x 15	15	7	7.94	4	1.66	2352.6	7.49	5	1.34	2219.3	7.23	5	1.11	2142.2
8	15 x 15	15	7	7.69	4	1.85	2325.9	7.48	5	1.60	2216.3	7.28	5	1.92	2157.0
9	15 x 15	15	7	7.98	4	2.18	2364.4	7.51	5	1.46	2225.2	7.22	5	1.52	2139.3
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**7.87±0.07**	**4**	**1.90±0.26**	**2347.6±19.7**	**7.49±0.02**	**5**	**1.47±0.13**	**2220.27±4.5**	**7.24±0.03**	**5**	**1.52±0.41**	**2146.1±9.5**
10	15 x 15	15	28	7.98	4	1.92	2364.4	7.47	5	1.34	2213.3	7.27	5	2.06	2154.1
11	15 x 15	15	28	7.99	4	2.57	2367.4	7.52	5	2.13	2228.1	7.26	5	2.34	2151.1
12	15 x 15	15	28	7.95	4	1.53	2355.6	7.56	5	1.32	2240.0	7.22	5	1.66	2139.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**7.97±0.02**	**4**	**2.01±0.52**	**2362.4±7.8**	**7.52±0.02**	**5**	**1.60±0.46**	**2227.13±13.4**	**7.25±0.03**	**5**	**2.02±0.34**	**2148.1±1.8**
13	15 x 15	15	45	7.97	4	1.27	2361.5	7.54	5	2.65	2234.1	7.28	5	2.34	2157.0
14	15 x 15	15	45	7.93	4	1.28	2349.6	7.45	5	1.21	2207.4	7.28	5	2.88	2157.0
15	15 x 15	15	45	7.98	4	2.44	2364.4	7.49	5	1.34	2219.3	7.29	5	2.74	2160.0
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7.96±0.03**	**4**	**1.66±0.67**	**2358.5±6.2**	**7.49±0.02**	**5**	**1.73±0.80**	**2220.2±13.4**	**7.28±0.01**	**5**	**2.65±0.29**	**2158.0±1.7**

ต่อ ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%				Foam 75%				Foam 90%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	6.72	6.5	2.08	1991.1	6.31	12	1.90	1869.6	5.58	15.5	1.79	1653.3
2	15 x 15	15	3	6.69	6.5	1.49	1982.2	6.29	12	1.59	1863.7	5.61	15.5	2.32	1662.2
3	15 x 15	15	3	6.72	6.5	1.79	1991.1	6.32	12	2.22	1872.6	5.67	15.5	1.94	1680.0
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**6.71±0.02**	**6.5**	**1.79±0.29**	**1988.1±5.1**	**6.31±0.02**	**12**	**1.90±0.31**	**1868.6±4.5**	**5.62±0.05**	**15.5**	**2.02±0.27**	**1665.1±13.6**
4	15 x 15	15	5	6.71	6.5	1.92	1988.1	6.28	12	1.59	1860.7	5.71	15.5	1.75	1691.9
5	15 x 15	15	5	6.68	6.5	2.54	1979.3	6.28	12	1.91	1860.7	5.58	15.5	1.97	1653.3
6	15 x 15	15	5	6.71	6.5	1.94	1988.1	6.25	12	2.08	1851.9	5.59	15.5	2.68	1656.3
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**6.70±0.02**	**6.5**	**2.13±0.36**	**1985.1±5.1**	**6.27±0.02**	**12**	**1.86±0.25**	**1857.7±5.1**	**5.63±0.07**	**15.5**	**2.13±0.49**	**1667.1±21.4**
7	15 x 15	15	7	6.65	6.5	1.50	1970.4	6.32	12	2.53	1872.6	5.68	15.5	1.58	1683.0
8	15 x 15	15	7	6.74	6.5	1.93	1997.0	6.29	12	1.59	1863.7	5.59	15.5	1.79	1656.3
9	15 x 15	15	7	6.68	6.5	2.54	1979.3	6.31	12	1.58	1869.6	5.57	15.5	1.80	1650.4
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**6.69±0.05**	**6.5**	**1.99±0.52**	**1982.2±13.6**	**6.31±0.02**	**12**	**1.90±0.55**	**1868.6±4.5**	**5.61±0.04**	**15.5**	**1.72±0.12**	**1663.2±17.4**
10	15 x 15	15	28	6.72	6.5	1.93	1991.1	6.33	12	1.90	1875.6	5.59	15.5	2.33	1656.3
11	15 x 15	15	28	6.78	6.5	2.21	2008.9	6.29	12	1.59	1863.7	5.51	15.5	1.81	1632.6
12	15 x 15	15	28	6.63	6.5	1.51	1964.4	6.28	12	2.23	1860.7	5.58	15.5	1.79	1653.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**6.75±0.08**	**6.5**	**2.07±0.35**	**2000.0± 24.3**	**6.31±0.03**	**12**	**1.75±0.32**	**1869.65±7.8**	**5.55±0.06**	**15.5**	**2.07±0.30**	**1644.4±12.9**
13	15 x 15	15	45	6.71	6.5	1.94	1988.1	6.24	12	2.08	1848.9	5.66	15.5	2.47	1677.0
14	15 x 15	15	45	6.67	6.5	2.10	1976.3	6.25	12	2.08	1851.9	5.59	15.5	1.97	1656.3
15	15 x 15	15	45	6.78	6.5	2.51	2008.9	6.31	12	2.54	1869.6	5.53	15.5	1.99	1638.5
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**6.72±0.06**	**6.5**	**2.18±0.29**	**1991.1±16.5**	**6.27±0.04**	**12**	**2.23±0. 26**	**1856.80±11.2**	**5.59±0.07**	**15.5**	**2.14±0.29**	**1657.2±19.3**

ตารางที่ ค-4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 1.0-1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%				Foam 30%				Foam 45%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	7.95	4	1.79	2355.6	7.43	4	1.46	2201.5	7.21	5	1.41	2136.3
2	15 x 15	15	3	7.98	4	2.18	2364.4	7.42	4	1.07	2198.5	7.18	5	0.98	2127.4
3	15 x 15	15	3	7.96	4	1.53	2358.5	7.41	4	1.20	2195.6	7.19	5	2.28	2130.4
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**7.96±0.02**	**4**	**1.83±0.32**	**2359.5±4.5**	**7.42±0.01**	**4**	**1.24±0.20**	**2198.5±3.0**	**7.19±0.02**	**5**	**1.56±0.53**	**2131.3±4.5**
4	15 x 15	15	5	7.91	4	2.59	2343.7	7.41	4	1.48	2195.6	7.18	5	1.41	2127.4
5	15 x 15	15	5	7.99	4	1.78	2367.4	7.43	4	1.61	2201.5	7.21	5	2.12	2136.3
6	15 x 15	15	5	7.92	4	1.15	2346.7	7.41	4	1.20	2195.6	7.15	5	1.27	2118.5
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**7.94±0.04**	**4**	**1.84±0.72**	**2352.6±12.9**	**7.42±0.01**	**4**	**1.43±0.16**	**2197.5±3.4**	**7.18±0.03**	**5**	**1.60±0.27**	**2127.4±8.9**
7	15 x 15	15	7	7.94	4	1.66	2352.6	7.39	4	1.07	2189.6	7.14	5	1.70	2115.6
8	15 x 15	15	7	7.69	4	1.85	2325.9	7.38	4	1.33	2186.7	7.18	5	1.41	2127.4
9	15 x 15	15	7	7.98	4	2.18	2364.4	7.42	4	1.60	2198.5	7.19	5	1.55	2130.4
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**7.87±0.07**	**4**	**1.90±0.26**	**2347.6±19.7**	**7.40±0.02**	**4**	**1.33±0.42**	**2191.6±6.2**	**7.17±0.03**	**5**	**1.55±0.29**	**2124.4±7.8**
10	15 x 15	15	28	7.98	4	1.92	2364.4	7.41	4	1.20	2195.6	7.18	5	1.99	2127.4
11	15 x 15	15	28	7.99	4	2.57	2367.4	7.42	4	1.99	2198.5	7.14	5	1.56	2115.6
12	15 x 15	15	28	7.95	4	1.53	2355.6	7.43	4	1.46	2201.5	7.21	5	1.69	2133.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**7.97±0.02**	**4**	**2.01±0.52**	**2362.4±6.2**	**7.42±0.01**	**4**	**1.55±0.51**	**2198.53±3.0**	**7.18±0.03**	**5**	**1.75±0.21**	**2125.4±9.1**
13	15 x 15	15	45	7.97	4	1.27	2361.5	7.42	4	1.60	2198.5	7.21	5	2.85	2136.3
14	15 x 15	15	45	7.93	4	1.28	2349.6	7.39	4	1.61	2189.6	7.17	5	1.55	2124.4
15	15 x 15	15	45	7.98	4	2.44	2364.4	7.42	4	1.07	2198.5	7.22	5	1.84	2139.3
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7.96±0.03**	**4**	**1.66±0.67**	**2358.5±7.8**	**7.41±0.02**	**4**	**1.43±0.36**	**2195.5±5.1**	**7.20±0.03**	**5**	**2.08±0.37**	**2133.3±7.8**

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนัก การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตแบบขนาด 1.0-1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%				Foam 75%				Foam 90%			
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)	Weight (kg)	Slump (cm)	Absorption (%)	Density (kg/m^3)
1	15 x 15	15	3	6.73	6	2.08	1994.1	6.27	10	1.55	1857.8	5.72	14	2.27	1694.8
2	15 x 15	15	3	6.67	6	1.35	1976.3	6.37	10	1.24	1887.4	5.67	14	1.76	1680.0
3	15 x 15	15	3	6.73	6	1.78	1994.1	6.32	10	1.71	1872.6	5.68	14	1.76	1683.0
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**6.71±0.02**	**6**	**1.74±0.25**	**1988.1±4.5**	**6.32±0.02**	**10**	**1.50±0.47**	**1872.6±4.5**	**5.69±0.05**	**14**	**1.93±0.26**	**1685.9±14.0**
4	15 x 15	15	5	6.69	6	2.24	1982.2	6.36	10	1.81	1884.4	5.72	14	1.57	1694.8
5	15 x 15	15	5	6.72	6	1.79	1991.1	6.27	10	1.24	1857.8	5.63	14	2.13	1668.1
6	15 x 15	15	5	6.59	6	2.12	1952.6	6.24	10	1.86	1848.9	5.64	14	1.77	1671.1
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**6.67±0.05**	**6**	**2.05±0.47**	**1975.3±14.6**	**6.29±0.07**	**10**	**1.64±0.18**	**1863.70±19.7**	**5.66±0.07**	**14**	**1.82±0.40**	**1678.0±21.8**
7	15 x 15	15	7	6.68	6	1.80	1979.3	6.26	10	2.01	1854.8	5.67	14	2.82	1680.0
8	15 x 15	15	7	6.67	6	1.50	1976.3	6.29	10	1.39	1863.7	5.61	14	2.14	1662.2
9	15 x 15	15	7	6.74	6	2.23	1997.0	6.21	10	1.84	1840.0	5.67	14	2.29	1680.0
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**6.70±0.04**	**6**	**1.84±0.53**	**1984.2±10.7**	**6.25±0.05**	**10**	**1.75±0.49**	**1852.8±14.8**	**5.65±0.08**	**14**	**2.42±0.42**	**1674.0±22.2**
10	15 x 15	15	28	6.65	6	2.41	1970.4	6.30	10	1.68	1866.7	5.71	14	1.75	1691.9
11	15 x 15	15	28	6.67	6	1.95	1976.3	6.24	10	1.38	1848.9	5.68	14	1.58	1683.0
12	15 x 15	15	28	6.71	6	1.34	1988.1	6.33	10	1.84	1875.6	5.58	14	1.79	1653.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**6.68±0.07**	**6**	**1.90±0.64**	**1978.2±10.7**	**6.29±0.06**	**10**	**1.63±0.42**	**1863.7±17.4**	**5.66±0.04**	**14**	**1.71±0.36**	**1676.0±10.7**
13	15 x 15	15	45	6.58	6	2.58	1949.6	6.22	10	1.53	1843.0	5.76	14	2.26	1706.7
14	15 x 15	15	45	6.73	6	1.93	1994.1	6.31	10	10	1869.6	5.72	14	2.10	1694.8
15	15 x 15	15	45	6.71	6	1.49	1988.1	6.23	10	10	1845.9	5.66	14	1.77	1677.0
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**6.67±0.03**	**6**	**2.00±0.15**	**1977.2±9.1**	**6.25±0.03**	**10**	**7.18±0.25**	**1852.8±7.5**	**5.71±0.03**	**14**	**2.04±0.54**	**1692.8±9.1**

ตารางที่ ค-5 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%		Foam 30%		Foam 45%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	590	267.3	360	163.1	320	145.0
2	15 x 15	15	3	570	258.2	375	169.9	315	142.7
3	15 x 15	15	3	610	276.4	340	154.0	340	154.0
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**590**	**267.3±9.06**	**358**	**162.3±7.96**	**325**	**147.2±5.99**
4	15 x 15	15	5	680	308.1	410	185.8	400	181.2
5	15 x 15	15	5	705	319.4	430	194.8	390	176.7
6	15 x 15	15	5	710	321.7	415	188.0	415	188.0
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**698**	**316.4±7.28**	**418**	**189.5±4.72**	**401**	**182.0±5.70**
7	15 x 15	15	7	750	339.8	470	212.9	475	215.2
8	15 x 15	15	7	760	344.3	490	222.0	440	199.3
9	15 x 15	15	7	780	353.4	485	219.7	465	210.7
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**763**	**345.8±6.92**	**481**	**218.2±4.72**	**460**	**208.4±8.17**
10	15 x 15	15	28	1180	534.6	890	403.2	750	339.8
11	15 x 15	15	28	1250	566.3	820	371.5	730	330.7
12	15 x 15	15	28	1320	598.0	780	353.4	770	348.9
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**1250**	**566.3±31.71**	**830**	**376.0±25.22**	**750**	**339.8±9.06**
13	15 x 15	15	45	1350	611.6	850	385.1	780	353.4
14	15 x 15	15	45	1300	589.0	890	403.2	760	344.3
15	15 x 15	15	45	1290	584.4	890	403.2	790	357.9
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**1313**	**595.0±14.56**	**876**	**397.2±10.46**	**776**	**351.9±6.92**

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%		Foam 75%		Foam 90%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	250	113.3	175	79.3	165	74.8
2	15 x 15	15	3	270	122.3	160	72.5	140	63.4
3	15 x 15	15	3	235	106.5	145	65.7	155	70.2
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**251**	**114.0±7.96**	**160**	**72.5±6.80**	**153**	**69.5±5.70**
4	15 x 15	15	5	275	124.6	180	81.5	185	83.8
5	15 x 15	15	5	290	131.4	190	86.1	190	86.1
6	15 x 15	15	5	300	135.9	185	83.8	200	90.6
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**288**	**130.6±5.70**	**185**	**83.8±2.27**	**191**	**86.8±3.46**
7	15 x 15	15	7	350	158.6	235	106.5	225	101.9
8	15 x 15	15	7	335	151.8	255	115.5	230	104.2
9	15 x 15	15	7	370	167.6	245	111.0	240	108.7
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**351**	**159.3±21.43**	**245**	**111.0±10.00**	**231**	**104.9±3.46**
10	15 x 15	15	28	600	271.8	500	226.5	480	217.5
11	15 x 15	15	28	570	258.2	520	235.6	460	208.4
12	15 x 15	15	28	610	276.4	480	217.5	490	222.0
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**59**	**268.8±14.81**	**500.0**	**226.5±20.00**	**476**	**216.0±6.92**
13	15 x 15	15	45	650	294.5	550	249.2	495	224.3
14	15 x 15	15	45	680	308.1	530	240.1	480	217.5
15	15 x 15	15	45	630	285.4	515	233.3	500	226.5
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**653**	**296.0±22.37**	**531**	**240.9±17.56**	**491**	**222.8±4.72**

ตารางที่ ค-6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%		Foam 30%		Foam 45%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	590	267.3	380	172.2	335	151.8
2	15 x 15	15	3	570	258.2	365	165.4	315	142.7
3	15 x 15	15	3	610	276.4	370	167.6	360	163.1
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**590**	**267.3±9.06**	**371**	**168.4±3.46**	**336**	**152.5±10.21**
4	15 x 15	15	5	680	308.1	420	190.3	420	190.3
5	15 x 15	15	5	705	319.4	420	190.3	380	172.2
6	15 x 15	15	5	710	321.7	445	201.6	395	179.0
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**698**	**316.4±7.28**	**428**	**194.0±4.53**	**398**	**180.5±9.15**
7	15 x 15	15	7	750	339.8	460	208.4	455	206.1
8	15 x 15	15	7	760	344.3	510	231.1	460	208.4
9	15 x 15	15	7	780	353.4	495	224.3	485	219.7
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**763**	**345.8±6.92**	**488**	**221.2±4.53**	**466**	**211.4±7.28**
10	15 x 15	15	28	1180	534.6	880	398.7	780	353.4
11	15 x 15	15	28	1250	566.3	870	394.2	790	357.9
12	15 x 15	15	28	1320	598.0	830	376.0	760	344.3
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**1250**	**566.3±31.71**	**860**	**389.6±9.52**	**776**	**351.8±6.92**
13	15 x 15	15	45	1350	611.6	870	394.2	800	362.4
14	15 x 15	15	45	1300	589.0	890	403.2	810	367.0
15	15 x 15	15	45	1290	584.4	900	407.7	790	357.9
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**1313**	**595.0±14.56**	**886**	**401.7±9.05**	**800**	**362.4±4.53**

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาดน้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%		Foam 75%		Foam 90%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	260	117.8	185	83.8	135	61.2
2	15 x 15	15	3	245	111.0	150	68.0	150	68.0
3	15 x 15	15	3	235	106.5	165	74.8	125	56.6
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**246**	**111.8±5.70**	**166**	**75.5±7.96**	**136**	**61.9±5.70**
4	15 x 15	15	5	295	133.7	170	77.0	165	74.8
5	15 x 15	15	5	260	117.8	180	81.5	180	81.5
6	15 x 15	15	5	310	140.4	205	92.9	210	95.1
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**288**	**130.6±11.62**	**185**	**83.8±8.17**	**185**	**83.8±10.38**
7	15 x 15	15	7	360	163.1	225	101.9	235	106.5
8	15 x 15	15	7	355	160.8	260	117.8	220	99.7
9	15 x 15	15	7	380	172.2	255	115.5	230	104.2
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**365**	**165.4±5.99**	**246**	**111.7±8.58**	**228**	**103.5±3.46**
10	15 x 15	15	28	610	276.4	490	222.0	450	203.9
11	15 x 15	15	28	580	262.8	520	235.6	440	199.3
12	15 x 15	15	28	625	283.2	515	233.3	480	217.5
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**605**	**274.1±10.38**	**508**	**230.3±7.28**	**456**	**206.9±9.43**
13	15 x 15	15	45	630	285.4	530	240.1	520	235.6
14	15 x 15	15	45	640	290.0	540	244.6	510	231.1
15	15 x 15	15	45	635	287.7	535	242.4	530	240.1
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**635**	**287.7±2.27**	**535**	**242.4±2.27**	**520**	**235.6±4.53**

ตารางที่ ค-7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%		Foam 30%		Foam 45%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	590	267.3	340	154.0	305	138.2
2	15 x 15	15	3	570	258.2	320	145.0	330	149.5
3	15 x 15	15	3	610	276.4	335	151.8	290	131.4
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**590**	**267.3±9.06**	**331**	**150.3±4.72**	**308**	**139.7±9.15**
4	15 x 15	15	5	680	308.1	370	167.6	350	158.6
5	15 x 15	15	5	705	319.4	400	181.2	365	165.4
6	15 x 15	15	5	710	321.7	360	163.1	380	172.2
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**698**	**316.4±7.28**	**376**	**170.6±9.43**	**365**	**165.4±6.80**
7	15 x 15	15	7	750	339.8	475	215.2	405	183.5
8	15 x 15	15	7	760	344.3	480	217.5	410	185.8
9	15 x 15	15	7	780	353.4	510	231.1	445	201.6
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**763**	**345.8±6.92**	**488**	**221.3±8.58**	**420**	**190.3±9.87**
10	15 x 15	15	28	1180	534.6	770	348.9	740	335.3
11	15 x 15	15	28	1250	566.3	800	362.4	720	326.2
12	15 x 15	15	28	1320	598.0	750	339.8	735	333.0
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**1250**	**566.3±31.71**	**773**	**350.4±11.40**	**731**	**331.5±10.41**
13	15 x 15	15	45	1350	611.6	850	385.1	750	339.8
14	15 x 15	15	45	1300	589.0	820	371.5	760	344.3
15	15 x 15	15	45	1290	584.4	830	376.0	740	335.3
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**1313**	**595.0±14.56**	**833**	**377.5±6.92**	**750**	**339.8±10.00**

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%		Foam 75%		Foam 90%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	250	113.3	145	65.7	130	58.9
2	15 x 15	15	3	240	108.7	150	68.0	155	70.2
3	15 x 15	15	3	235	106.5	160	72.5	185	83.8
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**241**	**109.5±3.46**	**151**	**68.7±3.46**	**156**	**71.0±12.61**
4	15 x 15	15	5	255	115.5	180	81.5	160	72.5
5	15 x 15	15	5	295	133.7	170	77.0	190	86.1
6	15 x 15	15	5	260	117.8	165	74.8	175	79.3
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**270**	**122.3±9.87**	**171**	**77.8±3.46**	**175**	**79.3±6.84**
7	15 x 15	15	7	350	158.6	215	97.4	230	104.2
8	15 x 15	15	7	325	147.2	235	106.5	190	86.1
9	15 x 15	15	7	340	154.0	250	113.3	225	101.9
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**338**	**153.3±5.70**	**233**	**105.7±7.96**	**215**	**97.4±9.87**
10	15 x 15	15	28	555	251.4	580	262.8	450	203.9
11	15 x 15	15	28	580	262.8	560	253.7	480	217.5
12	15 x 15	15	28	600	271.8	545	246.9	435	197.1
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**578**	**262.0±10.21**	**561**	**254.5±7.96**	**455**	**206.2±10.38**
13	15 x 15	15	45	650	294.5	565	256.0	485	219.7
14	15 x 15	15	45	630	285.4	580	262.8	455	206.1
15	15 x 15	15	45	635	287.7	590	267.3	460	208.4
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**638**	**289.2±4.72**	**578**	**262.0±5.70**	**466**	**211.4±7.28**

ตารางที่ ค-8 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 1.0-1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%		Foam 30%		Foam 45%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	590	267.3	360	163.1	335	151.8
2	15 x 15	15	3	570	258.2	340	154.0	350	158.6
3	15 x 15	15	3	610	276.4	345	156.3	330	149.5
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**590**	**267.3±9.06**	**348**	**157.8±4.72**	**338**	**153.3±4.72**
4	15 x 15	15	5	680	308.1	390	176.7	360	163.1
5	15 x 15	15	5	705	319.4	410	185.8	380	172.2
6	15 x 15	15	5	710	321.7	440	199.3	410	185.8
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**698**	**316.4±7.28**	**413**	**187.3±11.40**	**383**	**173.7±11.40**
7	15 x 15	15	7	750	339.8	495	224.3	425	192.5
8	15 x 15	15	7	760	344.3	510	231.1	420	190.3
9	15 x 15	15	7	780	353.4	505	228.8	405	183.5
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**763**	**345.8±6.92**	**503**	**228.1±3.46**	**416**	**188.8±4.72**
10	15 x 15	15	28	1180	534.6	790	357.9	730	330.7
11	15 x 15	15	28	1250	566.3	830	376.0	770	348.9
12	15 x 15	15	28	1320	598.0	790	357.9	780	353.4
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**1250**	**566.3±31.71**	**803**	**363.9±10.46**	**760**	**344.3±11.99**
13	15 x 15	15	45	1350	611.6	850	385.1	820	371.5
14	15 x 15	15	45	1300	589.0	860	389.6	810	367.0
15	15 x 15	15	45	1290	584.4	840	380.6	830	376.0
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**1313**	**595.0±14.56**	**850**	**385.1±4.53**	**820**	**371.5±4.53**

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบขนาด 1.0-1.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 60%		Foam 75%		Foam 90%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	260	117.8	165	74.8	140	63.4
2	15 x 15	15	3	250	113.3	160	72.5	175	79.3
3	15 x 15	15	3	245	111.0	185	83.8	155	70.2
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**251**	**114.0±7.64**	**170**	**77.0±5.99**	**156**	**71.0±7.96**
4	15 x 15	15	5	285	129.1	190	86.1	180	81.5
5	15 x 15	15	5	280	126.9	185	83.8	170	77.0
6	15 x 15	15	5	270	122.3	195	88.3	185	83.8
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**278**	**126.1±7.64**	**190**	**86.1±2.27**	**178**	**80.8±3.46**
7	15 x 15	15	7	340	154.0	235	106.5	210	95.1
8	15 x 15	15	7	335	151.8	245	111.0	230	104.2
9	15 x 15	15	7	360	163.1	265	120.1	205	92.9
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**345**	**156.3±5.99**	**248**	**112.5±6.92**	**215**	**97.4±5.99**
10	15 x 15	15	28	585	265.0	530	240.1	460	208.4
11	15 x 15	15	28	560	253.7	540	244.6	470	212.9
12	15 x 15	15	28	580	262.8	520	235.6	475	215.2
Average	**15 x 15**	**15**	**28**	**575**	**260.5±5.99**	**530**	**240.1±4.53**	**468**	**212.2±3.46**
13	15 x 15	15	45	620	280.9	560	253.7	500	226.5
14	15 x 15	15	45	630	285.4	530	240.1	510	231.1
15	15 x 15	15	45	615	278.6	550	249.2	490	222.0
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**621**	**281.6±3.46**	**546**	**247.7±6.92**	**500**	**226.5±4.53**

ตารางที่ ค-9 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล ความต้านทานแรงดัดของคอนกรีตแบบคละขนาด ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	Foam 0%		Foam 75%		Foam 90%	
No.	Cross Section	Height	(days)	Ultimate load (kN)	Bending Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Bending Strength (ksc)	Ultimate load (kN)	Bending Strength (ksc)
1	15 x 15	15	3	750	339.8	235	106.5	235	101.9
2	15 x 15	15	3	760	344.3	255	115.5	255	104.2
3	15 x 15	15	3	780	353.4	245	111	245	108.7
Average	**15 x 15**	**15**	**3**	**763**	**345.84±6.92**	**245**	**111.2±4.50**	**245**	**104.93±3.96**
4	15 x 15	15	5	1180	534.6	500	226.5	480	217.5
5	15 x 15	15	5	1250	566.3	520	235.6	470	208.4
6	15 x 15	15	5	1320	598	480	217.5	495	222.5
Average	**15 x 15**	**15**	**5**	**1250**	**566.3±16.44**	**500**	**226.53±9.05**	**481**	**215.97±6.93**

ตารางที่ ค-10 ผลการทดสอบความทนทานที่อุณหภูมิสูง การยุบตัว ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตผสมโฟมแบบคละขนาด

Speciment	Dimension (cm)		Slump	Ages	Burning	Weight before	Weight after	Unit weight before	Unit weight after
No.	Cross Section	Height	(cm)	(days)	(hours)	burning (kg)	burning (kg)	burning (kg)	burning (kg)
1	30 x 30	5	16	7	0	7.55	0.00	1677.78	0.00
2	30 x 30	5	16	7	0	7.68	0.00	1706.67	0.00
3	30 x 30	5	16	7	0	7.45	0.00	1655.56	0.00
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7**	**0**	**7.61±0.21**	**0.00**	**1680.00±21.12**	**0.00**
4	30 x 30	5	16	7	0.5	7.45	7.12	1655.56	1582.22
5	30 x 30	5	16	7	0.5	7.53	7.24	1673.33	1608.89
6	30 x 30	5	16	7	0.5	7.65	7.35	1700.00	1633.33
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7**	**0.5**	**7.54±0.10**	**7.24±0.12**	**1676.30±22.37**	**1608.15±25.56**
7	30 x 30	5	16	7	1	7.56	6.88	1680.00	1528.89
8	30 x 30	5	16	7	1	7.69	6.98	1708.89	1551.11
9	30 x 30	5	16	7	1	7.51	6.76	1668.89	1502.22
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7**	**1**	**7.59±0.09**	**6.87±0.11**	**1685.93±20.65**	**1527.41±24.48**
10	30 x 30	5	16	7	2	7.52	6.79	1671.11	1508.89
11	30 x 30	5	16	7	2	7.67	6.81	1704.44	1513.33
12	30 x 30	5	16	7	2	7.63	6.75	1695.56	1500.00
Average	**15 x 15**	**15**	**45**	**7**	**2**	**7.61±0.08**	**6.78±0.03**	**1690.37±17.26**	**1507.41±6.79**

ตารางที่ ค-11 ผลการทดสอบความทนทานที่อุณหภูมิสูง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแบบคละขนาด

Speciment	Dimension (cm)		Slump	Burning	Ages	Ultimate load	Compressive
No.	Cross Section	Height	(cm)	(hours)	(days)	(kN)	Strength (ksc)
1	5	10	16	0	7	223	101.0
2	5	10	16	0	7	236	106.9
3	5	10	16	0	7	238	107.8
Average	**5**	**10**	**16**	**0**	**7**	**232**	**105.2±3.70**
4	5	10	16	0.5	7	185	83.8
5	5	10	16	0.5	7	163	73.8
6	5	10	16	0.5	7	167	75.7
Average	**5**	**10**	**16**	**0.5**	**7**	**171**	**77.8±5.30**
7	5	10	16	1	7	160	72.5
8	5	10	16	1	7	155	70.2
9	5	10	16	1	7	162	73.4
Average	**5**	**10**	**16**	**1**	**7**	**159**	**72.0±1.60**
10	5	10	16	2	7	150	68.0
11	5	10	16	2	7	145	65.7
12	5	10	16	2	7	139	63.0
Average	**5**	**10**	**16**	**2**	**7**	**144**	**65.6±2.50**

ตารางที่ ค-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร แบบต่างๆ

Specimen	Dimension (cm)		Ages	0%			Foam 90%		
No.	Cross Section	Height	(days)	Weight (kg)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)	Weight (kg)	Ultimate load (kN)	Compressive Strength (ksc)
1	39 x 19	7	7	6.43	140	63.4	5.33	221	100.1
2	39 x 19	7	7	6.45	145	65.7	5.35	225	101.9
3	39 x 19	7	7	6.41	135	61.2	5.41	215	97.4
4	39 x 19	7	7	6.48	153	69.3	5.28	223	101.0
5	39 x 19	7	7	6.39	145	65.7	5.32	222	100.6
Average	**15 x 15**	**15**	**7**	**6.43**	**143**	**65.1±3.03**	**5.35**	**221**	**100.2±1.71**

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวอย่างการทดสอบสมมติฐานด้วย ANOVA

สมมติฐาน

H_0 : กลุ่มข้อมูลค่า 2 กลุ่มไม่แตกต่างกัน

กลุ่มข้อมูล

แบบไม่ผสมโฟม = 7.95, 7.98, 7.96, 7.91, 7.99, 7.92, 7.94, 7.85, 7.98, 7.98, 7.99, 7.95, 7.97, 7.93 และ 7.98

แทนที่ร้อยละ 30 = 7.51, 7.54, 7.45, 7.51, 7.49, 7.53, 7.51, 7.49, 7.52, 7.43, 7.55, 7.46, 7.52, 7.55 และ 7.48

ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนักของคอนกรีตผสมโฟมขนาดคละขนาด

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ		
	Sig.	*p*	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.175	0.05	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.000	0.05	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) = 2 กลุ่มไม่แตกต่างกัน

D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) = 2 กลุ่มแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 30 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

ผลการทดสอบทางสถิติ											
คละขนาด			น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร			0.5-1.0 เซนติเมตร			1.0-1.5 เซนติเมตร		
เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล
< 0.5 เซนติเมตร	0.867	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.571	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.770	ND	คละขนาด	0.908	ND
0.5-1.0 เซนติเมตร	0.690	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.774	ND	คละขนาด	0.690	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.774	ND
1.0-1.5 เซนติเมตร	0.908	ND	คละขนาด	0.867	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.571	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.770	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-2 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 45 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

ผลการทดสอบทางสถิติ											
คละขนาด			น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร			0.5-1.0 เซนติเมตร			1.0-1.5 เซนติเมตร		
เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล
< 0.5 เซนติเมตร	0.995	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.579	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.702	ND	คละขนาด	0.989	ND
0.5-1.0 เซนติเมตร	0.819	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.875	ND	คละขนาด	0.699	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.875	ND
1.0-1.5 เซนติเมตร	0.826	ND	คละขนาด	0.858	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.579	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.702	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-3 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 60 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

ผลการทดสอบทางสถิติ											
คละขนาด			น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร			0.5-1.0 เซนติเมตร			1.0-1.5 เซนติเมตร		
เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล
< 0.5 เซนติเมตร	0.858	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.813	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.987	ND	คละขนาด	0.826	ND
0.5-1.0 เซนติเมตร	0.699	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.821	ND	คละขนาด	0.819	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.821	ND
1.0-1.5 เซนติเมตร	0.989	ND	คละขนาด	0.995	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.813	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.987	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-4 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

ผลการทดสอบทางสถิติ											
คละขนาด			น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร			0.5-1.0 เซนติเมตร			1.0-1.5 เซนติเมตร		
เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล
< 0.5 เซนติเมตร	0.948	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.870	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.974	ND	คละขนาด	0.839	ND
0.5-1.0 เซนติเมตร	0.823	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.889	ND	คละขนาด	0.823	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.889	ND
1.0-1.5 เซนติเมตร	0.839	ND	คละขนาด	0.948	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.870	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.937	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-5 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาขนาดเศษโฟม โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมแทนที่อัตราส่วนร้อยละ 90 ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

ผลการทดสอบทางสถิติ											
คละขนาด			น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร			0.5-1.0 เซนติเมตร			1.0-1.5 เซนติเมตร		
เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล	เปรียบเทียบกับ	Sig.	ผล
< 0.5 เซนติเมตร	0.949	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.833	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.854	ND	คละขนาด	0.924	ND
0.5-1.0 เซนติเมตร	0.776	ND	1.0-1.5 เซนติเมตร	0.976	ND	คละขนาด	0.776	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.976	ND
1.0-1.5 เซนติเมตร	0.924	ND	คละขนาด	0.949	ND	< 0.5 เซนติเมตร	0.833	ND	0.5-1.0 เซนติเมตร	0.854	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-6 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่นของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ								
	P	คละขนาด		น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร		0.5-1.0 เซนติเมตร		1.0-1.5 เซนติเมตร	
		Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.05	0.270	ND	0.270	ND	0.270	ND	0.270	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 45	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 60	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 75	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 90	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-7 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ								
	P	คละขนาด		น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร		0.5-1.0 เซนติเมตร		1.0-1.5 เซนติเมตร	
		Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.05	0.406	ND	0.406	ND	0.406	ND	0.406	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.05	0.836	ND	0.158	ND	0.194	ND	0.333	ND
แทนที่ร้อยละ 45	0.05	0.069	ND	0.412	ND	0.388	ND	0.222	ND
แทนที่ร้อยละ 60	0.05	0.489	ND	0.711	ND	0.336	ND	0.662	ND
แทนที่ร้อยละ 75	0.05	0.674	ND	0.282	ND	0.452	ND	0.676	ND
แทนที่ร้อยละ 90	0.05	0.240	ND	0.369	ND	0.306	ND	0.536	ND

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-8 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การยุบตัวของคอนกรีตผสมโฟม ขนาดคละขนาด

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ								
	P	คละขนาด		น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร		0.5-1.0 เซนติเมตร		1.0-1.5 เซนติเมตร	
		Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.05	0.347	ND	0.347	ND	0.347	ND	0.347	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 45	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 60	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 75	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 90	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-9 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVAของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ น้ำหนักของคอนกรีตผสมโฟมขนาดต่างๆ

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ								
	P	คละขนาด		น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร		0.5-1.0 เซนติเมตร		1.0-1.5 เซนติเมตร	
		Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.05	0.175	ND	0.175	ND	0.175	ND	0.175	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 45	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 60	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 75	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 90	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-10 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมขนาดขนาดต่างๆ

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ								
	P	คละขนาด		น้อยกว่า 0.5 เซนติเมตร		0.5-1.0 เซนติเมตร		1.0-1.5 เซนติเมตร	
		Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล	Sig.	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.05	0.423	ND	0.423	ND	0.423	ND	0.423	ND
แทนที่ร้อยละ 30	0.05	0.002	D	0.004	D	0.001	D	0.002	D
แทนที่ร้อยละ 45	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 60	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 75	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D
แทนที่ร้อยละ 90	0.05	0.000	D	0.000	D	0.000	D	0.000	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-11 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาคุณสมบัติทางกล กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสม โฟมคละขนาด

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ		
	Sig.	*p*	ผล
แบบไม่ผสมโฟม	0.757	0.05	ND
แทนที่ร้อยละ 75	0.000	0.05	D
แทนที่ร้อยละ 90	0.000	0.05	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

ตารางที่ ง-12 ผลที่ได้จากการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ของการศึกษาความทนทานที่อุณหภูมิสูง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมโฟมคละขนาด

กลุ่ม	ผลการทดสอบทางสถิติ		
	Sig.	*p*	ผล
ไม่เผาไฟ	0.354	0.05	ND
เผาไฟ 0.5 ชั่วโมง	0.000	0.05	D
เผาไฟ 1.0 ชั่วโมง	0.000	0.05	D
เผาไฟ 2.0 ชั่วโมง	0.000	0.05	D

ND = ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) D = ปฏิเสธสมมติฐาน (H_0)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายวสุรัตน์ บุญเพ็ง

วัน/ เดือน/ ปีเกิด 7 ตุลาคม พ.ศ. 2524

ที่อยู่ 19 หมู่ 1 ตำบลย่านซื่อ อำเภอเมือง จังหวัดอ่างทอง 14000

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาอนามัยสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสมุทรปราการ พ.ศ.2546
สาธารณสุขศาสตรบัณฑิต สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช พ.ศ.2550

มัธยมศึกษา โรงเรียนอ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม พ.ศ.2540

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2546 ฝึกประสบการณ์วิชาชีพอนามัยสิ่งแวดล้อมที่
บริษัท ไทยคาร์บอนแบ็ค จำกัด (มหาชน)

พ.ศ.2548-ปัจจุบัน หัวหน้าหน่วยงานความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม
บรัษัท เอส.พี.เอ็ม. อินดัสทรี จำกัด