กำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติสำหรับใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ปภาวิน สินรัมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

COMPRESSIVE STRENGTH AND PROPERTIES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

PAPHAWIN SINRAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

MAJOR IN CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

YEAR 2012

COPY RIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง กำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติสำหรับใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ผู้วิจัย นายปภาวิน สินรัมย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภร ทวีวุฒิ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเริง รักซ้อน)

..... คณบดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นท แสงเทียน)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2555

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภร ทวีวุฒิ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการค้นคว้าข้อมูลที่หลากหลาย ความห่วงใยต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการศึกษาวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะในการศึกษาตลอดระยะเวลาการศึกษาในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทุกท่าน พร้อมทั้งคำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณน้องนักศึกษาชั้นปีที่ 3 และ 4 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่เป็นผู้ช่วยในการผลิต คอนกรีตและการทดสอบวิจัย

ขอขอบพระคุณทุกแหล่งข้อมูลที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ที่ได้ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา ภรรยา และน้องๆ ที่เป็นกำลังใจ ให้ความสนับสนุนผู้วิจัยในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปภาวิน

(นายปภาวิน สินรัมย์)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : กำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติสำหรับใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

โดย : ปภาวิน สินรัมย์

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา

ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภร ทวีวุฒิ

ศัพท์สำคัญ : คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ฟองอากาศ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นมอร์ต้าที่ผสมฟองอากาศหรือโฟมเหลว คงรูปให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบ เพื่อลดความหนาแน่นของคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าขึ้นกับค่าหน่วยน้ำหนัก คอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศมากจะมีความพรุนสูงและน้ำหนักเบา คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 800 ถึง 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 รวมทั้งหมด 860 ชิ้นตัวอย่าง ออกแบบและผลิตเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ได้ผลดังนี้ (1) กำลังรับแรงอัดที่อายุ 56 วัน สำหรับตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก มีค่าระหว่าง 17.9-241.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสำหรับตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ มีค่าระหว่าง 14.1-185.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (2) อัตราการหดตัวแบบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 0.055-0.218 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 28 วัน และอยู่ในช่วง 0.093-0.336 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 448 วัน (3) ปริมาณฟองอากาศมีค่าอยู่ในช่วง 13.35-64.74 เปอร์เซ็นต์ และ (4) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.168-0.189 วัตต์ต่อเมตร องศาเคลวิน

ABSTRACT

TITLE : COMPRESSIVE STRENGTH AND PROPERTIES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

BY : PAPHAWIN SINRAM

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : CIVIL ENGINEERING

CHAIR : ASST. PROF. THANAPON THAVEEVOUTHTI, Ph.D.

KEYWORDS : CELLULAR LIGTHWEIGHT CONCRETE / COMPRESSIVE STRENGTH / DRYING SHINKAGE / AIR VOID CONTENT / THERMAL CONDUCTIVITY

Cellular lightweight concrete is mortar mixed with air bubbles made from pre-formed foam. Air bubble, uniformly distributed over the body of concrete, is used in replacement of coarse aggregate to reduce the density of concrete. The properties of cellular lightweight concrete are influenced by its unit weight or air voids. A large volume of air voids entrapped in concrete give high porosity there by offering lightweight. Cellular lightweight concrete with unit weights starting from 800 kg/m^3 to 1800 kg/m^3 using water to cement ratios of 0.45 and 0.55 and sand to cement ratios of 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 and 3:1 with a total of 860 specimens are designed and produced for studying its properties. The results are as follows (1) compressive strength of standard cylinder ranged from 17.9 to 241.6 ksc (2) maximum value of drying shrinkage for an age 448 days at approximately -0.34 % (3) air void content values varied between 13.35 to 64.74 % and (4) The range of thermal conductivity coefficient found in between 0.168 and 0.189 Watt/mK.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ข**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ค**
สารบัญ	**ง**
สารบัญตาราง	**ฉ**
สารบัญภาพ	**ซ**
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 สมมุติฐานในการวิจัย	3
1.5 การนำเสนอ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอนกรีตเบา	4
2.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	11
2.3 กำลังรับแรงอัด	16
2.4 การหดตัวแบบแห้ง	25
2.5 ฟองอากาศในคอนกรีต	36
2.6 การนำความร้อน	40
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 บทนำ	49
3.2 ตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ	49
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	52
3.4 การทดลองหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา แบบเซลลูล่า	54
3.5 การทดสอบปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	60
4 ผลการศึกษา	
4.1 บทนำ	63
4.2 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	63
4.3 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	79
4.4 ปริมาณฟองอากาศอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	88
4.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	93
4.6 กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	98
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 ปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	101
5.2 ค่ากำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	102
5.3 การนำไปใช้งาน	103
5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาและทดสอบ	105
เอกสารอ้างอิง	**119**
ภาคผนวก	
ก วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	111
ข ข้อมูลผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	116
ค ข้อมูลผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	120
ง ข้อมูลผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	121
ประวัติผู้วิจัย	**122**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมเบา	5
2.2	กำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามหน่วยน้ำหนัก	9
2.3	เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติ	15
2.4	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมวลเบายี่ห้อต่างๆ	16
2.5	ค่าหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่างๆ	36
2.6	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	42
2.7	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานทดสอบและขนาดแผ่นให้ความร้อน	48
3.1	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	50
3.2	จำนวนตัวอย่างทดสอบ	51
3.3	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร	51
3.4	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลกำลังรับแรงอัด	54
3.5	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลการหดตัวแบบแห้ง	56
3.6	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	62
4.1	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก	64
4.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์	65
4.3	อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก	74
4.4	อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์	75
4.5	การเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักคอนกรีต ที่อายุ 56 วัน	78
4.6	ผลการทดลองการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	79
4.7	เปรียบเทียบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตชนิดอื่นๆ	86
4.8	ปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	89
4.9	ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	93
4.10	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	96
4.11	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด	99
4.13	ค่าเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง	100

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ประเภทของคอนกรีตเบา	5
2.2	(ก) เตาเผา (ข) มวลรวมเบาที่ได้จากดินที่มีองค์ประกอบทางเคมีพิเศษ	7
2.3	มวลรวมเบาที่ได้จากดินดานผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้ว	7
2.4	มวลรวมเบาที่ได้จากเถ้าลอย	7
2.5	มวลรวมที่ได้จากขี้เถ้า	8
2.6	มวลเบาที่ได้จากเถ้าหนัก	8
2.7	พฤติกรรมความเค้น – ความเครียด ภายใต้แรงอัด	17
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัด	17
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของช่องว่างขนาดต่างๆ กับระดับการไฮเดรชั่น	18
2.10	การล็อกจับระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีรูปร่าง (ก) เหลี่ยม และ (ข) กลม	19
2.11	พัฒนาการของกำลังตามอายุคอนกรีต	20
2.12	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก	20
2.13	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปพีระมิด	21
2.14	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกต้อง (T = Tensile Crack)	21
2.15	แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาขี่ห้อ LCM ที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ	22
2.16	การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีต	26
2.17	การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น	27
2.18	การระเหยของน้ำในโพรง (ก) แรงดึงในโพรงทำให้คอนกรีตหดตัว (ข)	28
2.19	การแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง	29
2.20	การหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์	30
2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของมวลรวมกับการหดตัว	31
2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำทั้งหมดและการหดตัวแบบแห้ง	32
2.23	การเปลี่ยนแปลงทางความยาวของตัวอย่างที่บ่มแตกต่างกัน	33
2.24	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในคอนกรีต	33
2.25	(ก)ลักษณะโพรงอากาศแบบปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ข) ลักษณะโพรงอากาศแบบเปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ	37
2.26	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนประเภทใยและผง	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับความพรุน	43
2.28	ภาพตัดด้านข้างชุดวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำการความร้อนด้วยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate	47
3.1	เครื่องกดทดสอบกำลังรับแรงอัด	53
3.2	หน้าปัดอ่านค่าของเครื่องวัดเปรียบเทียบความยาว	55
3.3	(ก) แท่งตัวอย่างทดสอบและแท่งอ้างอิง (ข) การตั้งค่าแท่งอ้างอิงเท่ากับศูนย์ และ (ค) การอ่านค่าแท่งตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	55
3.4	หน้าจอกำหนดค่าต่างๆ ในโปรแกรม (ก) Size of Aggregate (ข) Batch Weights or paste/agg (ค) Paste/agg volume ratio (ง) Threshold Value	57
3.5	ผลการคำนวณจากโปรแกรมในรูปแบบไฟล์ Word	57
3.6	ภาพวงกลมที่ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop วาด	58
3.7	ภาพวงกลมเมื่อนำเข้าประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer	58
3.8	ภาพผลการตรวจสอบเทียบความถูกต้องโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer	59
3.9	ชุดเครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	60
3.10	โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์	60
3.11	เครื่องวัดอ่านค่าอุณหภูมิ และเครื่องสลับจุดวัดอ่านค่าอุณหภูมิ	61
3.12	เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าแผ่นทำความร้อนส่วนกลาง	61
4.1	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 28 วัน	66
4.2	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 56 วัน	67
4.3	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 28 วัน	68
4.4	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 56 วัน	69
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 28 วัน	70
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 56 วัน	71
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน	72

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญภาพ ช

บทที่

1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 สมมุติฐานในการวิจัย 3

1.5 การนำเสนอ 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตเบา 4

2.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 11

2.3 กำลังรับแรงอัด 16

2.4 การหดตัวแบบแห้ง 25

2.5 ฟองอากาศในคอนกรีต 36

2.6 การนำความร้อน 40

3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ 49

3.2 ตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ 49

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 52

3.4 การทดลองหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา แบบเซลลูล่า 54

3.5 การทดสอบปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	60
4 ผลการศึกษา	
4.1 บทนำ	63
4.2 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	63
4.3 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	79
4.4 ปริมาณฟองอากาศอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	88
4.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	93
4.6 กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	98
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 ปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	101
5.2 ค่ากำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	102
5.3 การนำไปใช้งาน	103
5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาและทดสอบ	105
เอกสารอ้างอิง	**119**
ภาคผนวก	
ก วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	111
ข ข้อมูลผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	116
ค ข้อมูลผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	120
ง ข้อมูลผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	121
ประวัติผู้วิจัย	**122**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมเบา	5
2.2	กำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามหน่วยน้ำหนัก	9
2.3	เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติ	15
2.4	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมวลเบายี่ห้อต่างๆ	16
2.5	ค่าหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่างๆ	36
2.6	ค่าสัมประสิทธ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	42
2.7	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานทดสอบและขนาดแผ่นให้ความร้อน	48
3.1	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	50
3.2	จำนวนตัวอย่างทดสอบ	51
3.3	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร	51
3.4	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลกำลังรับแรงอัด	54
3.5	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลการหดตัวแบบแห้ง	56
3.6	ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	62
4.1	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก	64
4.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์	65
4.3	อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก	74
4.4	อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์	75
4.5	การเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักคอนกรีต ที่อายุ 56 วัน	78
4.6	ผลการทดลองการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	79
4.7	เปรียบเทียบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตชนิดอื่นๆ	86
4.8	ปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	89
4.9	ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	93
4.10	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	96
4.11	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด	99
4.13	ค่าเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง	100

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ประเภทของคอนกรีตเบา	5
2.2	(ก) เตาเผา (ข) มวลรวมเบาที่ได้จากดินที่มีองค์ประกอบทางเคมีพิเศษ	7
2.3	มวลรวมเบาที่ได้จากดินดานผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้ว	7
2.4	มวลรวมเบาที่ได้จากเถ้าลอย	7
2.5	มวลรวมที่ได้จากขี้เถ้า	8
2.6	มวลเบาที่ได้จากเถ้าหนัก	8
2.7	พฤติกรรมความเค้น – ความเครียด ภายใต้แรงอัด	17
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัด	17
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของช่องว่างขนาดต่างๆ กับระดับการไฮเดรชั่น	18
2.10	การล็อกจับระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีรูปร่าง (ก) เหลี่ยม และ (ข) กลม	19
2.11	พัฒนาการของกำลังตามอายุคอนกรีต	20
2.12	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก	20
2.13	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปพีระมิด	21
2.14	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกต้อง (T = Tensile Crack)	21
2.15	แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาขี่ห้อ LCM ที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ	22
2.16	การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีต	26
2.17	การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น	27
2.18	การระเหยของน้ำในโพรง (ก) แรงดึงในโพรงทำให้คอนกรีตหดตัว (ข)	28
2.19	การแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง	29
2.20	การหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์	30
2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของมวลรวมกับการหดตัว	31
2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำทั้งหมดและการหดตัวแบบแห้ง	32
2.23	การเปลี่ยนแปลงทางความยาวของตัวอย่างที่บ่มแตกต่างกัน	33
2.24	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในคอนกรีต	33
2.25	(ก)ลักษณะโพรงอากาศแบบปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ข) ลักษณะโพรงอากาศแบบเปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ	37
2.26	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนประเภทใยและผง	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.27	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับความพรุน	43
2.28	ภาพตัดด้านข้างชุดวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำการความร้อนด้วยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate	47
3.1	เครื่องกดทดสอบกำลังรับแรงอัด	53
3.2	หน้าปัดอ่านค่าของเครื่องวัดเปรียบเทียบความยาว	55
3.3	(ก) แท่งตัวอย่างทดสอบและแท่งอ้างอิง (ข) การตั้งค่าแท่งอ้างอิงเท่ากับศูนย์ และ (ค) การอ่านค่าแท่งตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	55
3.4	หน้าจอกำหนดค่าต่างๆ ในโปรแกรม (ก) Size of Aggregate (ข) Batch Weights or paste/agg (ค) Paste/agg volume ratio (ง) Threshold Value	57
3.5	ผลการคำนวณจากโปรแกรมในรูปแบบไฟล์ Word	57
3.6	ภาพวงกลมที่ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop วาด	58
3.7	ภาพวงกลมเมื่อนำเข้าประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer	58
3.8	ภาพผลการตรวจสอบเทียบความถูกต้องโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer	59
3.9	ชุดเครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	60
3.10	โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์	60
3.11	เครื่องวัดอ่านค่าอุณหภูมิ และเครื่องสลับจุดวัดอ่านค่าอุณหภูมิ	61
3.12	เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าแผ่นทำความร้อนส่วนกลาง	61
4.1	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 28 วัน	66
4.2	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 56 วัน	67
4.3	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 28 วัน	68
4.4	กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 56 วัน	69
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 28 วัน	70
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 56 วัน	71
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน	73
4.9	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก	77
4.10	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์	77
4.11	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	82
4.12	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	82
4.13	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	83
4.14	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	84
4.15	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	84
4.16	การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	85
4.17	การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 0-448 วัน	87
4.18	ภาพที่ได้จากการสแกนหลังจากทาสีและลงแป้งเรียบร้อยแล้ว สูตรที่ 1-16	90
4.19	ภาพที่ได้จากการสแกนหลังจากทาสีและลงแป้งเรียบร้อยแล้ว สูตรที่ 17-26	91
4.20	หน่วยน้ำหนักกับฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	92
4.21	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	95
4.22	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	97
ก.1	วัสดุและอุปกรณ์ในการศึกษา	113
ก.2	ทรายและปูนซีเมนต์ที่คลุกเคล้ากันดีแล้วและน้ำผสมกับทรายและปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกัน	116
ก.3	การฉีดโฟมเหลวและมอร์ต้าผสมโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน	116
ก.4	การทดสอบหน่วยน้ำหนักคอนกรีตที่ทำการผลิต	117
ก.5	ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบหล่อทรงลูกบาศก์และแบบหล่อทรงกระบอก	117
ก.6	แบบหล่อตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	118
ก.7	แบบหล่อตัวอย่างทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	118

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตและผลิตภัณฑ์จากคอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างหลักที่สำคัญและใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกที่สุด และรับกำลังได้มากกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ อาคารหนึ่งหลังจะประกอบไปด้วยโครงสร้างได้แก่ เสา คานซึ่งต้องใช้คอนกรีต พื้นและผนังซึ่งอาจจะใช้วัสดุอื่นนอกจากคอนกรีตได้แต่ส่วนใหญ่ก็ยังนิยมใช้ผลิตภัณฑ์จากคอนกรีต และเมื่ออาคารขนาดใหญ่มีมากขึ้นค่าก่อสร้างก็มากขึ้นตาม เนื่องด้วยน้ำหนักของอาคารที่มากขึ้นตามปริมาณของคอนกรีต ปัจจุบันจึงมีการหันมาใช้วัสดุมวลเบาทดแทนซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตในส่วนที่ไม่ต้องรับน้ำหนักหลักของอาคารทำให้สามารถลดน้ำหนักของอาคารและค่าก่อสร้างลดลงอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาเพื่อมาทดแทนคอนกรีตมาตรฐาน

คอนกรีตมวลเบาที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้ (1) คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุที่มีน้ำหนักเบา คือ การใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาทดแทนหินเพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีตลง หินเบาจะมีลักษณะที่เป็นรูพรุน มีฟองอากาศอยู่ในตัวจำนวนมากจึงมีน้ำหนักเบา แต่ก็มีผลเสียคือมีราคาแพงกว่าคอนกรีตธรรมดามากทำให้ไม่เป็นที่นิยม (2) คอนกรีตที่มีฟองอากาศโดยทำให้เนื้อคอนกรีตพรุนด้วยการเพิ่มฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจากปฏิกิริยาเคมี เป็นวิธีที่ต้องอาศัยเครื่องมืออุปกรณ์และกรรมวิธีทางเคมี ซึ่งอาจแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 ระบบอบไอน้ำแรงดันสูง (Autoclaved Aerated Concrete) ฟองอากาศถูกสร้างขึ้นในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้าโดยใช้ผงอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและอัลคาไลด์ในคอนกรีต ฟองอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อทำการบ่มโดยไอน้ำที่ 180 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน ดังนั้นระบบนี้จะใช้ผลิตในโรงงานเท่านั้นและเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตต้องใช้เงินลงทุนสูง ประเภทที่ 2 ใช้โฟมเป็นส่วนผสม (Cellular Lightweight Concrete) คือ คอนกรีตหรือมอร์ต้าที่มีอากาศอยู่ในเนื้อมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเพิ่มปริมาณอากาศสามารถทำได้ด้วยการผสมฟองโฟมที่คล้ายจากเครื่องมือดับเพลิง แล้วนำโฟมนี้ไปผสมคอนกรีตทันที หรือใส่สารเกิดฟองลงไปในส่วนผสมคอนกรีตแล้วตีเนื้อคอนกรีตด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูงเพื่อให้เกิดฟอง โดยฟองอากาศที่ได้จะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3-1 มิลลิเมตร ซึ่งฟองจะมีโครงสร้างความมั่นคงแข็งแรงจนคอนกรีตก่อตัว จึงได้โพรงอากาศขนาดเล็กภายใน ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากเทคโนโลยีนี้จึงมีคุณสมบัติ

เช่นเดียวกับคอนกรีตปกติแต่กำลังน้อยกว่า แปรผันตรงกับปริมาณฟองอากาศที่ใส่ลงไป โพรงอากาศแบบปิดไม่ต่อเนื่องในมวลคอนกรีต ก่อให้เกิดคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง และทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

กำลังรับแรงอัดเป็นหน้าที่หลักของคอนกรีต ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำเป็นคุณสมบัติเด่นของคอนกรีตมวลเบา ปริมาณช่องว่างอากาศเป็นสิ่งบ่งชี้คุณสมบัติในอีกหลายๆ ด้านของคอนกรีต การหดตัวแบบแห้งมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำคอนกรีตไปใช้งาน ในชีวิตประจำวันเมื่อสั่งซื้อคอนกรีตจะนึกถึงกำลังรับแรงอัดมากกว่าคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีต ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้นำกำลังรับแรงอัดเป็นหัวข้อหลักเพื่อเชื่อมโยงไปยังคุณสมบัติอื่นๆ โดยเสนอถึงผลของกำลังรับแรงอัดที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ปริมาณช่องว่างอากาศและการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งฐานข้อมูลเหล่านี้ได้มีผลการวิจัยออกมาอย่างแพร่หลาย แต่การวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มเติมฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วเพราะวัสดุที่ใช้ เช่น ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ น้ำยากำเนิดฟองโฟม เครื่องกำเนิดฟองโฟม หรือแม้แต่วิธีการผลิต ล้วนแตกต่างกันหรือเหมือนกันบ้างในบางส่วน จึงต้องมีการศึกษาและวิจัยเพิ่มเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมกับการรับกำลังรับแรงอัด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ปริมาณฟองอากาศ และ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และปริมาณช่องว่างอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีหน่วยน้ำหนักออกแบบระหว่าง 800 – 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

1.3.3 ทรายสะอาด ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 1.75 – 2.5

1.3.4 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3

1.3.5 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55

1.3.6 สารสร้างฟองโฟมของ บริษัท แอลซีเอ็ม ประเทศไทย จำกัด

1.3.7 บ่มตัวอย่างแบบแห้งในอากาศ

1.4 สมมุติฐานในการวิจัย

1.4.1 ปริมาณฟองอากาศจากส่วนผสมโฟมเหลวเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

1.4.2 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าแปรผันตรงกับกำลังรับแรงอัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แต่จะแปรผกผันกับการหดตัวแบบแห้งและปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

1.4.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

1.5 การนำเสนอ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ของวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และสมมุติฐานของงานวิจัย ในบทที่ 2 นำเสนอเนื้อหา ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและปริมาณฟองอากาศของคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า บทที่ 3 นำเสนอสูตรส่วนผสม ตัวอย่าง มาตรฐานและวิธีการทดสอบ บทที่ 4 นำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล สุดท้ายบทที่ 5 นำเสนอสรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและข้อเสนอแนะการศึกษาวิจัย

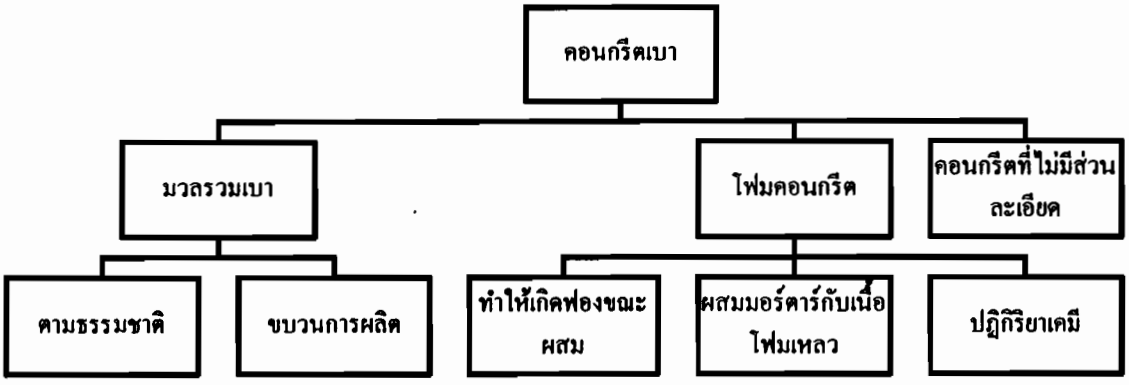
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดในบทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ คอนกรีตมวลเบา กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

2.1 คอนกรีตเบา

คอนกรีตเบาเป็นคอนกรีตที่นิยมใช้ในต่างประเทศมาเป็นเวลานาน ในงานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตเบาได้แก่ โครงสร้างส่วนบนของสะพานช่วงยาว โครงสร้างป้องกันไฟในส่วนที่เป็นเหล็กของอาคารสูง พื้นที่ที่ต้องการความหนา หลังคาคอนกรีตที่ต้องการลดความร้อน คอนกรีตบล็อก ผนังกั้นห้อง งานสถาปัตยกรรม แม้กระทั่งเรือท้องแบนคอนกรีต ฯลฯ สำหรับในประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนาคอนกรีตประเภทนี้มาเป็นเวลานานเช่นกันแต่ความต้องการใช้งานคอนกรีตเบาในช่วงที่ผ่านมายังมีน้อย ปัจจุบันอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ มีความสูงเพิ่มขึ้น ผู้ออกแบบจึงหันมาให้ความสนใจที่จะนำเอาคอนกรีตเบามาใช้มากขึ้น

คอนกรีตเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป [1] คือ หน่วยน้ำหนักคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วน้อยกว่า 1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตเบามีหน่วยน้ำหนักประมาณ 400-1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดประมาณ 10-450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.2-1.0 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน วัตถุดิบที่ใช้สามารถเลือกได้ทั้งวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ ประดิษฐ์ขึ้นเองหรือใช้สารเคมีก็ได้ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้ [2] คือ (1) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (2) คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด และ (3) โฟมคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ประเภทของคอนกรีตเบา [2]

2.1.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา

คอนกรีตเบาประเภทนี้จะผสมด้วยมวลรวมเบาทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมวลรวมประเภทนี้จะมีความหนาแน่นต่ำ ภายในประกอบด้วยรูพรุนที่มีอากาศอยู่ มวลรวมเบามีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 600-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับมวลรวมปกติซึ่งมีน้ำหนักระหว่าง 1,100-1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งคุณสมบัติของมวลรวมแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมเบา [2]

วัสดุ	หน่วยน้ำหนักมวลรวม (กก./ลบ.ม.)	เหล่งกำเนิด	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัดทรงลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	การดูดซึมน้ำ (%)
Expanded Clay Expanded Shale	550 - 1,050	ธรรมชาติ	110 – 1,850	180 – 450	5 – 15
Foamed Slag	650 - 900	สังเคราะห์	1,100 – 1,850	180 – 450	5 – 25
Sintered Flyash	600 - 1,000	สังเคราะห์	1,350 – 1,900	180 – 450	14 – 24
Vermiculite	65 - 200	ธรรมชาติ	400 – 950	8 – 35	20 – 35
Perlite		ธรรมชาติ	550 – 800	7 – 42	10 – 50
Pumice	1,450 - 1,750	ธรรมชาติ	800 – 1,300	50 – 60	สูงมาก
Crushed Stone		ธรรมชาติ	2,250 – 2,400	240 – 550	0.5 - 2

มวลรวมเบาสามารถจำแนกออกได้ 4 ชนิด [2] คือ

2.2.1.1 มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่หินแร่ในธรรมชาติ เช่น Vermiculite, Perlite, Pumice และ Scoria ซึ่งเกิดจากลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ เกิดขึ้นเวลาภูเขาไฟระเบิด ดังนั้นมวลรวมชนิดนี้จะมีอยู่อย่างจำกัด จึงไม่ได้นำมาใช้ในแวดวงอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างแพร่หลาย มวลรวมชนิดนี้ใช้ผสมทั้งคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมากนัก และมวลรวมจะดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมทั่วไป

2.2.1.2 มวลรวมเบาที่ได้จากขบวนการผลิต เป็นมวลรวมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงแหล่งของวัตถุดิบด้วย โดยสามารถจำแนกมวลรวมที่ได้จากขบวนการผลิตออกได้อีก 3 ประเภท คือ

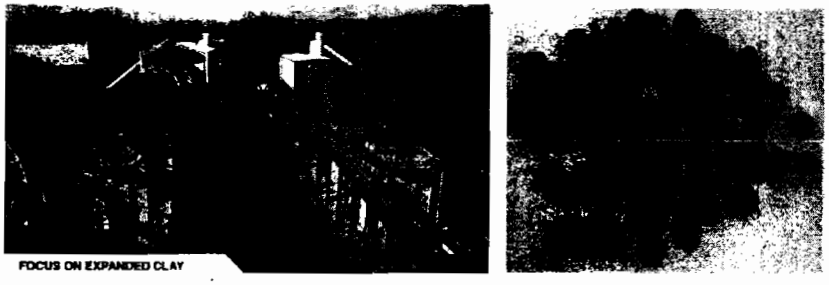
1) Expand clay aggregate มวลเบานี้ได้จากขบวนการผลิตจากการนำดินที่มีองค์ประกอบทางเคมีพิเศษขุดจากแหล่ง และอาจนำมาผสมกับสารที่ทำให้เกิดฟอง แล้วเตรียมให้เป็นเม็ดๆ จากนั้นนำป้องเข้าสู่เตาเผาความร้อนสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ลักษณะจะเป็นเตายาวทรงกระบอกวางตัวในแนวนอนเอียงประมาณ 5 องศา เตานี้ส่วนปลายจะให้ความร้อน ขณะเผาเตาจะหมุนและให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการและย่างเม็ดดินที่ป้อนเข้ามา ให้มีการขยายตัวพองออกที่อุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อเม็ดดินขยายตัวและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เม็ดดินพองและมีรูพรุนอยู่ภายใน ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จจะถูกนำมาคัดขนาดน้อยกว่า 16 มิลลิเมตร โดยความหนาแน่นของมวลเบาที่ได้จะขึ้นกับอุณหภูมิขณะขยายตัว โดยอยู่ในช่วง 400-800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมวลรวมนี้มักจะนำไปผสมทำให้เป็นฉนวนกันความร้อนมากกว่าแต่ก็เหมาะสำหรับคอนกรีตเบาในงานก่อสร้าง ที่มีความหนาแน่น 1,300-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วย มวลเบาชนิดนี้จะมีผิวนอกเรียบและผิวภายในเป็นรูคล้ายรังผึ้ง รูไม่เชื่อมต่อภายใน แสดงในภาพที่ 2.2

2) Expand shale aggregate ได้จากการนำดินดานมาผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้วหรือเคลือบผิวภายนอกด้วยหินปูนนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ในเตาเผาวัตถุดิบจะถูกนำมาเตรียมเป็นเม็ด ขนาดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดที่ต้องการเมื่อขยายตัว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีผิวเรียบมีฟองอากาศถูกกักไว้ภายในและมีความแข็งมาก แสดงภาพที่ 2.3

3) Sintered fly ash ได้จากการนำเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหิน เถ้าลอยที่เหมาะสม สมควรจะมีร้อยละของมลทินที่หายไปจากการเผาน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้เหลืออยู่ในรูปของถ่านที่หมดควัน ส่วนผสมถูกทำให้เป็นเม็ดก่อน แล้วจึงป้อนเข้าสู่สายพานลำเลียงเพื่อเผาบนตะแกรงที่มีลมร้อนเป่าให้เกิดการเผาไหม้ อุณหภูมินี้อนุภาคของเถ้าถ่านจะหลอมรวมกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นทรงกลม ผิวมีความแข็งสูง แสดงในภาพที่ 2.4

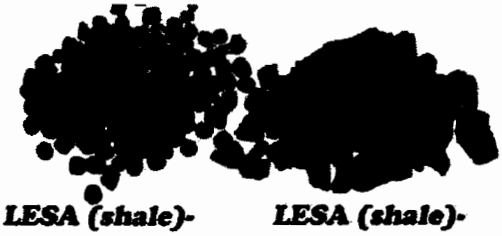
2.2.1.3 มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ คือ การใช้ไม้หรือพลาสติกบางชนิด รวมทั้งพวกขี้เถ้าต่างๆ ผสมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อแทนมวลรวมเบา แสดงในภาพที่ 2.5

2.2.1.4 มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลวของขบวนการผลิตหรือของเสียจากการผลิตได้แก่ เถ้าหนัก ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เถ้าหนักที่หลอมเหลวอุณหภูมิสูงกว่า 1,350 องศาเซลเซียส เทลงบนพื้นที่มีน้ำฉีดพ่นอยู่ น้ำจะเป็นไอน้ำสัมผัสกับกากตะกรันเตาหลอมที่หลอมเหลวและซึมเข้าไปในเนื้อของตะกรัน ทำให้เกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ตะกรันจึงมีลักษณะเป็นโฟมและนำไปคัดขนาดต่อไป แสดงในภาพที่ 2.6



(ก) (ข)

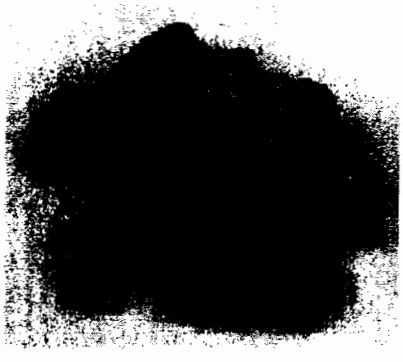
ภาพที่ 2.2 (ก) เตาเผา (ข) มวลรวมเบาที่ได้จากดินที่มีองค์ประกอบทางเคมีพิเศษ [2]



ภาพที่ 2.3 มวลรวมเบาที่ได้จากดินดานผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้ว [2]

ภาพที่ 2.4 มวลรวมเบาที่ได้จากเถ้าลอย [2]

ภาพที่ 2.5 มวลรวมที่ได้จากขี้เถ้า [2]



ภาพที่ 2.6 มวลเบาที่ได้จากเถ้าหนัก [2]

2.1.2 คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด

คอนกรีตประเภทนี้ได้จากการผสมมวลรวมปกติขนาดหยาบ จะไม่มีส่วนผสมที่เป็นทรายและมีน้ำปูนเคลือบอยู่หนาไม่เกิน 1-3 มิลลิเมตร ทำให้คอนกรีตนี้มีช่องว่างอยู่มาก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตประเภทนี้ค่อนข้างต่ำ [1] หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับขนาดละของหินเป็นหลัก หินที่มีขนาดเดียวจะมีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าหินที่มีส่วนคละประมาณร้อยละ 10 โดยทั่วไปหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตประเภทนี้อยู่ระหว่าง 1,600-1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ถ้าใช้มวลรวมเบาแทนจะทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงเหลือ 640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัดของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 10-140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณซีเมนต์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 [1]

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.38-0.52 ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการให้มวลรวมเกาะกัน ข้อดีของคอนกรีตประเภทนี้คือ มีการนำความร้อนต่ำเมื่อผสมด้วยมวลรวมเบาโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมกับมวลรวมทั่วไป แต่การที่มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงทำให้คอนกรีตประเภทนี้ไม่เหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องเสริมเหล็ก [1]

ตารางที่ 2.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามหน่วยน้ำหนัก [1]

มวลรวม/ซีเมนต์ (โดยปริมาตร)	น้ำ/ซีเมนต์ (โดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
6	0.38	2,020	140
7	0.40	1,970	120
8	0.41	1,940	100
10	0.45	1,870	70

2.1.3 โฟมคอนกรีต

คอนกรีตเบาชนิดโฟมคอนกรีตนี้เป็นคอนกรีตเบาชนิดหนึ่งซึ่งถูกทำให้มีน้ำหนักเบาด้วยวิธีการทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1-1 มิลลิเมตร แทรกในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ ซึ่งทำได้โดยการให้ฟองอากาศกระจายในส่วนผสมของซีเมนต์เพสท์หรือมอร์ตาร์ที่ยังอยู่ในสภาพพลาสติก จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวและอีกวิธีหนึ่งคือทำให้เกิดฟองโดยใช้สารเคมี แล้วนำเข้าห้องอบไอน้ำความดันสูง โดยโฟมคอนกรีตนี้จะไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผลิต แต่จะใช้ทรายละเอียดแทน [1] การจำแนกโดยใช้ระบบการผลิตมวลเบาชนิดโฟมคอนกรีตแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่

(1) คอนกรีตมวลเบาระบบอบด้วยไอน้ำ เป็นระบบการผลิตที่ใช้ต้นทุนสูงเพราะต้องทำการบ่มโดยใช้ไอน้ำที่มีความดันสูง โดยมีส่วนผสมที่สำคัญคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ทราย น้ำ ผงยิปซั่ม และใส่สารเคมี ได้แก่ ผงอลูมิเนียมปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดฟองของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่เป็นเม็ดกลมขนาดเล็กมาก ฟองอากาศจะมีความต่อเนื่องกันทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูง

(2) คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูล่า เป็นระบบการผลิตที่ใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ทราย น้ำ และสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่เป็นเม็ดกลมขนาดเล็กมาก ซึ่งจะมีความมั่นคงจนคอนกรีตก่อตัวแข็งได้โดยไม่ต้องบ่มด้วยไอน้ำ ทำให้มีค่าใช้จ่ายถูกกว่าระบบบ่มด้วยไอน้ำ ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากเทคโนโลยีนี้จึงมีคุณสมบัติคล้ายกับคอนกรีตปกติ ฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตก่อให้เกิดผลดีคือ น้ำหนักเบา ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง และทนไฟได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง หรือทำโครงสร้างอาคารได้ โดยเฉพาะผนังทั้งภายในและภายนอกที่ไม่ได้รับกำลังมากนัก

การจำแนกชนิดคอนกรีตอาจจำแนกตามวิธีการผลิตได้ 2 วิธี ได้แก่

(1) วิธีทางเคมี เป็นวิธีการทำให้คอนกรีตพรุนโดยใช้ผลจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นในส่วนผสมของเนื้อคอนกรีต ขณะที่ยังเหลวหรืออยู่ในสภาพพลาสติก โดยใส่สารเคมีเข้าไปในส่วนผสมของคอนกรีต ความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของคอนกรีตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดฟองอากาศขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปคือ ก๊าซไฮโดรเจน ตัวเชื่อมประสานคือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือปูนขาว หรือส่วนผสมของปูนขาวและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ วิธีนี้เป็นวิธีที่ผลิตได้ยาก ถ้าควบคุมคุณภาพการผลิตได้ไม่ดี เนื่องจากการกำหนดปริมาณฟองในแต่ละครั้งที่ทำการผลิตให้ปริมาณที่แน่นนอนไม่ได้ จึงเหมาะที่จะทำการผลิตในรูปแบบของโรงงานอุตสาหกรรม สารกำเนิดฟองที่นิยมใช้คือ H_2O_2 และผงอลูมิเนียม

(2) วิธีทางกล เป็นวิธีที่ผลิตได้ง่าย และควบคุมกระบวนการผลิตได้ดีกว่าวิธีการทางเคมี อีกทั้งยังประหยัดกว่า สามารถผลิตใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปได้ดี ซึ่งแบ่งย่อยได้ 3 วิธี ได้แก่

(2.1) วิธีการผสมคอนกรีตโดยใช้ปริมาณน้ำมากเกินกว่าปริมาณที่พอดีที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์ได้สมบูรณ์ ทำโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้มีค่าสูงและทำการผสมหลายครั้งจนได้อัตราส่วนที่พอเหมาะ แล้วนำไปบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงให้แห้ง น้ำส่วนเกินจะระเหยออกจากเนื้อคอนกรีตเกิดเป็นช่องว่างแทนที่น้ำส่วนเกินที่ระเหยออกไป จะทำให้คอนกรีตที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ

(2.2) วิธีโม่ส่วนผสมของมอร์ตาร์ในลักษณะเหลวกับสารกักกระจายฟองอากาศ จะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้เกิดเนื่องจากแรงเฉื่อยของการหมุนในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ บางครั้งการผสมจะใช้เครื่องโม่ผสมที่มีใบพัดหมุนอยู่ในแนวราบและภายในเครื่องจะใช้ลวดตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว ความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร หมุนอยู่ภายในโม่ด้วยความเร็ว 55-60 รอบต่อนาที เพื่อช่วยให้เกิดฟองได้ง่ายขึ้น

(2.3) วิธีการทำให้เกิดฟองอากาศโดยการอัดอากาศด้วยความดันสูงเข้าไปในถังเหล็กทรงกระบอกชนิดทนความดันซึ่งบรรจุสารเคมีที่ทำให้เกิดฟองอากาศอยู่ภายใน จากนั้นปล่อยฟองอากาศผ่านทางหัวฉีดขนาดเล็ก ฟองอากาศที่ได้จากวิธีนี้สามารถเติมสารเคมีพวกโปรตีนที่ไม่มีแป้ง สารน้ำตาล หรือสารเคมีอื่นๆ เพื่อกระตุ้นให้เกิดฟองได้ง่ายขึ้นแล้วจึงนำฟองอากาศที่ได้มาผสมกับมอร์ตาร์ที่ได้ทำการผสมไว้แล้วให้เข้ากัน จากนั้นจึงเทเข้าแบบที่เตรียมไว้

2.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นคอนกรีตที่เกิดจากการผสมฟองอากาศที่ได้จากการอัดอากาศด้วยความดันสูงเข้าไปในถังเหล็กทรงกระบอกชนิดทนความดัน ซึ่งบรรจุสารเคมีที่ทำให้เกิดฟองอากาศอยู่ภายใน จากนั้นปล่อยฟองอากาศผ่านทางหัวฉีดขนาดเล็ก ฟองอากาศที่ได้จะต้องกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอและต้องคงตัว แล้วนำไปผสมกับซีเมนต์เพสท์หรือมอร์ตาร์ โดยโครงสร้างของฟองอากาศเหล่านั้นสามารถคงตัวอยู่ได้ในระหว่างการผสม การเท จนกระทั่งคอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้ถูกคิดค้นในปี ค.ศ.1950 ในอดีตช่วงเริ่มต้น สารสร้างฟองอากาศที่ใช้จะเป็น Hydrolyzed-protene หรือ Synthetic ที่สกัดจากพืช ซึ่งมีข้อเสียคือฟองอากาศที่ได้มักไม่คงตัว แต่กระบวนการผลิตในปัจจุบันมีการพัฒนามากยิ่งขึ้นทำให้ได้ฟองอากาศที่คงตัวมากขึ้นและไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซีเมนต์ที่เป็นผลเสียต่อตัวคอนกรีตเอง โดยอาจผลิตจาก Detergents, Resin soap, Glue resins, Saponin, Hydrolysed proteins เช่น Karatin เป็นต้น การใช้โฟมเหลวเป็นกระบวนการเติมฟองอากาศภายในคอนกรีตได้ดีที่สุด เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตสิ้นสุดลงฟองอากาศก็สลายไป เหลือเพียงช่องว่างอากาศขนาดเล็กสม่ำเสมอจำนวนมากในเนื้อของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่ได้มีความพรุนสูงและน้ำหนักเบา

2.2.1 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ส่วนประกอบหลักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านี้ สามารถแยกออกได้ 2 ส่วนหลัก ได้แก่

2.2.1.1 เนื้อโฟมเหลวหรือฟองอากาศ จะต้องเป็นเนื้อฟองอากาศที่กระจายตัวสม่ำเสมอและคงตัว โดยขนาดและการกระจายของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา

2.2.1.2 ซีเมนต์เพสท์หรือมอร์ตาร์ โดยปกติแล้วในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะใช้ซีเมนต์เพสท์ เพราะ มีกำลังรับแรงอัดและการยึดเกาะตัวที่ดีกว่าการใช้มอร์ตาร์ แต่การเพิ่มทรายในส่วนผสมจะช่วยลดการยุบตัว โดยการลดปริมาณฟองอากาศลงและเพิ่มจำนวนทรายเข้าไปแทนที่ สำหรับทรายที่ใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 ถึงเบอร์ 200 การใช้ทรายเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตมวลเบาแบบเซลลูล่าถือเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตได้ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติอื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบามีผลมาจากฟองอากาศ โดยการเพิ่มขึ้นของฟองอากาศภายในเนื้อคอนกรีตจะมีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นที่ลดลงของคอนกรีตมวลเบา และโครงสร้างของฟองอากาศ ขนาดและลักษณะของการกระจายของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของคอนกรีตมีผลต่อความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีต ซึ่งหมายถึงความแน่นอนของ

คุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตมวลเบา ทั้งด้านกำลังรับน้ำหนัก ด้านการใช้งาน และคุณสมบัติด้านความคงทนด้วย

ด้านความข้นเหลวและความสามารถเทได้ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีค่าสูง ไหลเข้าเทแบบหล่อได้ดี โดยไม่ต้องมีการกระทุ้ง อย่างไรก็ตามการผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าให้เป็นเนื้อเดียวกันในแนวดิ่งตลอดทั้งก้อนทำได้ยากเนื่องจากฟองอากาศจะพยายามลอยขึ้นด้านบน และในขณะเดียวกันส่วนผสมอื่นที่หนักจะจมลงสู่ด้านล่าง ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตมีความเปราะบางหรือมีความแข็งแรงลดลง

2.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

2.2.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของมวลรวมละเอียด อัตราส่วนของน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ และปริมาณของโฟมเหลวที่เติมลงไป ซึ่งในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า สามารถเลือกผลิตคอนกรีตให้มีหน่วยน้ำหนักที่ต้องการตามลักษณะของงานที่จะนำคอนกรีตไปใช้ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านี้จึงมีตั้งแต่ 300–1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบามีผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตและคุณสมบัติในการนำไปใช้งาน เช่น การนำความร้อน ความทนไฟ เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาแบบแบบเซลลูล่า จึงมักเปรียบเทียบคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตมวลเบากับหน่วยน้ำหนัก

2.2.2.2 ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีฟองอากาศอยู่ประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งอยู่ในรูปของฟองอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05–1.25 มิลลิเมตร การที่มีฟองอากาศมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีแต่ทำให้การรับแรงต่ำลง ซึ่งทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์ของฟองอากาศจะทำให้กำลังรับแรงลดลงถึง 5 เปอร์เซ็นต์ คุณสมบัติของคอนกรีต อาทิ กำลังรับแรง การซึมผ่าน การหดตัวและการคืบของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับ ความพรุน และการกระจายของฟองอากาศในคอนกรีตโดยตรง [3] ลักษณะโครงสร้างของฟองอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของคอนกรีตมวลเบาซึ่งอาจมีปริมาณของความพรุนที่สูงได้ถึงร้อยละ 80 ของปริมาตร อีกทั้งปริมาตร ขนาด และระยะห่างของฟองอากาศจะมีผลโดยตรงต่อกำลังและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า และลักษณะรูปร่างของฟองอากาศภายในของคอนกรีตจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า [4]

2.2.2.3 ความสามารถทำงานได้ คือความสามารถของคอนกรีตในการเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่างๆ [5] เช่น คอนกรีตกับแบบหล่อ คอนกรีตกับเหล็กเสริม ซึ่ง

คอนกรีตไหลเข้าแบบหล่อได้ดี แน่นตัวได้ง่ายโดยใช้กำลังงานน้อย ไม่มีการแยกขนาดของส่วนผสมคอนกรีต และปราศจากโพรงอากาศขนาดใหญ่ การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตไม่สามารถทำได้โดยตรง คุณสมบัติที่ใช้ตรวจสอบค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตคือ ค่าความข้นเหลวของคอนกรีต ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลของคอนกรีต ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถเทได้มีดังนี้ (1) ปริมาณน้ำ หากปริมาณน้ำสูงและเหมาะสมจะทำให้เทคอนกรีตได้ง่าย แต่อาจทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง (2) มวลรวม ควรมีขนาดคละที่ดี มวลรวมผิวเรียบกลมจะลื่นไถลได้ดีกว่าผิวหยาบ แต่ก็จะทำให้เกิดการยึดเกาะไม่ดีเท่าผิวหยาบ มวลรวมที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีความสามารถในการทำงานได้ดีกว่ามวลรวมที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ มวลรวมยังส่งผลต่อการใช้น้ำคือมวลรวมละเอียดจะต้องการใช้น้ำมากกว่ามวลรวมหยาบ (3) ปูนซีเมนต์หากมีความละเอียดมากก็จะมีความต้องการน้ำมาก และ (4) เวลาในการผสมคอนกรีต หากผสมนานคอนกรีตจะสูญเสียความเหนียวลื่นซึ่งมีผลต่อการทำงานได้ของคอนกรีต

2.2.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต บอกให้รู้ถึงระยะเวลาที่สามารถใช้ในการผสม การลำเลียง การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ การอัดแน่น และการตกแต่งผิวคอนกรีต ความเหมาะสมของระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตขึ้นกับขนาดของโครงสร้างและลักษณะของงาน ซึ่งอาจต้องการความเร็วหรือช้าต่างกัน เช่น งานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสน้ำอาจต้องการให้คอนกรีตก่อตัวเร็ว แต่กับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องการความต่อเนื่องของการเทคอนกรีตอาจต้องการให้คอนกรีตก่อตัวช้า เป็นต้น [5] ปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงคอนกรีตจะก่อตัวเร็ว ความชื้นสัมพัทธ์หรือน้ำในอากาศและน้ำยาสารผสมเพิ่มในคอนกรีตก็เป็นปัจจัยที่สำคัญด้วยเช่นกัน [6]

2.2.2.5 กำลังรับแรงอัด กำลังของคอนกรีตมวลเบาจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ทิศทางของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ อายุของคอนกรีต ปริมาณน้ำในส่วนผสมและวิธีการบ่ม โครงสร้างของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตและสภาพเชิงกลของผนังฟองอากาศจะมีผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต [5] คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักลดลงเนื่องจากขนาดฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตจะทำให้กำลังรับแรงลดลง และปริมาณ ขนาด การกระจายตัวของฟองอากาศจะมีผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยที่ในคอนกรีตที่มีการกระจายของขนาดของฟองอากาศในช่วงแคบๆจะให้ค่ากำลังของคอนกรีตที่สูง ในขณะที่คอนกรีตที่มีปริมาณโฟมในส่วนผสมมาก จะมีการรวมตัวกันของฟองทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่และมีการกระจายของขนาดของฟองอากาศในช่วงกว้าง ทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตที่ต่ำ [6]

2.2.2.6 การหดตัวแห้ง การหดตัวเนื่องจากการแห้งเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำจากวัสดุซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากคอนกรีตมวลเบามีความพรุนสูง ดังนั้นการหดตัวจะขึ้นอยู่กับปริมาตรและพื้นผิวสัมพัทธ์ของฟองอากาศขนาดเล็ก การหดตัวจะเพิ่มขึ้นหากขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของคอนกรีตมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก [6] นอกจากนี้การหดตัวจะยังขึ้นอยู่กับการกระจายของฟองอากาศ สารผสมเพิ่มที่ใส่ในคอนกรีตมวลเบานั้นมีผลน้อยมากต่อการหดตัวของคอนกรีต นั่นหมายถึงส่วนประกอบทางเคมีไม่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตแต่ปัจจัยที่สำคัญต่อการหดตัวของคอนกรีตคือลักษณะโครงสร้างของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต การบ่มคอนกรีตในอากาศทำให้คอนกรีตมีการหดตัวสูงเมื่อเทียบกับการบ่มชื้นหรืออบไอน้ำ [7] และปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตคือความชื้นในอากาศและในเนื้อคอนกรีต หากค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำคอนกรีตย่อมมีการหดตัวสูง คอนกรีตมวลเบามีการยืดหดตัวต่ำและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากการความร้อนก็มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจะมีความทนทานและการแตกร้าวน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป [8]

2.2.2.7 การดูดซึมน้ำ คอนกรีตมวลเบามีความพรุนสูง น้ำและฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติความซึมผ่านและการดูดซับน้ำของคอนกรีต น้ำเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเป็นส่วนที่ทำให้คอนกรีตมีความข้นเหลวสามารถเทได้ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ที่สภาวะแห้ง น้ำในรูพรุนในเนื้อคอนกรีตจะระเหยออกได้หมด ซึ่งจะเหลือเป็นเพียงฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต หากคอนกรีตอยู่ในสภาวะชื้นก็อาจมีน้ำในรูพรุนในเนื้อคอนกรีตได้ การถ่ายเทหรือการไหลผ่านของน้ำในคอนกรีตสามารถอธิบายโดยใช้ความสามารถซึมผ่านของน้ำและหลักการส่งผ่านของความชื้นอันเนื่องมาจากแรงตึงผิวที่เกิดระหว่างอนุภาคของเนื้อคอนกรีตกับน้ำ [9]

2.2.2.8 การนำความร้อน คุณสมบัติการนำความร้อนขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักปริมาณความชื้น และส่วนผสมของวัสดุ โดยความหนาแน่นจะส่งผลกระทบสูงสุดต่อคุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา การเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณความชื้นมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 42 เปอร์เซ็นต์ [10] และปริมาณของช่องว่างและการกระจายของช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมีผลต่อความเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีต ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตมวลเบาคอนกรีตจะเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีอันจะทำให้ความร้อนจากภายนอกผ่านเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อยกว่าผนังอิฐมอญ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่มีฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ ซึ่งช่องอากาศเหล่านี้ จะทำหน้าที่ลดทอนหรือยืดหน่วงพลังงานความร้อนเอาไว้ไม่ให้ผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางตลอดเวลาระหว่างเนื้อวัสดุและช่อง

อากาศ จึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอก สู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างดี ทำให้ภายในอาคารเย็นสบายกว่า [6]

2.2.2.9 การทนไฟ คอนกรีตมวลเบามีคุณสมบัติทนไฟสูงกว่าหรือดีเทียบเท่ากับคอนกรีตทั่วไป [11] ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตมวลเบามีลักษณะเป็นวัสดุเนื้อเดียว ซึ่งต่างกับคอนกรีตทั่วไปที่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบซึ่งมีอัตราการเกิดการขยายตัว การร้าวและการแยกตัวจากส่วนของมอร์ตาร์ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบามีโครงสร้างฟองอากาศปิดแยกกันกระจายตัวสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีภายในเนื้อคอนกรีตจึงมีปริมาณต่ำ ด้วยค่าการนำความร้อนและการแพร่กระจายความร้อนต่ำ และการเป็นฉนวนทำให้ทนทานต่อเพลิงไหม้ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

2.2.2.10 การดูดซับเสียง ด้วยคุณสมบัติของการเป็นฉนวนของคอนกรีตมวลเบาทำให้มีความสามารถกันเสียงรบกวนได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป [11] ช่วยลดทอนความดังของเสียงจากภายนอกอาคารและระหว่างห้องได้ ทั้งยังสามารถดูดซับเสียงไม่ให้ก้องสะท้อนภายในอาคาร คุณสมบัติการเป็นฉนวนกันเสียงคล้ายกับคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนและคุณสมบัติการทนไฟซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างฟองอากาศแบบปิดที่กระจายอยู่จำนวนมากภายในเนื้อคอนกรีต

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติ [3]

คุณสมบัติ	หน่วย	คอนกรีต CLC	คอนกรีตปกติ
ความหนาแน่น	kg/m^3	400 – 1,400	2,350
กำลังอัดที่ 28 วัน	kg/cm^2	10 – 140	240
โมดูลัสยืดหยุ่น	ksc	$42x10^3 – 98x10^3$	$150x10^3$
การนำความร้อน	$W/m.^oK$	0.17 – 0.55	1.2 – 1.7
การดูดซึมน้ำ	% โดยปริมาตร	20 – 45	1 – 3
การหดตัว	%	0.15 – 0.50	0.035

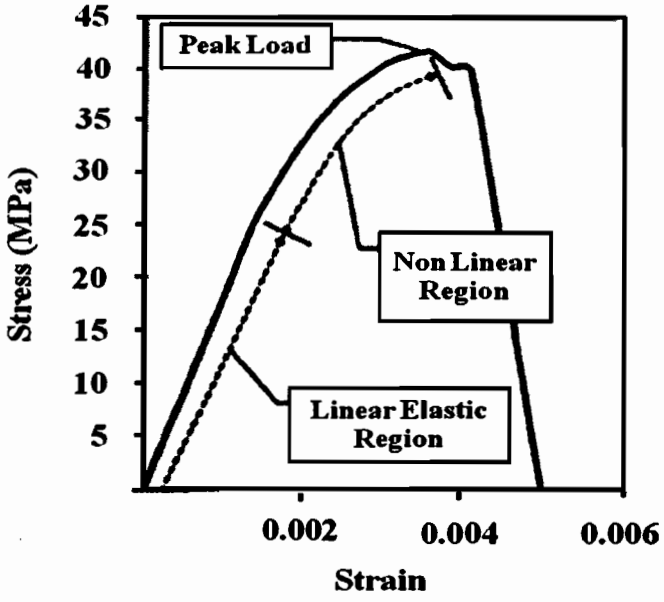
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิฐมวลเบายี่ห้อต่างๆ [3]

คุณสมบัติ	หน่วยวัด	อิฐมอญทั่วไป	อิฐมวลเบา (AAC)	ATC (CLC)	D-CON (CLC)	V-con (CLC)
ความหนาแน่น	kg/m^3	1400 -1800	600 - 800	1500	800-1000	700
กำลังรับแรงอัด	kg/cm^2	10-40	20-30	50-60	> 45	-
การดูดซึมน้ำ	%	100%	30 - 60%	10 - 15%	< 17%	5 - 10%
การส่งผ่านความร้อน	$W/m.^{\circ}K$	1 - 15	0.12 - 0.3	0.3	0.135	-
อัตราการทนไฟ	Hours	1 - 2	4 - 5	4 - 5	4	4
การส่งผ่านเสียง	STC	32 - 38	40 - 45	40 - 45	40	43

2.3 กำลังรับแรงอัด

2.3.1 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตปกติ

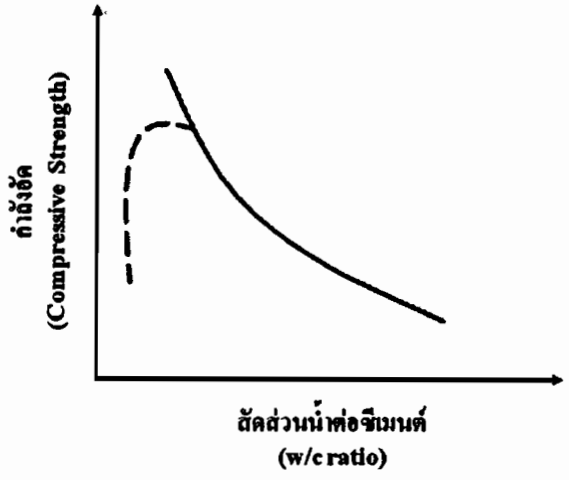
กำลังอัดของคอนกรีต หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานต่อแรงอัดที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการพังทลาย [5] การพังทลายนี้ ได้แก่ รอยแตกร้าวที่ปรากฏ กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ กำลังของมอร์ตาร์ กำลังของมวลรวมหยาบ และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบ รูปแบบทั่วไปของพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีตภายใต้การทดสอบแรงกดคงที่สม่ำเสมอเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 2.7 [12] เห็นได้ว่าพฤติกรรมในช่วงแรกของคอนกรีตจะเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงไปจนถึงที่ประมาณ 40–60 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำสูงสุด การเปลี่ยนแปลงขนาดในช่วงนี้จะเป็นลักษณะยืดหยุ่น เมื่อเลยจุดนี้ไปพฤติกรรมจะเริ่มมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ภายในคอนกรีตเริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ ซึ่งนำไปสู่การปลดปล่อยพลังงาน เมื่อใส่แรงกระทำต่อไปเรื่อยๆ รอยแตกร้าวขนาดเล็กที่เกิดขึ้นภายในจะเริ่มรวมตัวกันเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่และเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวส่งผลให้คอนกรีตถึงจุดวิบัติและแตก สาเหตุของพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นตรงและการวิบัติในคอนกรีตนั้นเชื่อว่าเกิดจากการเกิดและรวมตัวกันของของรอยร้าวขนาดเล็ก ณ จุดที่แรงกระทำสูงสุดหรือจุดวิบัติ การวิบัติของคอนกรีตจะมีลักษณะที่ค่อนข้างรุนแรง ทั้งนี้เนื่องจากการที่พลังงานความเครียดที่สะสมอยู่เป็นจำนวนมากถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงระยะเวลาสั้น ตามด้วยการลดลงของแรงกระทำสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2.7 พฤติกรรมความเค้น – ความเครียด ภายใต้แรงอัด [12]

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยหลักแล้วสามารถอธิบายได้เป็น 6 ประเด็น ดังนี้ [1]

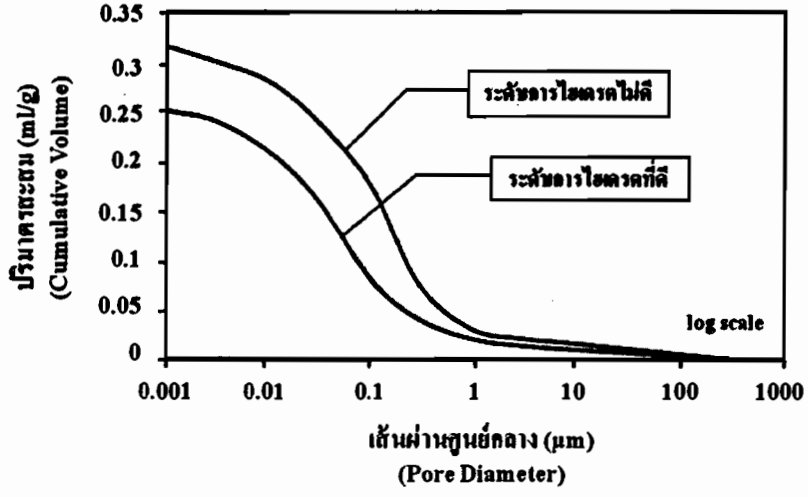
2.3.1.1 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ กำลังของคอนกรีตแปรผกผันต่อระดับสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หมายความว่า เมื่อสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น ในคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงหรือกรณีที่มีปริมาณน้ำมาก น้ำที่เหลือจากกระบวนการไฮเดรชั่นจะตกค้างในเนื้อคอนกรีตและเมื่อน้ำระเหยออกไปหมด ช่องว่างตามที่น้ำเหล่านี้เคยอยู่ก็จะกลายสภาพเป็นรูพรุนในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำทำให้กำลังอัดที่ได้มีค่าต่ำตามไปด้วย



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัด [1]

2.3.1.2 ปริมาณน้ำประสิทธิผล ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตนั้น น้ำบางส่วนจะหายไปเนื่องจากการดูดซับของมวลรวมและจากการระเหย ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีของมวลรวมเนื่องจากเป็นปัจจัยหลัก โดยสภาวะของมวลรวมที่เหมาะสมที่สุดในการผสมคอนกรีตนั้นควรจะมีความชื้นในระดับอิ่มตัวผิวแห้ง หมายความว่า มวลรวมที่มีระดับความชื้นต่ำกว่านี้จะดูดซึมน้ำเพื่อให้ระดับความชื้นเพิ่มสู่ระดับอิ่มตัวผิวแห้ง ทำให้น้ำประสิทธิผลหายไป ส่วนมวลรวมที่มีระดับความชื้นมากกว่าระดับอิ่มตัวผิวแห้งจะคายน้ำออกมา ทำให้ปริมาณน้ำประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

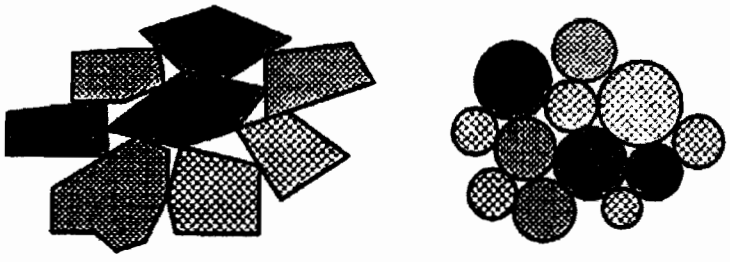
2.3.1.3 รูพรุนในคอนกรีตหรือฟองอากาศหรืออาจเรียกว่าช่องว่างอากาศ ปริมาตรของช่องว่างมีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยเป็นสัดส่วนผกผันกัน ขนาดของรูพรุนนั้นมีผลต่อกำลังของคอนกรีต การที่มีรูพรุนจำนวนมากทำให้คอนกรีตมีกำลังลดต่ำลง แต่อย่างไรก็ตาม รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 20 นาโนเมตร มีผลต่อกำลังน้อยมาก [13] โดยจะมีเฉพาะรูพรุนขนาดใหญ่เท่านั้นที่มีผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต คอนกรีตที่มีการไฮเดรชั่นที่ดีมักจะมีจำนวนของรูพรุนขนาดใหญ่น้อยกว่าคอนกรีตที่มีการไฮเดรชั่นที่ไม่ดี การไฮเดรชั่นที่ดี หมายถึง การไฮเดรชั่นที่ต่อเนื่องไม่ขาดตอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้น วิธีการที่จะทำให้เกิดการไฮเดรชั่นอย่างต่อเนื่องคือการบ่ม นั่นคือเป็นเหตุผลที่การบ่มเป็นหัวใจสำคัญของการทำคอนกรีตที่ดี



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของช่องว่างขนาดต่างๆ กับระดับการไฮเดรชั่น [13]

2.3.1.4 อิทธิพลของมวลรวม นอกจากกำลังของมวลรวมที่ส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตแล้ว รูปทรงและพื้นผิวของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน [5] การใช้มวลรวมที่มีรูปทรงเป็นเหลี่ยมมุม อนุภาคของมวลรวมจะมีการล็อกจับกันดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างกลม ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น นอกจากนี้มวลรวมที่เป็นเหลี่ยมมุมยังมีความสามารถในการหยุดหรือ

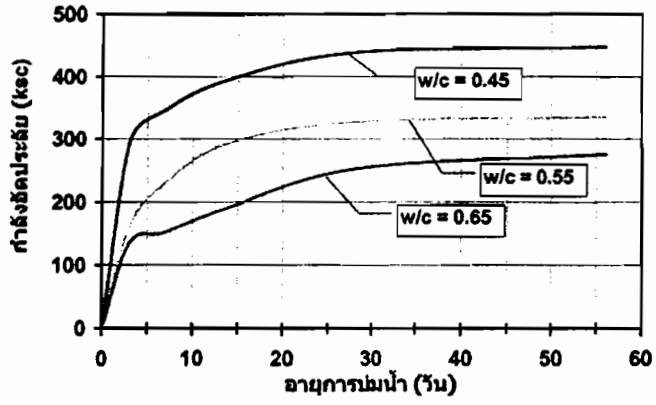
ชะลอการเคลื่อนที่ของรอยร้าวได้ดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างกลม ในกรณีพื้นผิวนั้นมวลรวมที่มีผิวหยาบส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวดีกว่ามวลรวมที่มีผิวเรียบ ซึ่งทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น ในส่วนของมวลรวมที่มีลักษณะของพื้นผิวที่มีรูพรุนสูงจะมีการดูดซึมซีเมนต์เพสท์เข้าไป ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวที่ดี



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.10 การล็อกจับระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีรูปร่าง (ก) เหลี่ยม และ (ข) กลม [5]

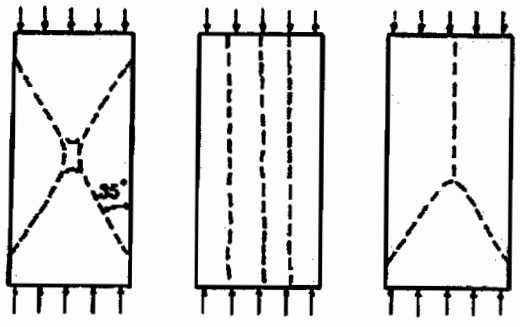
2.3.1.5 อายุของคอนกรีต โดยทั่วไปคอนกรีตมักจะถูกอ้างถึงกำลังที่อายุประมาณ 28 วัน โดยที่ประมาณ 28 วัน หรือ 1 เดือน ปฏิกิริยาหลักๆ ในคอนกรีตได้เกิดขึ้นเกือบจะครบหมดแล้ว [5] หลังจากนี้กำลังของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าและน้อย จะมีการพัฒนากำลังบ้างเหมือนกันแต่ก็ไม่เร็วเท่าในช่วงต้น โดยการพัฒนากำลังคอนกรีตจะมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป นอกจากนี้ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการยังพบว่า สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่างกันก็มีผลต่อพัฒนาการของกำลังแตกต่างกันไป โดยคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำจะมีอัตราการเพิ่มของกำลังในช่วง 28 วันแรกเร็วกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงก่อน 28 วันของคอนกรีตที่มีค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำนั้นจะมีความชันที่มากกว่า แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของกำลังที่เร็วกว่า แต่เมื่อเลย 28 วันแล้วผลของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลงและพบว่าความชันหรืออัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของกำลังจะช้าลงจนอยู่อัตราที่ใกล้เคียงกัน



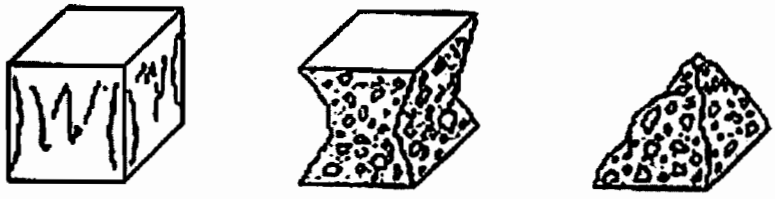
ภาพที่ 2.11 พัฒนาการของกำลังตามอายุคอนกรีต [5]

2.3.1.6 การบ่ม คือ กระบวนการส่งเสริมการเกิดไฮเดรชั่นในคอนกรีตอย่างต่อเนื่องไม่ขาดตอน ประกอบไปด้วยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นรอบๆ คอนกรีต วัตถุประสงค์โดยทั่วไปของการบ่ม คือรักษาสภาพของคอนกรีตให้มีความชื้นเต็มที่สม่ำเสมอ การจะให้คอนกรีตมีกระบวนการไฮเดรชั่นต่อเนื่องนั้นความชื้นสัมพันธ์ในอากาศจะต้องอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ในสภาพความเป็นจริงเป็นการยากที่จะหาสภาพความชื้นสัมพันธ์ขนาดนั้นได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการบ่มคอนกรีต [4]

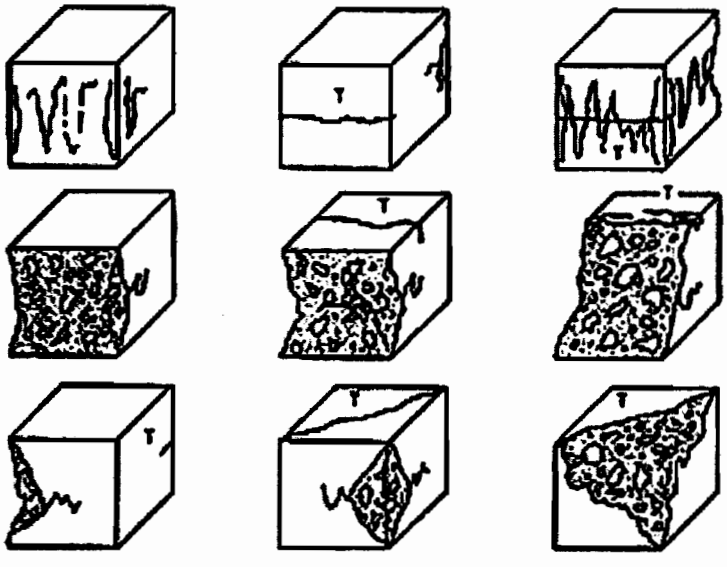
ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัดมักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่ได้รับแรงกด อันเนื่องมาจากการยึดเหนี่ยวของวัสดุผสมและความเสียดทานภายใน ดังนั้นมุมของการแตกหักจึงมักมีค่าเท่ากับ $45 - \frac{\phi}{2}$ เมื่อ ϕ เป็นมุมของความเสียดทานภายในของคอนกรีตซึ่งมีค่าประมาณ 20 องศา ดังนั้นระนาบของความเสียหายของตัวอย่างคอนกรีตจึงเบี่ยงประมาณ 35 องศา ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างอาจเป็นการแตกแบบแยกออก หรืออาจเป็นการรวมลักษณะแตกทั้ง 2 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 และ 2.13



ภาพที่ 2.12 การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก [5]



ภาพที่ 2.13 การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้องจะแตกเป็นรูปพีระมิด [5]



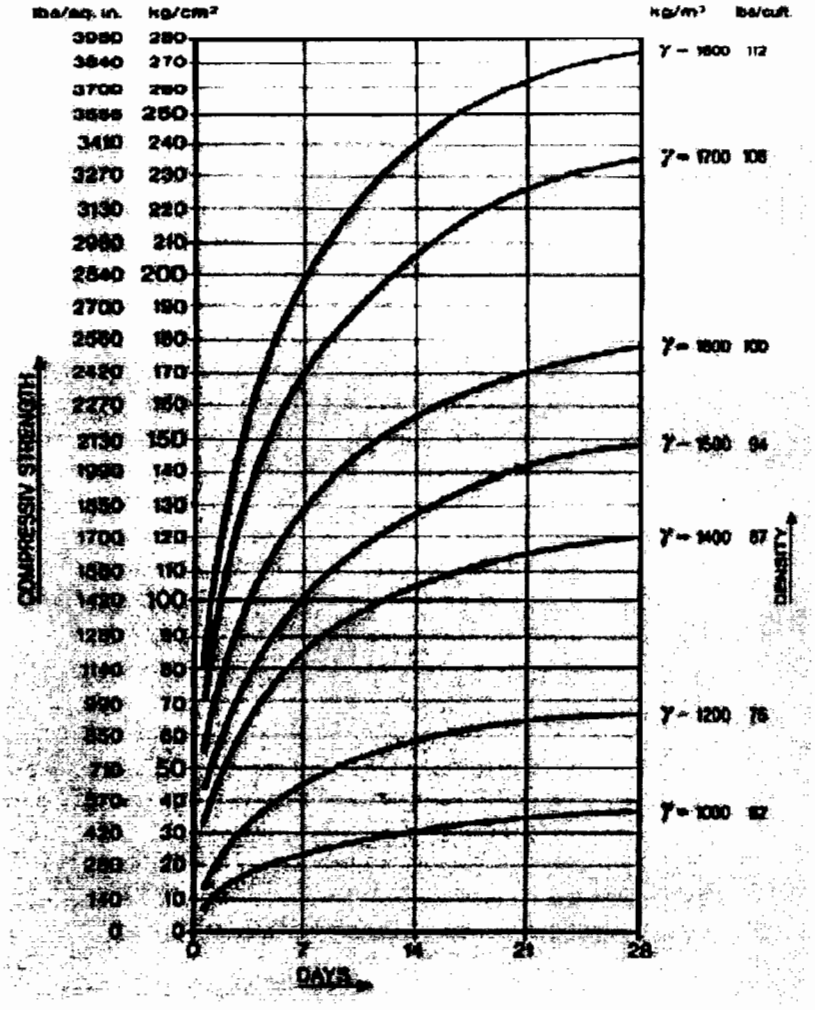
ภาพที่ 2.14 การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกต้อง (T = Tensile Crack) [5]

2.3.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีความพรุนสูงและมีน้ำหนักเบาเนื่องจากการแทนที่หินด้วยฟองโฟม คุณสมบัติในการต้านทานแรงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะเหมือนคอนกรีตทั่วไป กล่าวคือ รับแรงอัดได้แต่รับแรงดึงได้ต่ำ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และค่ากำลังจะแปรผันโดยตรงกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเป็นหลัก โดยค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่จะใช้ในการรับน้ำหนักทางโครงสร้างควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 160-180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งโดยประมาณแล้วจะสัมพันธ์กับค่าหน่วยน้ำหนักประมาณไม่ต่ำกว่า 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [7]

ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 10-40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ยกเว้นคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับโครงสร้างซึ่งค่ากำลังรับแรงอัด 105-420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [7] สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

มวลเบาทั่วไปอาจทำให้สูงขึ้นโดยการใช้ทรายธรรมชาติแทนมวลรวมน้ำหนักเบา แต่อาจทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักสูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แนวโน้มของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาขี่ห้อ LCM ที่หน่วยน้ำหนักต่างๆ [7]

สมชาย มณีวรรณ์ และคณะ [14] อ้างอิงข้อมูลว่า ปี ค.ศ.1967 ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้สารเคมีทำให้เกิดฟองแล้วจึงผสมเข้ากับคอนกรีต ทำให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่น 790-950 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัด 31-52 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ ปี ค.ศ.1970 ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ ทรายละเอียดและสารทำให้เกิดฟอง ได้เป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น

845 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัด 48 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 5.9×10^4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กรัณย์ กันพ้นภัย และคณะ [10] กล่าวว่า สำหรับประเทศไทยนั้น ได้มีการเริ่มค้นคว้าเมื่อไม่นานมานี้โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรีได้ทำการศึกษาก่อนตั้งแต่ปี พ.ศ.2525 แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่ได้นำเทคโนโลยีคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามาใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากนัก ในปี พ.ศ.2525 ได้ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ผงซักฟอก 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์เป็นตัวกำเนิดฟองโฟม อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ผสมรวมกันเป็นเวลา 1-2 นาที จากนั้นอัดอากาศเข้าไปในส่วนผสมเป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที ปรากฏว่าได้คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติดีที่สุดโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.8 และเวลาอัดอากาศเท่ากับ 3 นาที ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่น 1,060 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังรับแรงอัด 5.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อายุคอนกรีตที่ 28 วัน

ต่อมาในปี พ.ศ.2526 ได้ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบา โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 แต่คราวนี้ใช้ผงซักฟอง 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ผสมกับน้ำให้เกิดฟองก่อนเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงผสมกับทรายและซีเมนต์จนกระทั่งครบ 15 นาที ปรากฏว่าได้คอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติดีที่สุดโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 และปริมาณผงซักฟอก 4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่น 1,090 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังรับแรงอัด 26.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อายุคอนกรีตที่ 28 วัน

พ.ศ.2528 ได้ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบา โดยกำหนดตัวแปรไว้ 3 อย่างคือ เวลาการผสม ปริมาณสารเคมี และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ค่าคงที่คืออัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2 ต่อ 1 พบว่าปัจจัยตัวแปรทั้ง 3 ที่กำหนดขึ้นมานั้นมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา จากการทดสอบทำให้ได้คอนกรีตพรุนที่มีความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ 1,090 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้เวลาในการผสม 5 นาที อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.6 ปริมาณสารเคมี 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ กำลังรับแรงอัด 27.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังอัดสูงสุดมีความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้เวลาในการผสม 5 นาที อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 ปริมาณสารเคมี 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ รับกำลังอัดได้ 71.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

และสุดท้ายปี พ.ศ.2530 ได้ทำการศึกษาและประดิษฐ์คอนกรีตมวลเบาประเภทโฟมคอนกรีตขึ้น ทำให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1,100-1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 20-70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ [15] ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนักระหว่าง 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร พบว่าเมื่อปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะลดลงและมีผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงด้วย โดยจากการทดสอบได้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 15-230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สุเมธ สันทัดวัฒนา และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาถึงคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นระหว่าง 600-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 1 ต่อ 1 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะแปรผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ยิ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยการเรียงตัวของอนุภาคหนาแน่นกว่า และมีน้ำส่วนเกินน้อย ทำให้ได้รับกำลังรับแรงอัดมากกว่า โดยมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 5-300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ศิวะ วาสาลา [17] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1,200-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และ 0.5 จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ผสมโฟมปริมาณต่างๆซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1,400-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย ตั้งแต่ 1 ต่อ 1 1 ต่อ 2 และ 1 ต่อ 3 พบว่าสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ 1 ต่อ 2 ให้กำลังอัดสูงสุดหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้ามากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ามากขึ้น ซึ่งกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 อายุของตัวอย่าง 0.4 จะมีค่าอยู่ในช่วง 120-350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ 0.5 มีค่าอยู่ในช่วง 100-240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 จากการศึกษาการหดตัวของมอร์ต้าที่ผสมโฟมที่ปริมาณต่างๆ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อทราย 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนักพบว่า การหดตัวมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุของมอร์ต้าเพิ่มขึ้น และเมื่อหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้า

2.4 การหดตัวแบบแห้ง

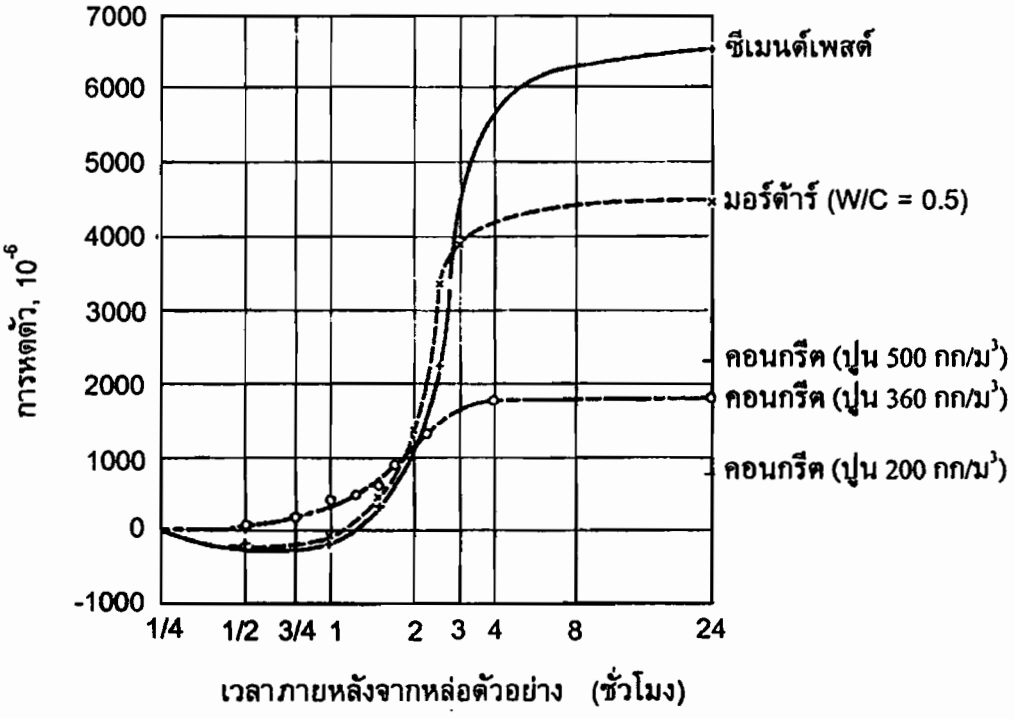
หนึ่งในปัญหาของงานก่อสร้าง คือ รอยแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งในหลายกรณีอาจไม่ทำให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างมีปัญหา แต่ก็ทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงมากได้ นอกจากนี้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมักจะก่อให้เกิดข้อพิพาทระหว่างผู้ปฏิบัติงานก่อสร้าง กล่าวคือผู้ออกแบบ ผู้คุมงานก่อสร้าง ผู้รับเหมา และ ผู้ผลิตคอนกรีต [8] การแตกร้าวของคอนกรีตนั้นเกิดได้จากหลายสาเหตุ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตโดยเฉพาะการหดตัวแบบแห้งเป็นสิ่งที่พบเห็นได้โดยทั่วไปในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างสูง

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตแข็งตัวแล้วอยู่ในสภาวะที่อากาศมีความชื้นต่ำทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัวโดยการหดตัวที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่ ถ้าการหดตัวนี้เกิดการยึดรั้งด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้างหรือด้วยเนื้อคอนกรีตและหน่วยแรงยึดรั้งที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้นก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น [8]

2.4.1 ประเภทการหดตัวของคอนกรีต

การหดตัว คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเมื่อเกิดการสูญเสียน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีของส่วนผสม การหดตัวของคอนกรีตมี 4 ประเภท [3] โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1.1 การหดตัวพลาสติก คือ การหดตัวจากการสูญเสียน้ำในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรือยังอยู่ในสภาพพลาสติก การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดลงและเกิดการหดตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายหลังการก่อตัว ดังนั้นการหดตัวในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นค่อนข้างสูง แต่ภายหลังจากการที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัวแล้วการหดตัวจะเกิดได้ยากขึ้น เพราะซีเมนต์เพสต์เริ่มมีกำลังสูงขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตยังสูญเสียน้ำโดยการระเหยจึงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์และคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 2.18 และการหดตัวของคอนกรีตจะมากขึ้นเมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูงขึ้น



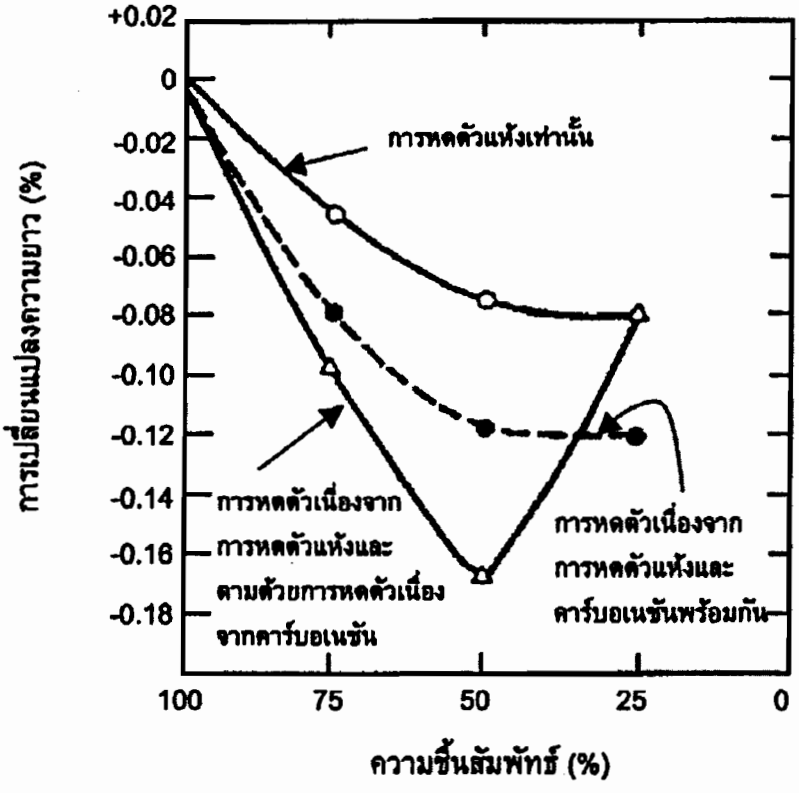
ภาพที่ 2.16 การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีต [8]

2.4.1.2 การหดตัวด้วยตัวเอง ภายหลังจากการก่อตัว ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะยังคงมีต่อไป ในกรณีที่ไม่มีความชื้นหรือไม่มีน้ำเข้าออกอาจทำให้ปูนซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีการนำน้ำที่อยู่ในโพรงมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเรียกการหดตัวชนิดนี้ว่า การหดตัวด้วยตัวเองและในบางครั้งคอนกรีตอาจใช้น้ำจนแห้ง การหดตัวด้วยตัวเองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแกนภายในของคอนกรีตขนาดใหญ่ และในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ โดยทฤษฎีมีค่าคือต่ำกว่า 0.42

ขนาดของการหดตัวชนิดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการหดตัวแห้ง แม้ว่าการหดตัวด้วยตัวเองจะเกิดขึ้นทั้งสามทิศทาง แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมบอกเป็นค่าตามยาวในรูปของหน่วยความเครียดเพื่อให้สามารถใช้พิจารณาร่วมกับการหดตัวแห้งได้ การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีตมีค่าประมาณ 100×10^{-6} ขณะที่การหดตัวด้วยตัวเองของมอร์ต้าร์มีค่าประมาณ 300×10^{-6} [6] การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และตามปริมาณและความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของ C_3A และ C_4AF สูงมีแนวโน้มการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการหดตัวนี้ได้ การดูดน้ำหรือความชื้นจากโพรงคาปิลารีจะมีค่าสูงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำจึงทำให้เกิดการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้นได้ กรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อ

ปูนซีเมนต์ที่ต่ำมาก เช่น เท่ากับ 0.17 พบว่าการหดตัวด้วยตัวอย่างมีค่าสูงถึง 700×10^{-6} [18] การหดตัวด้วยตัวเองมีความสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมากและในกรณีของงานคอนกรีตขนาดใหญ่มาก

2.4.1.3 การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีอยู่เปอร์เซ็นต์ 0.03 ถึง 0.04 ในอากาศ และทำให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว [6] ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นและเรียกการหดตัวที่เกิดขึ้นการหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น (Carbonation shrinkage) การหดตัวดังกล่าวเกิดมากในบริเวณที่มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น คอนกรีตที่อยู่บริเวณถนนที่มีการจราจรหนาแน่น หรือในอุโมงค์ที่รถยนต์วิ่งผ่าน เป็นต้น การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงมากและต่ำมากจะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นได้ยาก ในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีความชื้นอยู่มากจึงป้องกันไม่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าสู่เนื้อคอนกรีต และในกรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ถึงแม้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมเข้าได้แต่ในโพรงของซีเมนต์เพสต์มีน้ำไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดกรดคาร์บอนิคและปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ดังแสดงในภาพที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ทำให้เกิดการหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่นสูงสุด



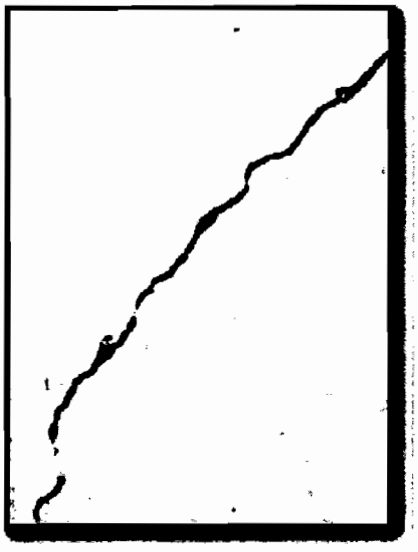
ภาพที่ 2.17 การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น [3]

2.4.1.4 การหดตัวแบบแห้ง เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยกลไกการหดตัวของคอนกรีตนั้นเกิดจากน้ำที่เติมเต็มอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Capillary Pore) เกิดการระเหยออก เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงตึงผิวในช่องว่างคาปิลลารีเกิดขึ้น (Capillary Surface Tension) จึงทำให้คอนกรีตที่อยู่โดยรอบช่องว่างคาปิลลารีนั้นเกิดการอัดตัวเข้ามาเนื่องจากการรักษาสมดุลของแรง เป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวนั่นเอง [19] ดังแสดงในภาพที่ 2.18 หากการออกแบบและก่อสร้างคอนกรีตไม่ได้เผื่อการหดตัวแห้งอย่างเพียงพอแล้ว จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตได้ ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยึดรั้งของโครงสร้าง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนในเรื่องนี้ คือ การตัดหรือสร้างร่องในพื้นถนนหรือพื้นคอนกรีตสำหรับเผื่อการหดตัวและการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อป้องกันรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบไม่มีทิศทาง และไม่สวยงาม

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว รอยแตกตามมุมช่องเปิดของหน้าต่างหรือประตูก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของบริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.19 ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปได้เรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังจากสิ้นสุดการบ่ม

(ก) (ข)

ภาพที่ 2.18 การระเหยของน้ำในโพรง (ก) แรงดึงในโพรงทำให้คอนกรีตหดตัว (ข) [8]



ภาพที่ 2.19 การแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง [8]

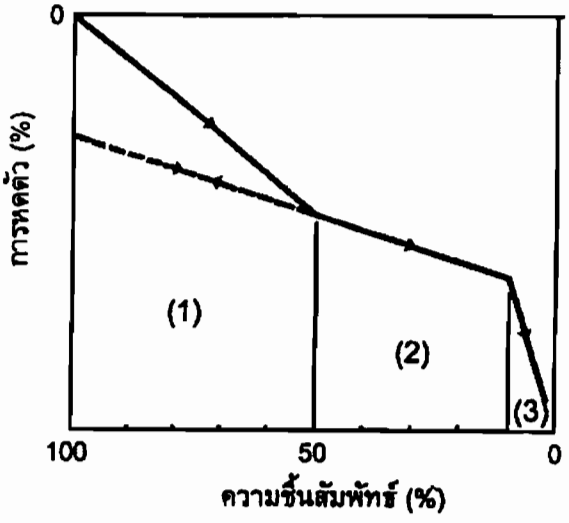
2.4.2 กลไกการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน [3] ดังนี้

2.4.2.1 การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อน ตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลารีที่มีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในโพรงเกิดเป็นผิวโค้งและเกิดแรงดึงผิว ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอกหรือที่อยู่ในโพรงขนาดจิ๋วมีส่วนทำให้เกิดการหดตัว

2.4.2.2 การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสในช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงอากาศถูกขจัดออกไปและแรงตึงผิวจะหมดไป การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำดูดซับ ที่ผิวของอนุภาคของเจลเป็นหลัก ซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนัก เมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้ายและทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้

2.4.2.3 การหดตัวในช่วงความสัมพัทธ์ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การหดตัวช่วงแรกเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าสูญเสียความชื้นอย่างรุนแรงและนานพอจะทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร



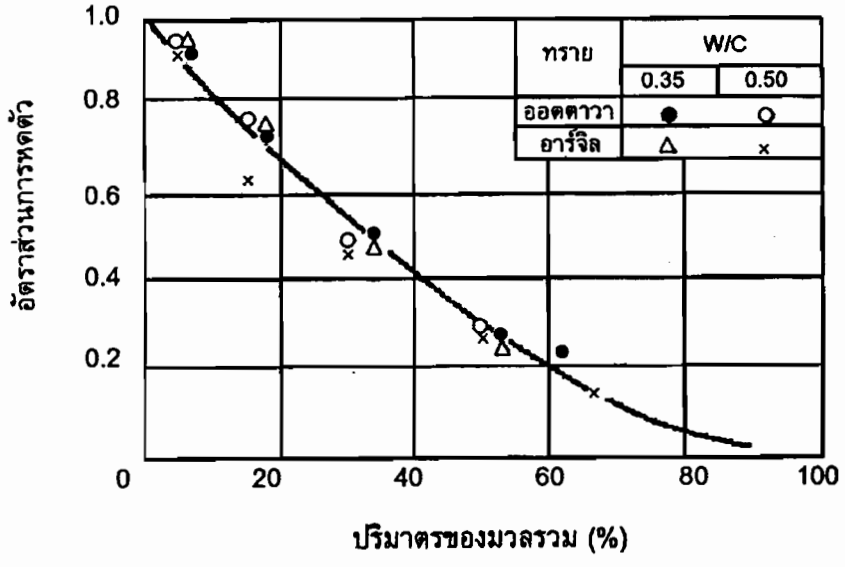
ภาพที่ 2.20 การหดตัวแห้งของซีเมนต์เพสต์ [3]

2.4.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำและปูนซีเมนต์ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ รูปร่างและขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัวเพราะเหล็กช่วงยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง [19]

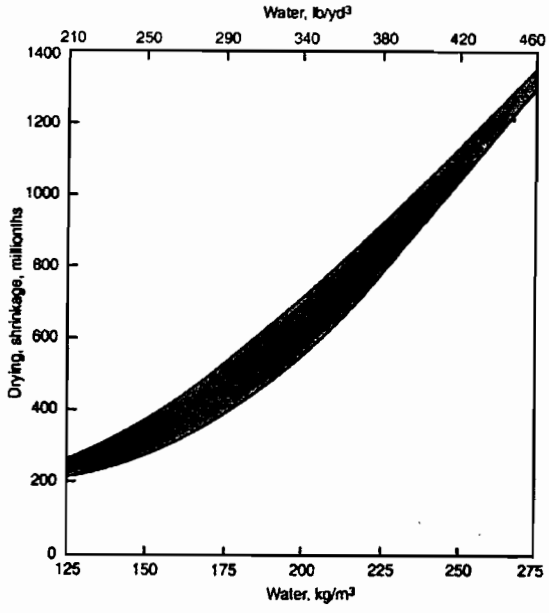
2.4.3.1 มวลรวม เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว สารประกอบในเพสต์จะมีผลให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในมอร์ต้ามากกว่าคอนกรีต [20] ดังนั้น การเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และลดการหดตัวได้อย่างดี ดังแสดงในภาพที่ 2.21 นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ กำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น ความพรุน ลักษณะของผิว รูปร่าง ปริมาณ ขนาด และขนาดคละ มวลรวมที่แข็งแกร่งมีการดูดซึมน้ำน้อยและมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย กำลังของมวลรวมโดยทั่วไปสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก การใช้หิน ทราย และมวลรวมเบา ซึ่งไม่แข็งแกร่งจะทำให้คอนกรีตมีการหดตัวสูงกว่าการใช้หินควอร์ตในส่วนผสมคอนกรีต ขณะที่หินปูนและหิน

อ่อนจะให้การหดตัวต่ำ ส่วนหินบะซอลต์ กรวด และหินแกรนิตจะให้การหดตัว ปานกลาง ขนาดคละและขนาดของวัสดุผสมจะมีผลทางอ้อมต่อการหดตัวของคอนกรีต คอนกรีตที่มีขนาดคละของวัสดุผสมที่ใช้กันทั่วไปจะมีการหดตัวใกล้เคียงกัน การใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยลง จึงทำให้การหดตัวน้อยลงด้วย ส่วนรูปร่างของวัสดุผสมจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการหดตัว การใช้ปริมาณมวลรวมละเอียดสูง หรือการใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กล้วนแต่เพิ่มการหดตัวของคอนกรีต [10] การใช้มวลรวมก้อนกลมสามารถลดปริมาณน้ำได้ซึ่งการลดปริมาณน้ำจะทำให้การหดตัวแห้งลดลงได้ การเพิ่มปริมาตรของหินโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ทำให้การหดตัวลงได้ การเพิ่มปริมาตรของหินโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ทำให้การหดตัวลดลงแต่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวต่ำลงด้วย



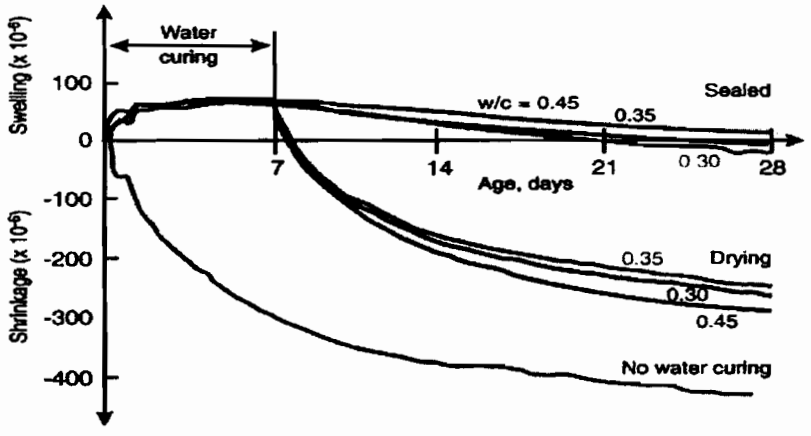
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของมวลรวมกับการหดตัว [3]

2.4.3.2 ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ ปัจจัยที่ควบคุมได้ที่สำคัญที่สุดและมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งคือ ปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีต [20] ผลการทดสอบแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำต่อการหดตัวดังแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำต่อการหดตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.22 การหดตัวสามารถทำให้น้อยลงที่สุดได้ด้วยการใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

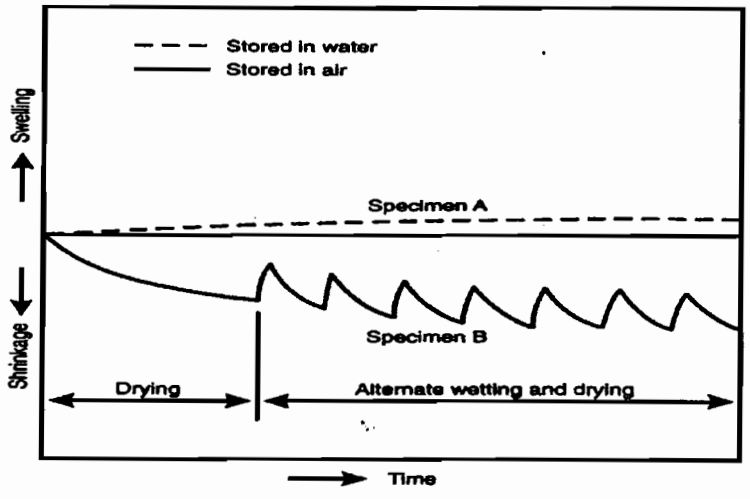


ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำทั้งหมดและการหดตัวแบบแห้ง [20]

2.4.3.3 ความชื้น ความชื้นอาจแบ่งได้เป็นความชื้นขณะที่บ่มคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตากแห้ง การบ่มที่ดีจะทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น ทำให้โพรงคาปิลารีน้อยลงและคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น [3] มีการพบว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำ 7 วัน มีการหดตัวแห้งและการหดด้วยตัวเองน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มในน้ำ ดังนั้นการบ่มคอนกรีตในน้ำที่อายุช่วงต้นจะช่วยให้สามารถช่วยลดการหดตัวได้ [20] ดังแสดงในภาพที่ 2.23 และการใช้ความดันสูงในการบ่ม คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วขยายตัวเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มความชื้นและเกิดการหดตัวเมื่อขาดความชื้น ผลของวัฏจักรความชื้นเหล่านี้ดังแสดงในภาพที่ 2.24 การบวมตัวเกิดขึ้นระหว่างการบ่มในน้ำต่อเนื่องตลอดเวลาหลายปี โดยปกติมีค่าน้อยกว่า 150 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งมีค่าเพียงแค่ประมาณหนึ่งในสี่ของการหดตัวของคอนกรีตที่ทำให้แห้งในระยะเวลาเท่ากัน [20]



ภาพที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงทางความยาวของตัวอย่างที่บ่มแตกต่างกัน [20]



ภาพที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในคอนกรีต [20]

2.4.3.4 ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปส่วนในของคอนกรีต ซึ่งใช้เวลานานมากถ้าเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ [3] อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวมาก ชิ้นส่วนขนาดใหญ่ก็จะมีการหดตัวที่ต่ำกว่า [20] ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่า การหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต

Benjamin [14] ปี ค.ศ.1967 ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้สารเคมีทำให้เกิดฟองแล้วจึงผสมเข้ากับคอนกรีต ทำให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่น 790-950 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการหดตัวที่ 180 วัน เท่ากับ 0.2-0.6 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและมีน้ำหนักเบา

สุเมธ สันทัดวัฒนา และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาถึงคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นระหว่าง 600-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 1 ต่อ 1 พบว่าค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ความหนาแน่นน้อยมีช่องอากาศมากทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าความหนาแน่นมาก โดยมีอัตราการหดตัวแห้งอยู่ระหว่าง 550-1,100 ไมโครสเตน

อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชญ์ และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาถึงการหดตัวแห้งและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเปียกระหว่าง 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 และ 0.55 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 ทดสอบคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35 และ 56 วัน พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของคอนกรีต เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นการหดตัวจะลดลง โดยมีค่าการหดตัวแห้งอยู่ระหว่างร้อยละ 0.067-0.252

ศิวะ วาสาลา และคณะ [17] ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1,200-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และ 0.5 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่อทราย 1ต่อ1 โดยน้ำหนัก พบว่าการหดตัวมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุมอร์ต้าเพิ่มขึ้น และเมื่อหน่วยน้ำหนักมอร์ต้าเพิ่มขึ้นการหดตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลง การหดตัวของมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 และ 0.5 พบว่ามีค่าระหว่าง 432 x 10^{-6}-492 x 10^{-6} ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 และมีค่าระหว่าง 393x10^{-6}–649x10^{-6} ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5

2.4.4 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมน้ำหนักเบาโดยทั่วๆ ไปมีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ส่วนคอนกรีตพรุนจะมีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมน้ำหนักเบา 5-10 เท่าในบางครั้ง [4] ค่าการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาอาจมีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 5-40 เปอร์เซ็นต์ ค่าการหดตัวเหล่านี้จำเป็นสำหรับการนำมาคิดเพื่อออกแบบในการป้องกันการแตกร้าว เช่น การเสริมเหล็กเพิ่มตามจุดต่าง ๆ

คอนกรีตมวลเบามักถูกใช้เป็นวัสดุฉนวน การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนหรือวัสดุที่ไม่ได้รับแรงหลัก โดยทั่วไปจะไม่ส่งผลต่อความวิบัติของ

โครงสร้าง แต่หากการหดตัวแห้งของคอนกรีตเกิดขึ้นที่โครงสร้างหลักรับแรงก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาและหาทางแก้ไข อัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างตั้งแต่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ชนิดและปริมาณส่วนผสม วิธีการบ่มคอนกรีตและปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ด้วย

การหดตัวแห้งของคอนกรีตแปรผกผันกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตและปริมาณมวลรวมละเอียด หมายความว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตสูงและปริมาณทรายมาก [4] วัสดุปอซโซลาน บางประเภท เช่น เถ้าลอย สามารถใส่ผสมคอนกรีตเพื่อลดการหดตัวของคอนกรีตได้ ฉนวนคอนกรีตที่ผสมเพอร์ไลท์หรือหินพูมิสจะมีอัตราการหดตัวแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.3 เท่านั้น ในระยะเวลา 6 เดือน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าผสมหินเวอร์มิคูไลท์ จะมีค่าประมาณร้อยละ 0.2-0.45 คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ใช้มวลรวมเลยจะมีอัตราการหดตัวแห้งสูง [9]

คอนกรีตมวลเบาที่บ่มด้วยความชื้น มีอัตราการหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ 0.06-3 เปอร์เซ็นต์ [22] การบ่มคอนกรีตแห้งในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มด้วยความชื้น อย่างไรก็ตามขึ้นกับปริมาณของทรายที่ใช้ด้วย เช่น คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าบ่มแห้งในอากาศใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.5 ต่อ 1 ให้หน่วยน้ำหนัก 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าอัตราการหดตัวแห้งเพียงประมาณ 0.18 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น [23] ส่วนคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำจะมีการหดตัวแห้งน้อยมากคือประมาณ 1 ใน 4 ถึงประมาณ 1 ใน 5 เท่าของค่าการหดตัวแบบแห้งที่เกิดในคอนกรีตมวลเบาแบบไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำ [19] สำหรับการหดตัวแบบแห้งของวัสดุชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่างๆ [12]

วัสดุ	การหดตัวเมื่อแห้ง
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด	
มวลรวมหยาบได้จากวัสดุธรรมชาติ	0.018
มวลรวมหยาบน้ำหนักเบา	0.025
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา	
Expanded vermiculite	0.25-0.35
Pumice	0.04-0.10
Foamed slag	0.03-0.07
คอนกรีตฟองอากาศ (Aerated concrete)	
หล่อสำเร็จ (Precast)	0.05
หล่อในสถานที่ก่อสร้าง (In-situ)	0.5
คอนกรีตพรุน ไลท์บิล์ท (LITEBUILT®) [11]	0.1
คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า นีโอโพร์ (Neopor)	
ที่หน่วยน้ำหนัก 1200, 1400, 1600 กก./ลบ.ม. [7]	0.20, 0.18, 0.16
ดีคอนบล็อก ระบบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	
ที่หน่วยน้ำหนัก 800-1000 กก./ลบ.ม. [24]	0.07
คิวคอน ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง	
ที่หน่วยน้ำหนัก 800 กก./ลบ.ม. [25]	0.02
คอนกรีตธรรมดา	0.145

2.5 ฟองอากาศในคอนกรีต

ในคอนกรีตสดจะมีฟองอากาศอยู่ด้วยเสมอแม้จะทำให้คอนกรีตแน่น ปกติคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีฟองอากาศไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่ถ้าเติมสารกักกระจายฟองอากาศลงไปปริมาณฟองอากาศจะเพิ่มเป็น 4 -10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร [13] อากาศในคอนกรีตมีลักษณะเป็นช่องว่างกระจายอยู่ทั่วไป ช่องว่างเหล่านี้ประมาณเท่าขนาดของเมล็ดทรายละเอียด ถ้ามีปริมาณอากาศมากเกินไปจะทำให้กำลังและความคงทนของคอนกรีตลดลง แต่ถ้ามีปริมาณฟองอากาศน้อยเกินไปก็จะทำให้ขาดความสามารถในการเทได้และความคงทน ปริมาณฟองอากาศที่พอเหมาะในคอนกรีตสดช่วยลดปริมาณน้ำผสมคอนกรีต ช่วยให้ทำงานง่ายขึ้น ลดการเยิ้มและการแยกตัวและลด

หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด การลำเลียง การเทและการทำคอนกรีตให้แน่นจะลดปริมาณฟองอากาศ [14]

คุณสมบัติที่เด่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า คือ ถ้าเลือกใช้น้ำยาโฟมหรือฟองอากาศที่มีเสถียรภาพที่ดี เทคโนโลยีด้านวัสดุและเทคโนโลยีในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม โพรงที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่ได้จะเป็นทรงกลม โพรงอากาศเป็นแบบปิด และการกระจายตัวสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต ทำให้คุณสมบัติต่างๆ เช่น การรับแรง การเป็นฉนวนกันความร้อน ในแต่ละทิศทางใกล้เคียงกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นและแตกต่างจากคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ เนื่องจากฟองอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดการขยายขึ้นในทิศทางเดียว คือ ในแนวดิ่ง ส่งผลให้คุณสมบัติโดยเฉพาะอย่างยิ่งการรับแรงในแต่ละแกนมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังภาพที่ 2.25

(ก) (ข)

ภาพที่ 2.25 (ก) ลักษณะโพรงอากาศแบบปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ข) ลักษณะโพรงอากาศแบบเปิดของคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ [14]

2.5.1 ชนิดของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด [5] คือ

2.5.1.1 **โพรงอากาศที่มีปนอยู่ในเนื้อคอนกรีตตามธรรมชาติ** โพรงอากาศชนิดนี้เป็นโพรงอากาศที่เกิดขึ้นเองในเนื้อคอนกรีต มีเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศประมาณ 1 มิลลิเมตรถึงใหญ่กว่า โดยทั่วไปเนื้อคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเติมสารกระจายกักฟองอากาศจะมีโพรงอากาศอยู่ประมาณ 0.5-2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้จะมีความเสถียรต่ำ

และไม่กระจายตัวทั่วเนื้อคอนกรีต ขนาดและปริมาณโพรงอากาศในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผสม สัดส่วนของส่วนผสม ชนิดและระยะเวลาการผสม วิธีการเทหล่อและวิธีการบดอัด

2.5.1.2 ฟองอากาศที่มีปนอยู่ในเนื้อคอนกรีตเนื่องจากการเติมสารกักกระจายฟองอากาศ เป็นฟองอากาศที่เกิดเนื่องจากการเติมสารกักกระจายฟองอากาศลงในคอนกรีตเพื่อเพิ่มปริมาณฟองอากาศ โดยทั่วไปฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรสูงและมีการกระจายตัวที่ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 0.01-1 มิลลิเมตรและมีปริมาณในเนื้อคอนกรีตประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์ ฟองอากาศเหล่านี้จะกระจายอยู่อย่างเสมอแต่ไม่ต่อเนื่องกันแม้ว่าคอนกรีตจะอิ่มตัวด้วยน้ำ ฟองอากาศเหล่านี้ก็ยังมีน้ำบรรจุอยู่ไม่เต็ม การระบุจำนวนฟองอากาศใช้ในพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 16-25 ตารางมิลลิเมตรต่อลูกบาศก์เมตร การใช้สารกักกระจายฟองอากาศช่วยลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตลง แต่ยังทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้ดีขึ้น การเพิ่มฟองอากาศประมาณร้อยละ 5 ทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีต เพิ่มขึ้น 20-50 มิลลิเมตรหรือสามารถลดปริมาณน้ำได้ 20-30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ค่ายุบตัวของคอนกรีตสดเท่าเดิม นอกจากนี้การเยิ้มน้ำและการแยกตัวก็จะลดลงด้วย แต่การใช้สารกักกระจายฟองอากาศมากเกินไป ทำให้ความคงทนของคอนกรีตลดลง เนื่องจากคอนกรีตที่ได้จะมีกำลังต่ำลง นอกจากนี้การใช้สารกักกระจายฟองอากาศในปริมาณมากยังจะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวและแต่งผิวหน้าลำบาก เนื่องจากมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์มากเกินไป

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณอากาศในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย สามารถแบ่งได้ 5 ประการ [19] ประกอบด้วย

2.5.2.1 คุณภาพของวัสดุผสมคอนกรีต วัสดุผสมคอนกรีตโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด น้ำและสารผสมเพิ่ม ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีตเหล่านี้จะมีผลต่อปริมาณฟองอากาศและคุณภาพของคอนกรีต ได้แก่

1) ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณอัลคาไลน์สูงจะทำให้ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นแต่ฟองอากาศที่ได้จะมีความเสถียรต่ำ โดยที่ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจะลดลงเมื่อปูนซีเมนต์ละเอียดมากขึ้น

2) เถ้าลอย เมื่อนำเถ้าลอยผสมลงในคอนกรีตจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศให้มากขึ้น เนื่องจากคาร์บอนในเถ้าลอยจะดูดซับสารกักกระจายฟองอากาศบางส่วนไว้

3) มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต คือ ขนาดโตสุด ขนาดคละ รูปร่างและความสะอาด โดยทั่วไปมวลรวมที่เลือกใช้ควรมี

ขนาดคละที่ดีและเป็นมวลรวมที่สะอาด เนื่องจากจะทำให้ฟองอากาศที่ได้มีความเสถียรสูงและมีปริมาณตามที่ต้องการ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณทรายในสัดส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้นจะมีแนวโน้มให้ฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่หากเลือกใช้มวลรวมที่มีขนาดโตสุดใหญ่มากปริมาณฟองอากาศก็จะลดลง

4) น้ำสำหรับผสมคอนกรีต ในการผสมคอนกรีตควรเลือกใช้น้ำที่สะอาด เนื่องจากน้ำที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงจะทำให้ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมากผิดปกติ

5) สารผสมเพิ่ม ไม่ว่าจะเป็นสารหน่วงการก่อตัว สารลดปริมาณน้ำหรือสารลดปริมาณน้ำจำนวนมากจะให้ผลเพิ่มปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต ดังนั้นในการใช้งานควรมีการทดลองผสมเพื่อให้ทราบปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มชนิดต่างๆที่แน่นอนก่อน

2.5.2.2 กระบวนการผสมคอนกรีต สิ่งสำคัญของคอนกรีตคือ การได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามที่กำหนด รวมทั้งมีขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถต้านทานความเสียหายเนื่องจากการแข็งและการละลายของน้ำได้ ดังนั้นกระบวนการผสมคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ได้คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศที่ดี ดังนั้นในกระบวนการนี้จึงควรให้ความระมัดระวังตั้งแต่ขั้นตอนการผสม ประสิทธิภาพของเครื่องผสมและระยะเวลาที่ใช้ผสม ในส่วนของขั้นตอนการผสมเพื่อให้ได้คุณภาพของคอนกรีตที่ดีที่สุดควรเติมสารกักกระจายฟองอากาศพร้อมทรายหรือพร้อมน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต โดยในขั้นตอนนี้ห้ามเติมสารกระจายกักฟองอากาศในปูนซีเมนต์โดยตรงก่อนการผสมเนื่องจากอนุภาคของปูนซีเมนต์จะไปขัดขวางการเกิดฟองอากาศทำให้ได้ปริมาณฟองอากาศน้อยกว่าปกติ ส่วนของโม่ผสมคอนกรีตควรมีการตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆ ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ เช่น สภาพใบกวน แขนใบกวน เป็นต้น ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ผสมคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศนี้สำหรับโรงงานผสมคอนกรีตทั่วไปควรใช้ระยะเวลาในการผสมประมาณ 60-150 วินาที

2.5.2.3 การส่งคอนกรีตและการเทเข้าแบบ โดยปกติคอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ จะมีการสูญเสียฟองอากาศขณะขนส่งประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง แต่ถ้าเป็นคอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมากกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ ค่าการสูญเสียปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตอาจสูงถึง 4 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง โดยในระหว่างที่คอนกรีตเกิดการสูญเสียปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตนี้ คอนกรีตมักจะสูญเสียค่าความยุบตัวไปพร้อมๆ กันด้วย ดังนั้นหากมีการจำเป็นต้องแก้ไขหรือเพิ่มค่าความยุบตัวหน้างาน ควรระมัดระวังในเรื่องการเติมน้ำเพิ่มและจดบันทึกปริมาณน้ำที่เติมเพิ่มเสมอ

2.5.2.4 การบดอัดคอนกรีต ในขั้นตอนการอัดบดอัดคอนกรีตปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตจะประกอบไปด้วยค่าความยุบตัวของคอนกรีต ระยะเวลาที่ใช้ในการบดอัดและค่าความถี่ของเครื่องจี้เขย่าคอนกรีต หากทำการบดอัดไม่เหมาะสมหรือใช้เวลานานเกินไปก็จะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมากนัก

2.5.2.5 การตกแต่งผิวคอนกรีต ในส่วนของการตกแต่งผิวหน้าของคอนกรีตจะมีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตที่บริเวณชั้นผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับการกระทบโดยตรง หากคอนกรีตกระจายฟองอากาศที่ทำการตกแต่งผิวหน้าเป็นคอนกรีตที่มีคุณภาพดี ไม่มีการเยิ้มและแยกตัว การตกแต่ผิวหน้าคอนกรีตก็จะไม่กระทบต่อปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตที่บริเวณผิวหน้ามากนัก

มีชัย เข็มธนู และคณะ [26] ได้ศึกษาเรื่อง ปริมาณช่องว่างอากาศและค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยศึกษาที่ความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 3 พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีปริมาณช่องว่างอากาศ 20-60 เปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ โดยความหนาแน่นแปรผกผันกับปริมาณช่องว่างอากาศ

2.6 การนำความร้อน

การเลือกใช้วัสดุสำหรับก่อสร้างสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาเป็นสำคัญก็คือความสามารถในการหน่วงลดการไหลของความร้อนหรือการนำความร้อน วัสดุก่อสร้างที่เป็นฉนวนกันความร้อนทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานหรือหน่วงการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด [10] ได้แก่

(1) การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันไปเรื่อยๆ จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างเช่นหากเราจับทัพพีในหม้อหุงข้าวความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านทัพพีมายังมือของเรา ทำให้เรารู้สึกร้อน โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี อโลหะและอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่เลว

(2) การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนจึงมากมักเกิดขึ้นในบรรยากาศและมหาสมุทร รวมทั้งภายในโลกและดวงอาทิตย์

(3) การแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทางโดยมิต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อนและการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถ

ถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -273 องศาเซลเซียส หรือ 0 องศาเคลวิน ย่อมมีการแผ่รังสี วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว แต่ทว่าในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนทั้งสามชนิดอาจเกิดขึ้นพร้อมๆ กันอย่างแยกไม่ออก

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การเป็นตัวนำอุณหภูมิ (Coefficient of Thermal Conductivity) ใช้ตัวย่อเป็นอักษร K หมายถึง อัตราการไหลของความร้อนอย่างสม่ำเสมอหนึ่งหน่วยผ่านวัสดุที่มีความหนาหนึ่งหน่วยและมีพื้นที่หน้าตัดแต่ละด้านเท่ากับหนึ่งหน่วย ในซีเมนต์เพสต์จะมีค่า K อยู่ประมาณ 1-1.5 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน ในส่วนของมวลรวมหินทั่วไปจะมีค่า K อยู่ประมาณ 3 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน [6]

ค่า K ของวัสดุมักจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัว แต่ที่สำคัญคือความชื้น โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า K เพิ่มมากขึ้น นอกเหนือจากความชื้นแล้วในคอนกรีตค่า K ยังขึ้นกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเช่นกัน โดยคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำหรือมวลเบามักจะมีค่า K ต่ำ [7] อันเนื่องจากปริมาณของรูพรุนหรือฟองอากาศมาก ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการกักฟองอากาศหรือใช้มวลรวมพรุนมีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเนื่องจากคุณสมบัติพิเศษคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ ซึ่งช่องอากาศเหล่านี้จะทำหน้าที่ลดทอนหรือยึดหน่วงพลังงานความร้อนเอาไว้ไม่ให้ผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางตลอดเวลาระหว่างเนื้อวัสดุและช่องอากาศจึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างดี ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา แสดงในตารางที่ 2.6

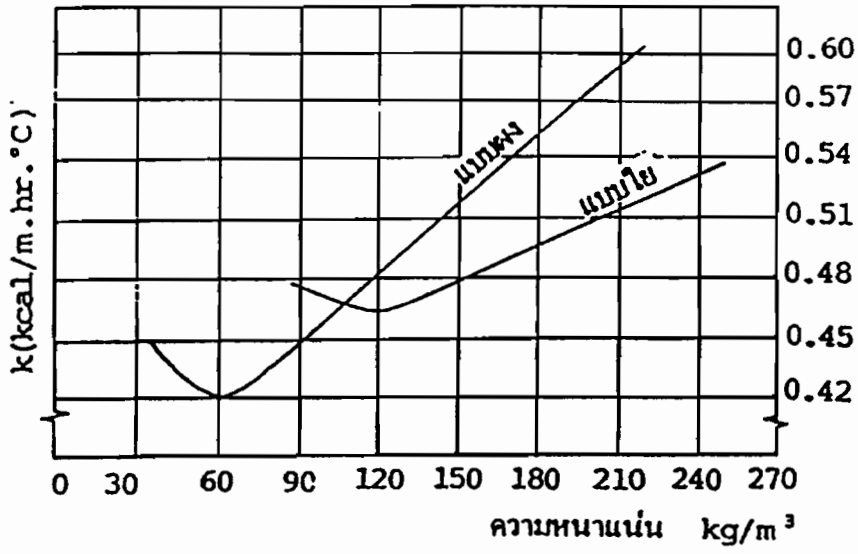
ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตร.องศาเคลวิน)
-มอก.1505-2541[5]	0.097-0.259
-แอลซีเอ็ม ระบบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่หน่วยน้ำหนัก 800-1000 กก./ลบ.ม.[7]	0.15-0.17
- นีโอโพร์ ระบบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่หน่วยน้ำหนัก 1200, 1400, 1600 กก./ลบ.ม.[6]	0.38, 0.45, 0.50
-ดีคอนบล็อก ระบบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ทดสอบตาม ASTM C796 ที่หน่วยน้ำหนัก 800-1000 กก./ลบ.ม.[24]	0.135
-ดิวคอน ระบบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง ที่หน่วยน้ำหนัก 800-1000 กก./ลบ.ม.[25]	0.09

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่เป็นฉนวน เป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนได้ดี โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนค่อนข้างต่ำ สามารถหน่วงการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ฉนวนไม่สามารถหน่วงการถ่ายเทความร้อนได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ผลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุโดยตรง มีรายละเอียดดังนี้

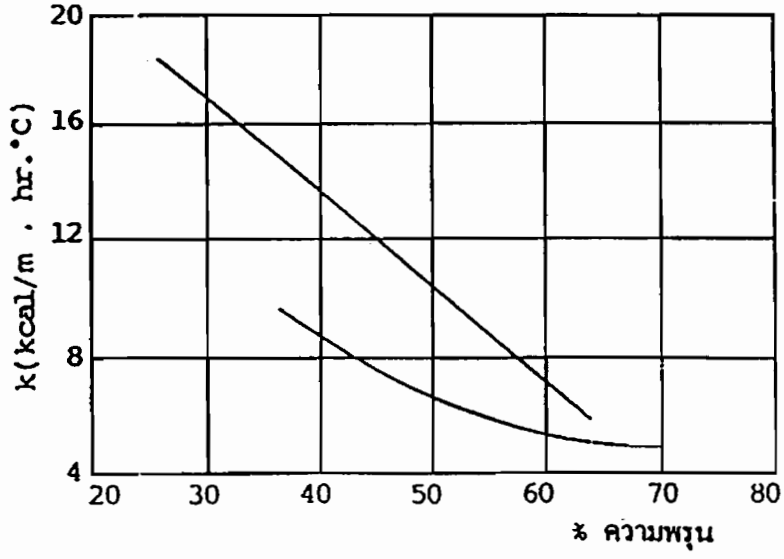
(1) อุณหภูมิของวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของวัสดุ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น

(2) หน่วยน้ำหนักของวัสดุโดยทั่วไป วัสดุใดที่มีหน่วยน้ำหนักสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงด้วย แต่ไม่เป็นจริงสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนประเภทใยและผงจะมีค่าต่ำสุดที่หน่วยน้ำหนักค่าหนึ่งๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนประเภทใยและผง [18]

ค่าหน่วยน้ำหนักของฉนวนเป็นสัดส่วนกลับกับความพรุน ดังแสดงในภาพ 2.27 วัสดุที่ใช้ทำฉนวนโดยเฉพาะฉนวนที่เป็นอิฐทนไฟ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะลดลงเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้น ถ้าใช้อิฐทนไฟที่มีความพรุนมากๆ จะมีการแผ่รังสีความร้อนผ่านรูพรุนนั้นได้ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม สำหรับอิฐทนไฟที่ใช้ในอุณหภูมิต่างๆ กันจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่างกันถึงแม่ว่าจะมีความพรุนเท่ากันก็ตาม



ภาพที่ 2.27 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับความพรุน [18]

(3) ทิศทางการถ่ายเทความร้อน วัสดุส่วนใหญ่ผลของทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะ ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ยกเว้นฉนวนที่เป็นไม้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไม้ในแนวขนานกับเสี้ยนของไม้ จะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไม้ในแนวตั้งฉากกับเกรนของไม้อยู่ประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์

(4) ความชื้นในวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อนของฉนวนประมาณ 10 เท่า ดังนั้นปัญหาความชื้นในตัวฉนวนจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น เนื่องจากการใช้ฉนวนต้องเผชิญกับความชื้นในบรรยากาศเสมอจึงจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิของฉนวนให้สูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างในอากาศ

สุเมธ สันทัดวัฒนา และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาถึงคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นระหว่าง 600-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 1 ต่อ 1 พบว่าค่านำความร้อนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีต เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามโดยมีค่าการนำความร้อนระหว่าง 0.23-0.61 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน

อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชญ์ และคณะ [21]ได้ทำการศึกษาถึงการหดตัวแห้งและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเปียกระหว่าง 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 และ 0.55 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 ทดสอบคอนกรีตที่อายุ 224 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.157-0.566 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน

2.5.2 กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์

การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนของวัสดุใดๆ นั้น ฟูเรียร์ (Fourier) แสดงความสัมพันธ์ไว้เป็นสูตร ดังนี้

$$Q = -KA\frac{\Delta T}{\Delta X} \tag{2.1}$$

สมการ 2.1 นี้เรียกว่า กฎการนำความร้อนฟูเรียร์ เครื่องหมายลบที่อยู่ขวามือเนื่องจาก กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิที่มี เครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้อุณหภูมิจะลดลง เมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหนในทิศทางที่มีค่าเป็นบวกแล้วก็จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการ 2.1

สมการของฟูเรียร์นี้สามารถนำไปใช้ในการหาอัตราการนำความร้อนผ่านวัตถุแข็งในมิติเดียวได้ดังสมการ (2.1) ซึ่งสามารถเขียนใหม่โดยให้ T_1 เป็นอุณหภูมิของผิววัสดุด้านร้อน (T_h) และให้ T_2 เป็นอุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น (T_c) ดังนี้

$$Q = KA\frac{(T_h - T_c)}{L} \tag{2.2}$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (วัตต์)

A = พื้นที่ผิววัสดุ (ตารางเมตร)

T_h = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านร้อน (องศาเคลวิน)

T_c = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น (องศาเคลวิน)

L = ความหนาวัสดุ (เมตร)

K = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง คือ ความดันที่วัสดุได้รับและอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุเมื่อความดันอยู่ในขั้นปานกลาง ผลของความดันต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีน้อยจนตัดทิ้งได้ แต่สำหรับอุณหภูมินั้นมีผลมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

กฎของฟูเรียร์นั้นใช้เมื่อการนำความร้อนดำเนินไปในทิศทางเดียว คือ ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของวัสดุ นั่นคือ มีสมมติฐานว่าพื้นที่ผิวของวัสดุนั้นใหญ่จนไม่มีผลจากสภาพด้านข้างของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อนำกฎของฟูเรียร์มาใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงมีความผิดลาดเล็กน้อย แต่เพื่อความสะดวกในการทดลอง จึงมักใช้กฎของฟูเรียร์จากสมการที่ (2.2) หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดย

$$K = \frac{QL}{A(T_h - T_c)} \tag{2.3}$$

ในการทดลองนั้นสามารถหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ทดลองได้เนื่องจากสภาพด้านข้างของวัสดุได้หลายวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ถูกต้องและเหมาะสมในการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง คือ วิธี Metal Surface Guarded Hot Plate

2.5.3 วิธีการทดสอบ Metal Surface Guarded Hot Plate

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถดำเนินการได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 177 [10] เรียกว่าวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate ลักษณะการทดลองแสดงในภาพที่ 2.28 หลักการชุดเครื่องมือ มีรายละเอียดดังนี้

2.5.3.1 ชุดอุปกรณ์ ประกอบด้วย แผ่นให้ความร้อนสองชุด ได้แก่ แผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง และ แผ่นให้ความร้อนด้านนอก แผ่นให้ความร้อนทำด้วยโลหะ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่น ทองแดงหรืออลูมิเนียม

2.5.3.2 ภายในแผ่นให้ความร้อนจะเป็นขดลวดความร้อน แต่ละแผ่นจะมีชุดขดลวดความร้อนแยกกัน ชุดขดลวดความร้อนนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด

2.5.3.3 วัสดุทดสอบสองชิ้นจะวางขนาบข้างแผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง วัสดุทดสอบทั้งสองชิ้นต้องมีลักษณะเหมือนกันมากที่สุด ทั้งความกว้าง ความยาวและความหนา

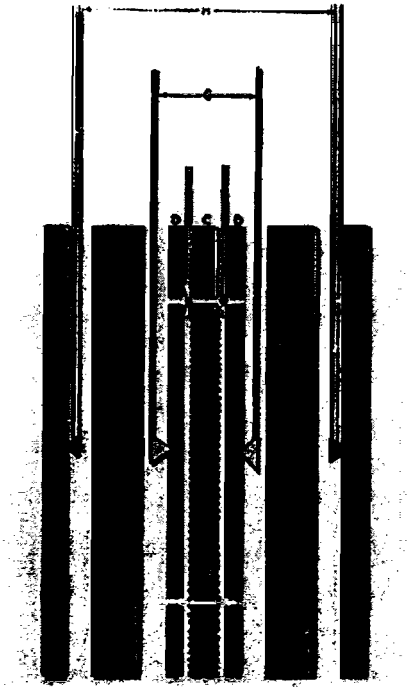
2.5.3.4 แผ่นให้ความร้อนด้านนอก จะล้อมรอบด้านข้างแผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง มีเพื่อป้องกันความร้อนบางส่วนถ่ายเทออกทางด้านข้างของแผ่นให้ความร้อนและด้านข้างของวัสดุทดสอบ

2.5.3.5 วัสดุทดสอบถูกประกบด้วยแผ่นระบายความร้อนทำด้วยโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่นเดียวกับแผ่นให้ความร้อน

2.5.3.6 วัสดุทดสอบถูกระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น ที่ไหลวนอยู่ภายในชุดระบายความร้อน

2.5.3.7 เมื่อควบคุมอุณหภูมิแผ่นให้ความร้อนด้านนอกเท่ากับส่วนกลาง นั่นคือแผ่นให้ความร้อนส่วนกลางจะไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกทางด้านข้าง

2.5.3.8 ความร้อนทั้งหมดของแผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง จึงถือว่าผ่านวัสดุทดสอบไปสู่แผ่นระบายความร้อน ดังนั้น เมื่อรอจนสภาวะคงตัวระยะหนึ่ง อุณหภูมิคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงสามารถหาได้จากการแทนค่าในสมการที่ 2.3



ภาพที่ 2.28 ภาพตัดด้านข้างชุดวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำการความร้อนด้วยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate [10]

ชุดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate เหมาะสมกับการทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200-400 เคลวิน กรณีที่ทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 300 เคลวิน หรือมากกว่าเล็กน้อย ความร้อนสูญเสียให้กับอากาศภายนอกจะน้อย เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยขณะทำการทดลองดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องติดฉนวนด้านข้าง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดลองมีค่าสูงกว่า 400 เคลวิน หรือน้อยกว่า 250 เคลวิน ควรทำการติดฉนวนเพิ่มเติมในบริเวณด้านข้างของอุปกรณ์ทำการทดสอบ เพื่อไม่ให้สูญเสียพลังงานไปนอกระบบ เป็นการรักษาสภาวะสมดุลของระบบให้คงที่ [10]

หลักการสำคัญของวิธีการ Metal Surface Guarded Hot Plate นี้ความร้อนจะต้องไหลในทิศทางเดียวหรือไหลในมิติเดียวเท่านั้น จะต้องไม่มีความร้อนที่สูญเสียไปในทิศทางด้านข้างหรือส่วนอื่น ๆ ของระบบ ขนาดความกว้างของแผ่นให้ความร้อนชุดนอกจะต้องกว้างพอที่จะทำให้วัสดุส่วนที่ติดกับแผ่นให้ความร้อนชุดนอกเท่านั้นที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบทางเดียวจึงจะไม่รบกวนระบบและแผ่นให้ความร้อนชุดในมาตรฐาน ASTM C177 [10] กำหนดขนาดของแผ่นให้ความร้อนชุดใน ชุดนอก และความหนาสูงสุดของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ดังในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานทดสอบและขนาดแผ่นให้ความร้อน [10]

ความหนาสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ (เซนติเมตร)	ความกว้างน้อยสุดของแผ่นให้ความร้อน (เซนติเมตร)	
	ส่วนกลาง	ส่วนนอก
3.3	10.2	5.1
5.1	15.7	7.6
6.4	30.5	7.6
10.2	30.5	15.7

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

3.1 บทนำ

รายละเอียดบทนี้ประกอบด้วยอัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างที่ทำการศึกษา เพื่อนำไปทดสอบหาการรับกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและปริมาณช่องว่างอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

3.2 ตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนักคอนกรีตออกแบบตั้งแต่ 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากหน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีปริมาณฟองโฟมผสมอยู่มากทำให้การยึดเกาะกันของส่วนผสมมีน้อย หากหน่วยน้ำหนักต่ำกว่านี้ก็สามารถผสมได้ แต่ต้องไม่มีส่วนผสมของทราย ซึ่งเป็นการไม่ประหยัด จึงเลือกหน่วยน้ำหนักต่ำสุดในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนหน่วยน้ำหนักสูงสุดเลือก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีหน่วยน้ำหนักสูงสุดประมาณไม่เกิน 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 โดยอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 เลือกตามความเหมาะสม โดยพิจารณาให้มีปริมาณทรายมากที่สุดเพื่อความประหยัด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

จำนวนตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ สำหรับหนึ่งสูตรส่วนผสม มีดังนี้

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง อ้างอิงตามมาตรฐาน BS 1881: PART 4 (Method of Testing Concrete for Strength) ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อช่วงอายุที่ทำการทดสอบและ ASTM 39 (Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด Ø15x30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อช่วงอายุที่ทำการทดสอบ ทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน

3.2.2 การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่าง อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 490–00 (Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened

Cement Paste, Mortar, and Concrete) ใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 3, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 112, 224 และ 448 วัน

3.2.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง อ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 177 (Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission by Mean of The Guarded Hot Plate) ใช้ตัวอย่างขนาด 300x300x25 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 วัน

3.2.4 การทดลองหาปริมาณช่องว่างอากาศ โดยใช้โปรแกรม Air Void Analyzer ใช้ตัวอย่างขนาด Ø15x5 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 28 วัน สูตรทั้งหมด 26 สูตร รวม 936 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

สูตรที่	หน่วยน้ำหนัก kg/m³	S/C	W/C
1	800	0.25	0.45
2	800	0.5	0.45
3	800	0.25	0.55
4	800	0.5	0.55
5	1,000	0.5	0.45
6	1,000	1	0.45
7	1,000	0.5	0.55
8	1,000	1	0.55
9	1,200	1	0.45
10	1,200	2	0.45
11	1,200	1	0.55
12	1,200	2	0.55
13	1,400	1	0.45
14	1,400	2	0.45

สูตรที่	หน่วยน้ำหนักออกแบบ	S/C	W/C
15	1,400	3	0.45
16	1,400	1	0.55
17	1,400	2	0.55
18	1,400	3	0.55
19	1,600	2	0.45
20	1,600	3	0.45
21	1,600	2	0.55
22	1,600	3	0.55
23	1,800	2	0.45
24	1,800	3	0.45
25	1,800	2	0.55
26	1,800	3	0.55

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบ	ขนาด (ซม.)	จำนวน (ก้อน)	อายุทดสอบ (วัน)	จำนวน (ก้อน)
กำลังรับแรงอัด	Ø15x30	3	7, 14, 28, 56	312
กำลังรับแรงอัด	15x15x15	3	7, 14, 28, 56	312
การหดตัวแบบแห้ง	2.5x2.5x28.5	6	3, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 112, 224, 448	156
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	30x30x2.5	2	28	52
ปริมาณช่องว่างอากาศ	Ø15x5	1	28	28

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

No Mix	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	ซีเมนต์ กก.	ทราย กก.	น้ำผสมมอร์ต้า ลิตร	น้ำยาโฟม ลิตร	น้ำผสมน้ำยาโฟม ลิตร
1	800	0.25	0.45	457.6	114.4	205.90	0.75	22.51
2			0.55	432.6	108.1	237.90	0.72	21.71
3		0.5	0.45	398.7	199.3	179.39	0.77	22.98
4			0.55	379.6	189.8	208.75	0.74	22.25
5	1,000	0.5	0.45	503.0	251.5	226.35	0.64	19.25
6			0.55	478.9	239.5	263.41	0.61	18.33
7		1	0.45	400.0	400.0	180.00	0.67	20.07
8			0.55	392.2	392.2	215.68	0.66	19.67
15	1,200	1	0.45	483.1	483.1	217.37	0.55	16.51
16			0.55	464.5	464.5	255.45	0.52	15.57
17		2	0.45	342.7	685.4	154.22	0.59	17.62
18			0.55	333.3	666.5	183.29	0.56	16.92
9	1,400	1	0.45	566.1	566.1	254.75	0.43	12.94
10			0.55	544.4	544.4	299.40	0.40	14.25
11		2	0.45	401.7	803.3	180.74	0.47	14.25
12			0.55	390.6	781.1	214.80	0.45	13.43
13		3	0.45	311.2	933.7	140.05	0.50	14.96
14			0.55	304.5	913.6	167.49	0.48	14.31

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (ต่อ)

No Mix	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	ซีเมนต์ กก.	ทราย กก.	น้ำผสมมอร์ต้า ลิตร	น้ำยาโฟม ลิตร	น้ำผสมน้ำยาโฟม ลิตร
19	1,600	2	0.45	460.6	921.1	207.26	0.36	10.88
20			0.55	447.9	895.8	246.35	0.33	9.94
21		3	0.45	356.9	1,070.7	160.61	0.39	11.70
22			0.55	349.2	1,047.7	192.07	0.36	10.95
23	1,800	2	0.45	519.6	1,039.1	233.80	0.25	7.51
24			0.55	505.2	1,010.4	277.86	0.21	6.44
25		3	0.45	402.6	1,207.7	181.16	0.28	8.43
26			0.55	393.9	1,181.7	216.65	0.25	7.58

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

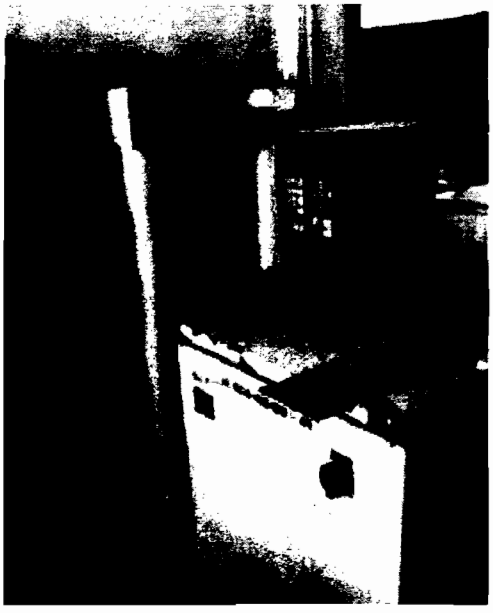
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง อ้างอิงตามมาตรฐาน BS 1881: PART 4 (Method of Testing Concrete for Strength) และ ASTM 39 (Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.3.1 เมื่อตัวอย่างทดสอบอายุครบตามกำหนดการทดสอบ ได้แก่ 7, 14, 28 และ 56 วัน ทำการวัดและบันทึกค่าความสูง ความกว้างและความยาวของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

3.3.2 วัดและบันทึกความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างทดสอบโดยวัด 2 แนวที่ตั้งฉากกัน ให้วัดให้ละเอียดถึงระดับมิลลิเมตร

3.3.3 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบและบันทึกค่า กรณีก้อนตัวอย่างทรงกระบอกให้ทำการหล่อหัวตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถันเพื่อให้มั่นใจว่า ผิวหน้าตัดตัวอย่างทดสอบตั้งฉากกับแกนของตัวอย่างทดสอบ

3.3.4 นำก้อนตัวอย่างวางบนกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกดตัวอย่างทดสอบ โดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ



ภาพที่ 3.1 เครื่องกดทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.3.5 กดก้อนตัวอย่างจนเกิดการเสียรูป บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดที่ได้ นำค่าน้ำหนักสูงสุด และพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างที่ทดสอบ ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4 คำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบตามสมการข้างล่าง

$$F = {}^{P}/_{A} \tag{3.1}$$

เมื่อ F = กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

P = น้ำหนักกดประลัย (กิโลกรัม)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลกำลังรับแรงอัด

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนักออกแบบ ($kg./m^3$)	S/C	W/C	หน่วยน้ำหนักเปียก ($kg./m^3$)	ตัวอย่างที่	อายุ 7 วัน					
						น้ำหนัก (kg.)	หน่วยน้ำหนัก ($kg./m^3$)	หน่วยน้ำหนักเฉลี่ย ($kg./m^3$)	แรงกดสูงสุด (kg.)	กำลังอัด (ksc.)	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc.)
1	1800	2	0.45	1840	1	6.08	1801	1767	27878	123.9	123.0
					2	5.99	1775		26872	119.4	
					3	5.82	1726		28260	125.6	
2		3		1850	1	6.15	1822	1816	31880	141.7	142.1
					2	6.05	1793		32637	145.1	
					3	6.19	1834		31414	139.6	
3		2	0.55	1800	1	5.93	1758	1750	27110	120.5	120.8
					2	5.91	1750		27096	120.4	
					3	5.88	1742		27304	121.4	
4		3		1810	1	5.87	1738	1735	23862	106.1	111.5
					2	5.77	1709		25812	114.7	
					3	5.94	1759		25557	113.6	

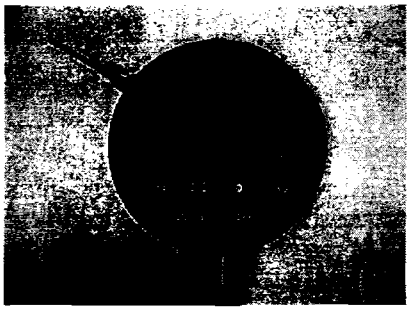
3.4 การทดลองหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การทดลองหาค่าการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่าง อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 490–00 (Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

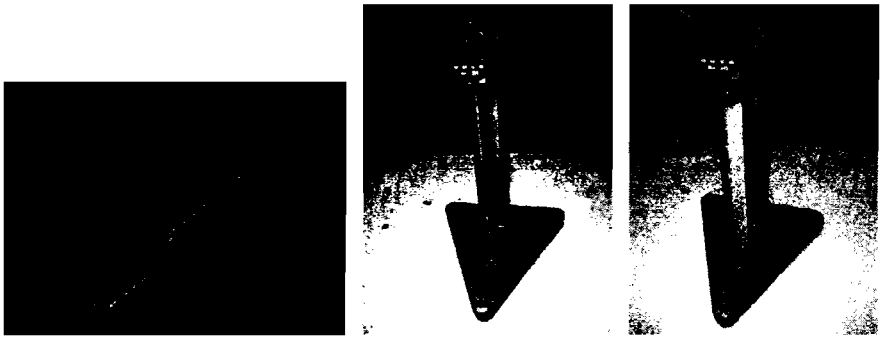
3.4.1 เมื่อตัวอย่างทดสอบอายุครบตามกำหนดการทดสอบ ได้แก่ 3, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 112, 224 และ 448 วัน ทำการชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต

3.4.2 ก่อนทำการวัดความยาวให้ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบเท่ากับ 23 องศาเซลเซียส คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50 คลาดเคลื่อนได้ไม่เกินร้อยละ 5

3.4.3 วัดความยาวของตัวอย่างทดสอบจนครบทั้ง 6 ตัวอย่างและตรวจสอบค่าความยาวที่ถูกต้องด้วยแท่งอ้างอิงเป็นระยะเมื่ออุณหภูมิไม่คงที่ ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5



ภาพที่ 3.2 หน้าปัดอ่านค่าของเครื่องวัดเปรียบเทียบความยาว



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.3 (ก) แท่งตัวอย่างทดสอบและแท่งอ้างอิง (ข) การตั้งค่าแท่งอ้างอิงเท่ากับศูนย์ และ (ค) การอ่านค่าแท่งตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

3.4.4 นำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณหาการหดตัวแบบแห้งที่ช่วงอายุต่างๆ ตามสมการข้างล่าง

$$L = \frac{(Lx - Li)}{Lo} \tag{3.1}$$

เมื่อ L = ร้อยละการหดตัวแบบแห้ง (เปอร์เซ็นต์)

Lx = ความยาวตัวอย่างที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตรหรือนิ้ว)

Li = ความยาวตัวอย่างทดสอบเริ่มต้น (มิลลิเมตรหรือนิ้ว)

Lo = ความยาวคงที่มีค่าเท่ากับ 250 มิลลิเมตรหรือ 10 นิ้ว

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลการหดตัวแบบแห้ง

ลำดับ	หน่วยน้ำหนักออกแบบ (กก./ม.^{3})	w/c	s/c	อายุ (วัน)	แท่งที่	น้ำหนัก (กรัม)	แท่งอ้างอิง		แท่งตัวอย่าง		Li		Lx		การหดตัวแบบแห้ง	การหดตัวแบบแห้งเฉลี่ย
							นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	%	%
1	1,800	0.5	2	1	1	331.19	0.032	0.800	0.0412	1.046	0.01	0.246				
					2	330.95	0.032	0.800	0.0189	0.480	-0.01	-0.320				
					3	337.34	0.032	0.800	0.1576	4.002	0.126	3.202				
					4	337.40	0.032	0.800	0.1441	3.660	0.113	2.860				
					5	338.67	0.032	0.800	0.1519	3.858	0.12	3.058				
					6	345.42	0.032	0.800	0.1525	3.872	0.121	3.072				
				3	1	326.12	0.032	0.800	0.0378	0.960			0.006	0.160	-0.034	-0.024
					2	325.91	0.032	0.800	0.0169	0.428			-0.01	-0.37	-0.020	
					3	332.21	0.032	0.800	0.1552	3.942			0.124	3.142	-0.024	
					4	332.21	0.032	0.800	0.1420	3.606			0.111	2.806	-0.021	
					5	333.65	0.032	0.800	0.1501	3.812			0.119	3.012	-0.018	
					6	340.31	0.032	0.800	0.1501	3.812			0.119	3.012	-0.024	
				7	1	326.40	0.178	4.510	0.1821	4.624			0.005	0.114	-0.052	-0.049
					2	326.10	0.178	4.510	0.1607	4.078			-0.02	-0.43	-0.043	
					3	332.50	0.178	4.510	0.2990	7.594			0.121	3.084	-0.047	
					4	332.70	0.178	4.510	0.2853	7.246			0.108	2.736	-0.049	
					5	333.70	0.178	4.510	0.2929	7.438			0.115	2.928	-0.051	
					6	340.50	0.178	4.510	0.2937	7.458			0.116	2.948	-0.049	

3.5 การทดสอบปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าทั้งหมด 26 สูตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟองอากาศอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยใช้โปรแกรม Air Void Analyzer เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักทั่วไปโดยตรง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีสแกนผิวหน้าคอนกรีต โปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นโดย Jeremy Carlson, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Tech University มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

(1) นำแท่งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มาตัดให้ได้ขนาด 5x5 เซนติเมตร หนา 1 นิ้ว โดยใช้เครื่องไฟเบอร์ ด้วยใบตัดขนาด 14 นิ้ว

(2) นำตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้แล้วไปเข้าเครื่องสแกน ในใช้เครื่องใช้เครื่องสแกน HP รุ่น Officejet 6500A โดยกำหนดความละเอียดที่ 2400 DPI

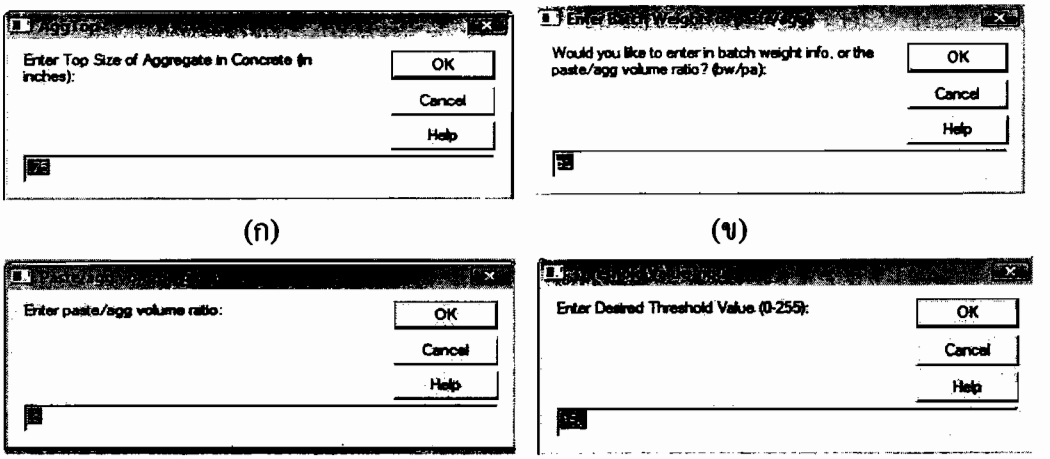
(3) นำภาพที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณฟองอากาศ โดยในขั้นตอนการใช้โปรแกรมต้องกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

(3.1) Size of Aggregate

(3.2) Batch Weights or paste/agg

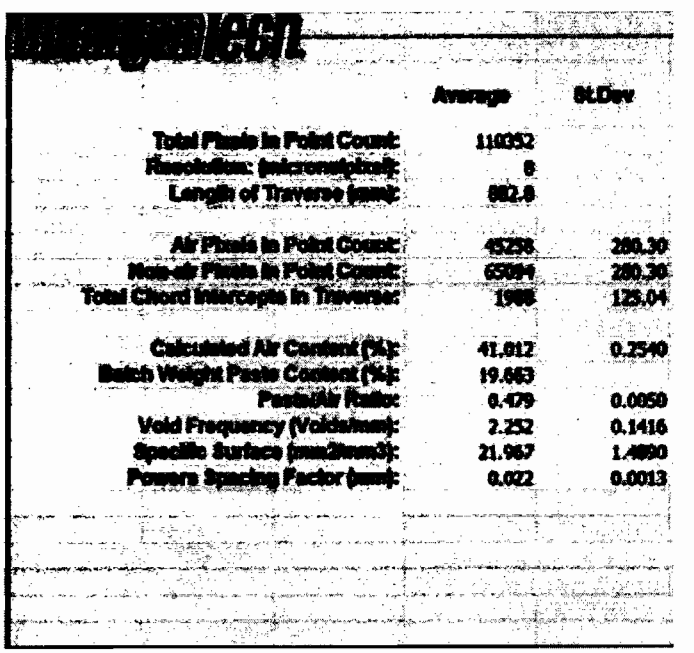
(3.3) Paste/agg volume ratio

(3.4) Threshold Value



ภาพที่ 3.4 หน้าจอกำหนดค่าต่างๆ ในโปรแกรม (ก) Size of Aggregate (ข) Batch Weights or paste/agg (ค) Paste/agg volume ratio (ง) Threshold Value

(4) เมื่อสิ้นสุดการทำงานจะมีผลการคำนวณจากโปรแกรมในรูปแบบไฟล์ Word แสดงในภาพที่ 3.5

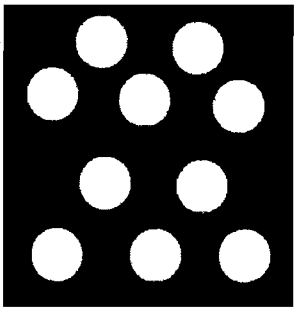


	Average	St.Dev
Total Pixels in Point Count:	110352	
Resolution: (micrometer/pixel):	6	
Length of Traverse (mm):	662.8	
Air Pixels in Point Count:	45258	280.30
Non-air Pixels in Point Count:	65094	280.30
Total Chord Intercepts in Traverse:	1988	125.04
Calculated Air Content (%):	41.012	0.2540
Batch Weight Paste Content (%):	19.663	
Paste/Air Ratio:	0.479	0.0059
Void Frequency (Voids/mm):	2.252	0.1416
Specific Surface (mm2/mm3):	21.967	1.4090
Powers Spacing Factor (mm):	0.022	0.0013

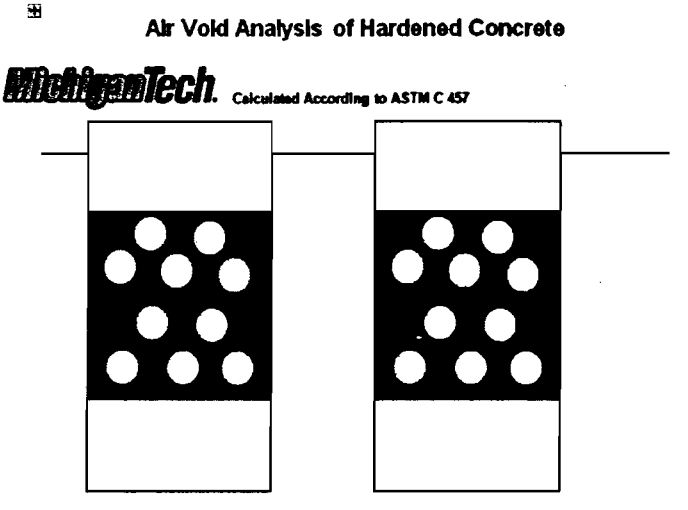
ภาพที่ 3.5 ผลการคำนวณจากโปรแกรมในรูปแบบไฟล์ Word

3.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศเป็นการพัฒนาโปรแกรมของ Jeremy Carlson, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Tech University โปรแกรมนี้ใช้ทดสอบคอนกรีตแบบปกติซึ่งมีปริมาณของมวลรวมหยาบ แต่เนื่องจากในการทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ไม่มีมวลรวมหยาบซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบเกิดความคลาดเคลื่อนจึงต้องมีการทดสอบความถูกต้องของตัวโปรแกรม



ภาพที่ 3.6 ภาพวงกลมที่ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop วาด



ภาพที่ 3.7 ภาพวงกลมเมื่อนำเข้าประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer

ภาพที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง คือ วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72 พิกเซล จำนวน 10 วง และพื้นที่กรอบงานเป็นสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 400 พิกเซล ยาว 400 พิกเซล

ภาพวงกลมคิดเป็น 40715 พิกเซล

พื้นที่กรอบงานคิดเป็น 160000 พิกเซล

ดังนั้น ภาพวงกลมคิดเป็น 25.45 เปอร์เซ็นต์ของกรอบงาน

ผลการทดสอบหาปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยใช้โปรแกรม Air Void Analyzer ให้ผลค่าปริมาณฟองอากาศ 24.93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากที่ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS3 ออกแบบไว้เพียงเล็กน้อย ผลการสอบเทียบภาพจำลองแสดงในภาพที่ 3.8

Air Void Analysis of Hardened Concrete

MichiganTech Calculated According to Procedure B

	Average	St.Dev
Total Pixels in Point Count:	7562	
Resolution: (microns/pixel):	8	
Length of Traverse (mm):	60.5	
Air Pixels in Point Count:	1885	19.75
Non-air Pixels in Point Count:	5677	19.75
Total Chord Intercepts in Traverse:	34	1.15
Calculated Air Content (%):	24.930	0.2611
Batch Weight Paste Content (%):	25.023	
Paste/Air Ratio:	1.004	0.0140
Void Frequency (Voids/mm):	0.562	0.0191
Specific Surface (mm2/mm3):	9.016	0.2437
Powers Spacing Factor (mm):	0.111	0.0042

ภาพที่ 3.8 ภาพผลการตรวจสอบเทียบความถูกต้องโดยใช้โปรแกรม Air void analyzer

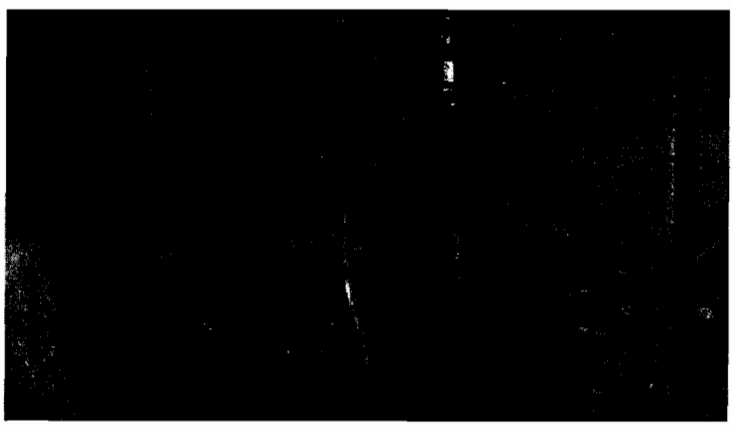
โปรแกรม Air Void Analyzer ให้ผลใกล้เคียงตามค่าที่ได้ทดลองสมมติออกแบบในโปรแกรม Adobe Photoshop CS3 ดังนั้น จึงถือว่าโปรแกรมดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือให้ผลถูกต้องสอดคล้องตามการทดสอบข้างต้นและสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้

3.6 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

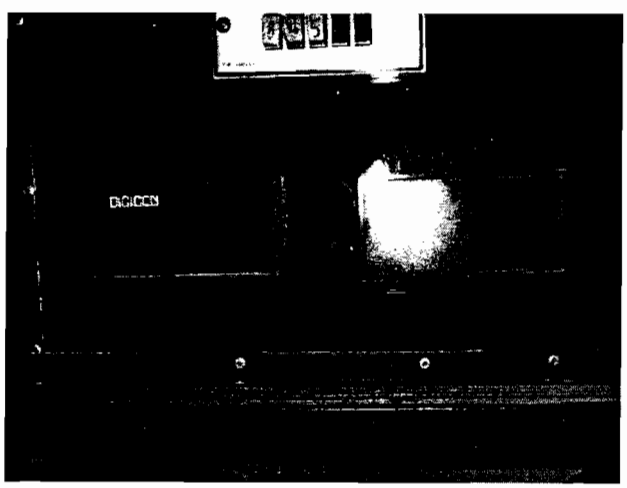
การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง อ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 177 (Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission by Mean of The Guarded Hot Plate) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 เมื่อตัวอย่างทดสอบอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบเข้าเตาอบ 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของคอนกรีตทั้งสองตัวอย่างที่จะทดสอบ

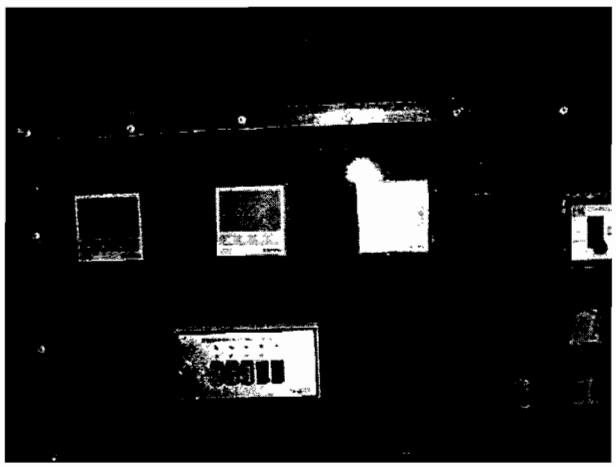
3.6.2 ติดตั้งตัวอย่างทดสอบกับเครื่องทดสอบ แล้วทำการทดสอบโดยกำหนดให้อุณหภูมิแผ่นทำความร้อนส่วนกลางและส่วนขอบแตกต่างไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส การวัดค่าอุณหภูมิประกอบด้วย 5 จุด ได้แก่ จุดกลางแผ่นทำความร้อนส่วนกลางด้านละ 1 จุด แผ่นทำความร้อนส่วนขอบ 1 จุด และจุดกลางแผ่นระบายความร้อนด้านละ 1 จุด



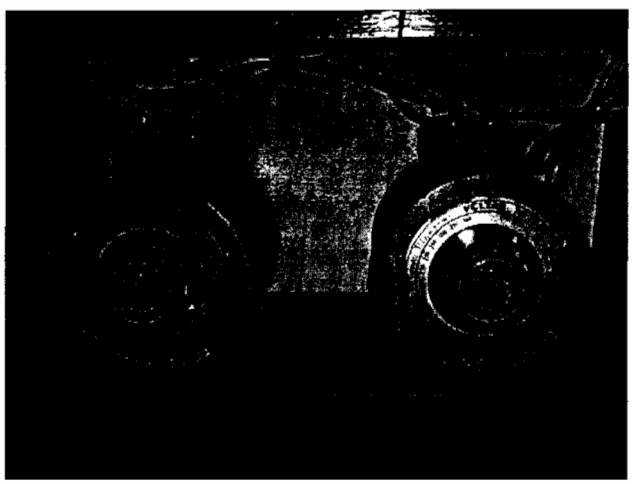
ภาพที่ 3.9 ชุดเครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



ภาพที่ 3.10 โวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์



ภาพที่ 3.11 เครื่องวัดอ่านค่าอุณหภูมิ และเครื่องสลับจุดวัดอ่านค่าอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.12 เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าแผ่นทำความร้อนส่วนกลาง

3.6.3 บันทึกค่าอุณหภูมิ ความต้านทานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทุก 30 นาที จนกระทั่งการถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาวะคงตัว โดยสังเกตจากอุณหภูมิทุกจุดจะคงที่เมื่ออุณหภูมิที่บันทึกค่าได้ 3 ครั้งสุดท้าย มีค่าคงที่ก็จะเสร็จสิ้นการทดลอง

3.6.4 นำผลการทดสอบที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามสมการข้างล่าง

$$K = \frac{QL}{2A(T_h - T_c)} \qquad (3.13)$$

เนื่องจากในการทดสอบจะมีตัวอย่าง 2 ข้าง จึงต้องหารสองในสมการฟูเรียร์

เมื่อ K = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน)

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (วัตต์)

A = พื้นที่ผิววัสดุ (ตารางเมตร)

T_h = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านร้อน (องศาเคลวิน)

T_c = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น (องศาเคลวิน)

L = ความหนาวัสดุ (เมตร)

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างตารางเก็บข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ลำดับ	สูตรออกแบบ	เวลา	ปริมาณความร้อน			แผ่นอำความร้อน (C°)			แผ่นระบายความร้อน (C°		ผลต่างอุณหภูมิ (K°)		K (W/m.K)		K เฉลี่ย
		นาที	ไวร์	แอมป์	วัตต์	กลางซ้าย	กลางขวา	ขอบซ้าย	กลางซ้าย	กลางขวา	กลางซ้าย	กลางขวา	แผ่นซ้าย	แผ่นขวา	W/m.K
1	1800 kg/m	0	19	1.47	27.93	61.2	61.6	61.7	34.3	37.6	26.9	24	0.282	0.316	0.299
	S/C 2	30	18	1.40	25.2	61.1	62.5	62.6	37.3	35.0	23.8	27.5	0.288	0.249	0.268
	W/C 0.45	60	18	1.42	25.56	68.0	70.0	69.5	38.8	34.4	29.2	35.6	0.238	0.195	0.216
		90	18	1.41	25.38	71.6	73.8	72.9	39.5	33.8	32.1	40	0.215	0.172	0.194
		120	18	1.42	25.56	73.3	75.1	74.5	39.6	33.9	33.7	41.2	0.206	0.169	0.187
		150	18	1.42	25.56	73.9	76.1	75.0	37.6	34.8	36.3	41.3	0.191	0.168	0.180
		180	18	1.42	25.56	73.5	75.7	74.6	39.7	34.4	33.8	41.3	0.205	0.168	0.187
		210	18	1.39	25.02	73.8	76.0	75.1	39.7	34.5	34.1	41.5	0.199	0.164	0.182
		240													
		270													
2	1800 kg/m	0	19	1.38	26.22	50.3	50.9	50.6	35.1	36.7	15.2	14.2	0.469	0.502	0.485
	S/C 2	30	19	1.38	26.22	67.9	66.7	69.3	38.4	33.7	29.5	33	0.242	0.216	0.229
	W/C 0.55	60	19	1.39	26.41	75.8	73.7	76.6	39.4	31.6	35.6	42.1	0.202	0.170	0.186
		90	19	1.38	26.22	77.6	75.3	79.3	38.9	29.7	38.7	45.6	0.184	0.156	0.170
		120	19	1.38	26.22	76.3	74.6	76.8	38.2	28.8	38.1	45.8	0.187	0.156	0.171
		150	19	1.38	26.22	74.2	72.4	74.6	37.4	28	36.8	44.4	0.194	0.160	0.177
		180	19	1.38	26.22	73.3	71.8	73.7	37.3	28.8	36	43	0.198	0.166	0.182
		210	19	1.38	26.22	75.4	73.4	75.9	37.4	28.8	38	44.6	0.188	0.160	0.174
		240													
		270													

บทที่ 4
ผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ผลการศึกษาประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้ (1) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (2) ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (3) ปริมาณฟองอากาศ และ (4) ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.2 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยการบ่มแห้งในอากาศ มีอายุครบตามกำหนดที่จะทำการทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน นำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงอัดในการศึกษาครั้งนี้ได้ผลิตคอนกรีตทั้งรูปทรงลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก คือ คอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 ต่อ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าเท่ากับ 210.8 และ 241.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่สูตรทดสอบเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 176.1 และ 185.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก คือ คอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ต่อ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าเท่ากับ 16.1 และ 17.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ที่สูตรทดสอบเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 12.2 และ 14.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2) อายุ (วัน)			
				7	14	28	56
1	800	0.25	0.45	20.5	21.6	23.4	27.0
2			0.55	21.8	22.1	24.6	30.8
3		0.5	0.45	10.4	14.7	16.1	17.9
4			0.55	20.2	21.2	22.6	24.6
5	1000	0.5	0.45	15.5	41.9	43.5	47.5
6			0.55	20.1	45.2	50.9	53.0
7		1	0.45	20.9	24.2	26.5	28.7
8			0.55	26.8	30.7	33.4	40.1
9	1200	1	0.45	30.8	50.3	55.4	60.8
10			0.55	44.2	51.7	55.7	61.8
11		2	0.45	21.9	27.7	28.1	32.0
12			0.55	29.3	35.1	39.1	41.1
13	1400	1	0.45	51.6	83.9	98.9	113.2
14			0.55	27.5	83.7	96.3	109.8
15		2	0.45	32.9	68.3	80.2	82.8
16			0.55	40.0	66.6	72.5	78.7
17		3	0.45	36.8	64.6	68.7	73.1
18			0.55	23.4	54.2	56.9	67.0
19	1600	2	0.45	111.8	125.7	138.5	149.3
20			0.55	105.3	110.7	125.0	132.1
21		3	0.45	97.8	106.0	114.1	121.3
22			0.55	96.2	109.1	113.4	119.1
23	1800	2	0.45	176.3	185.5	210.8	241.6
24			0.55	126.6	157.6	178.8	193.6
25		3	0.45	130.7	163.2	204.8	238.3
26			0.55	134	151.0	168.9	174.1

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)			
				อายุ (วัน)			
				7	14	28	56
1	800	0.25	0.45	21.1	22.6	22.8	23.4
2			0.55	22.6	22.8	24.8	27.8
3		0.5	0.45	10.7	11.7	12.2	14.1
4			0.55	16.1	16.3	16.6	19.9
5	1000	0.5	0.45	15.0	32.9	33.5	34.1
6			0.55	19.4	40.1	40.7	41.2
7		1	0.45	16.2	17.8	18.3	20.9
8			0.55	18.1	22.4	23.8	29.0
9	1200	1	0.45	34.9	36.2	45.2	49.0
10			0.55	34.4	44.4	45.3	55.6
11		2	0.45	19.9	21.9	23.8	28.0
12			0.55	23.3	25.8	26.1	28.4
13	1400	1	0.45	35.0	75.7	87.6	95.3
14			0.55	35.5	74.6	83.0	88.0
15		2	0.45	34.9	52.9	65.6	68.2
16			0.55	31.3	52.2	63.3	64.7
17		3	0.45	25.9	47.6	58.3	59.0
18			0.55	21.9	42.9	45.8	46.7
19	1600	2	0.45	88.4	93.7	113.4	117.1
20			0.55	77.7	91.1	102.9	106.4
21		3	0.45	69.9	89.6	99.4	101.4
22			0.55	69.7	88.0	97.8	100.1
23	1800	2	0.45	123.0	155.4	176.1	185.0
24			0.55	120.8	122.6	156.6	175.6
25		3	0.45	142.1	146.2	170.3	175.5
26			0.55	111.5	121.0	132.7	144.5

4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

4.2.2.1 หน่วยน้ำหนักคอนกรีต

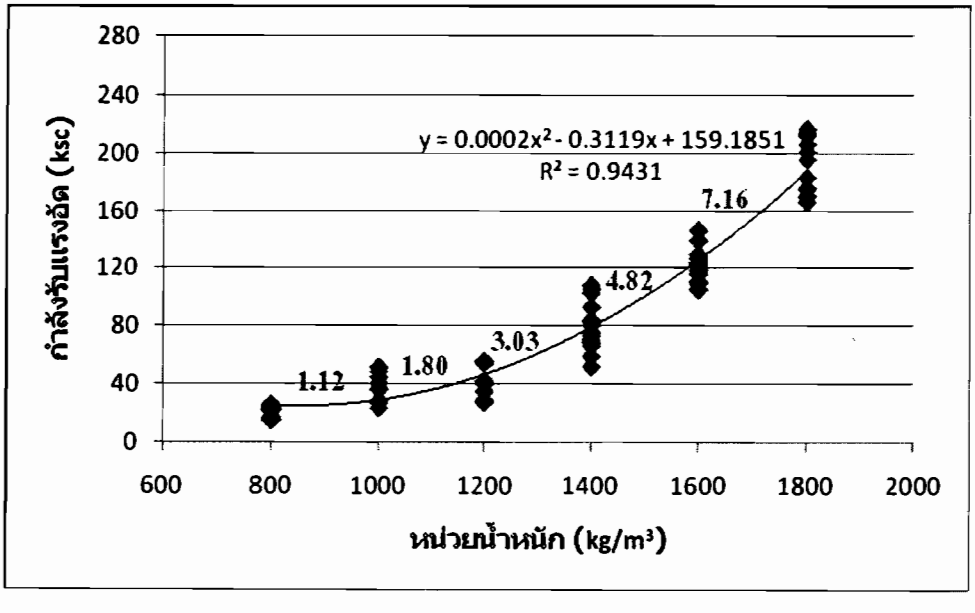
เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักคอนกรีต โดยภาพรวมกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทั้งทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ที่หน่วยน้ำหนักคอนกรีตออกแบบเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีกำลังรับแรงอัดทุกช่วงอายุทดสอบสูงกว่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตออกแบบเท่ากับ 1600, 1400 1200, 1000 และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 28 วัน พบว่า ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 7.16 เท่าของหน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่หน่วยน้ำหนัก 1600, 1400, 1200 และ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าประมาณ 4.82, 3.03, 1.80 และ 1.12 เท่าของคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการข้างล่าง

$$y = 0.00002x^2 - 0.3119x + 159.1851$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9431$



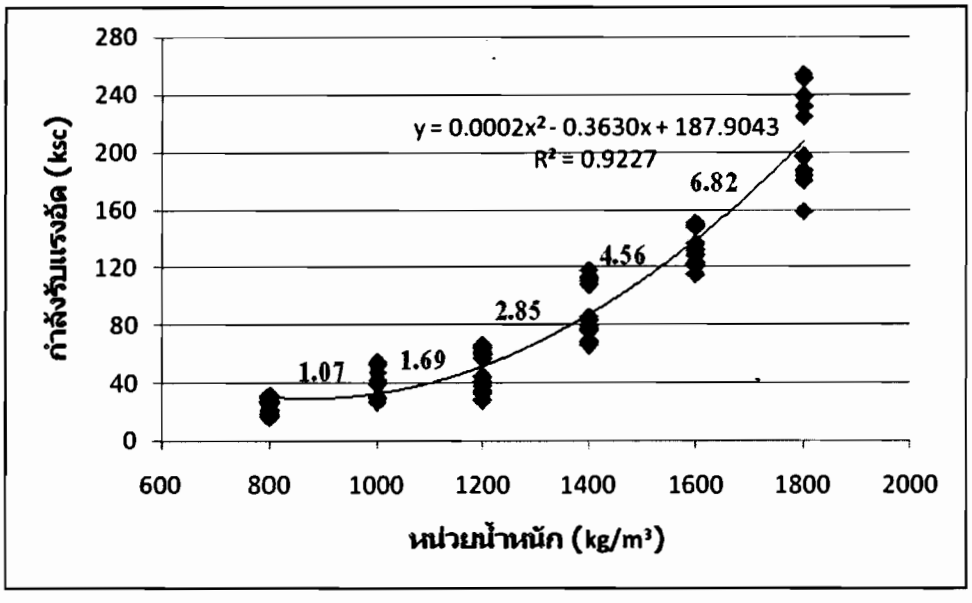
ภาพที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 28 วัน

ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 56 วัน พบว่า ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 6.82 เท่าของหน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่หน่วยน้ำหนัก 1600, 1400, 1200 และ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าประมาณ 4.56, 2.85, 1.69 และ 1.07 เท่าของคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการข้างล่าง

$$y = 0.00002x^2 - 0.3636x + 187.9043$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9227$



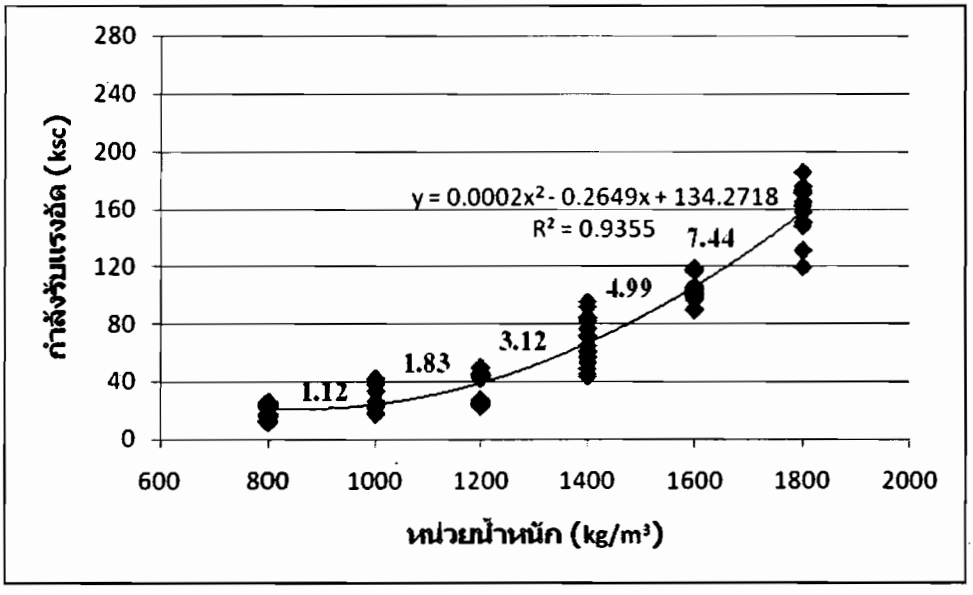
ภาพที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ที่อายุ 56 วัน

ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 28 วัน พบว่า ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 7.44 เท่าของหน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่หน่วยน้ำหนัก 1600, 1400, 1200 และ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าประมาณ 4.99, 3.12, 1.83 และ 1.12 เท่าของคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการข้างล่าง

$$y = 0.00002x^2 - 0.2649x + 134.2718$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9355$



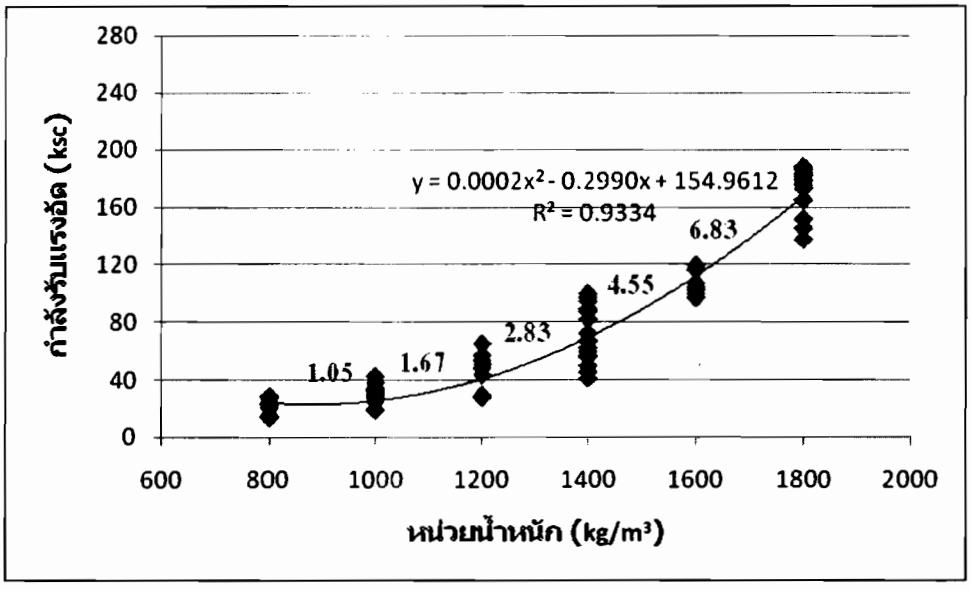
ภาพที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 28 วัน

ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 56 วัน พบว่า ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 6.83 เท่าของหน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่หน่วยน้ำหนัก 1600, 1400, 1200 และ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าประมาณ 4.55, 2.83, 1.67 และ 1.05 เท่าของคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ดังสมการข้างล่าง

$$y = 0.00002x^2 - 0.2990x + 154.9612$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9334$



ภาพที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 56 วัน

4.2.2.2 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยภาพรวมแปรผกผันกับปริมาณทราย คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 28 วัน พบว่า ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 1.55 เท่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 และที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนเท่ากับ 2 มีค่าเป็น 1.22 เท่าของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 28 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 คือ

$$y = 0.00002x^2 - 0.3244x + 148.7$$

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 28 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 คือ

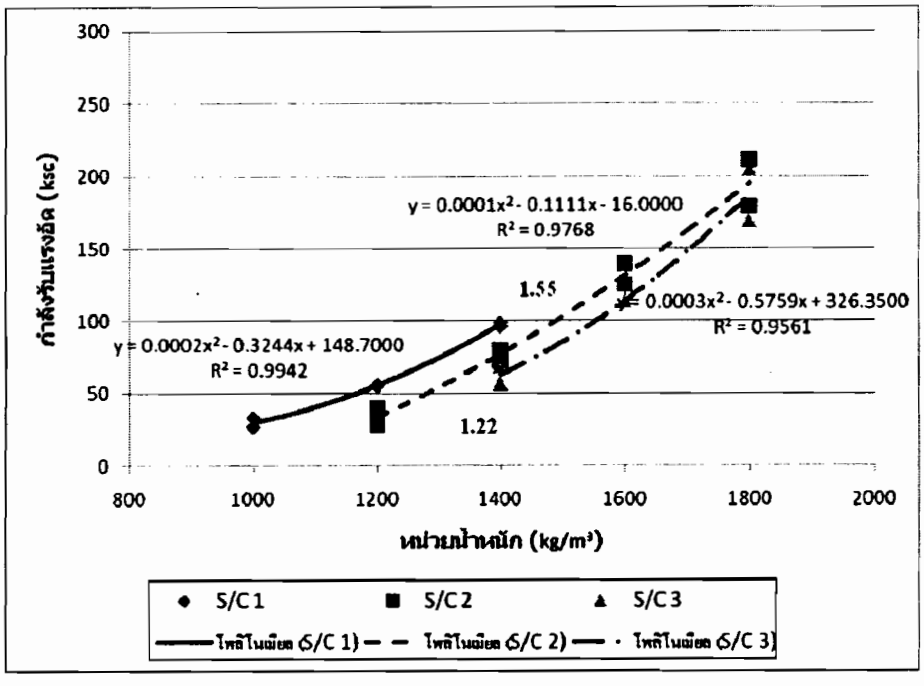
$$y = 0.00001x^2 - 0.1111x - 16.0$$

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 28 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 คือ

$$y = 0.00003x^2 - 0.5759x + 326.35$$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9942, 0.9768$ และ 0.9561 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 28 วัน

ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 28 วัน พบว่า ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 1.59 เท่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3 และที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนเท่ากับ 2 มีค่าเป็น 1.15 เท่าของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 56 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 คือ

$y = 0.00003x^2 - 0.5062x + 249.4$

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 28 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 คือ

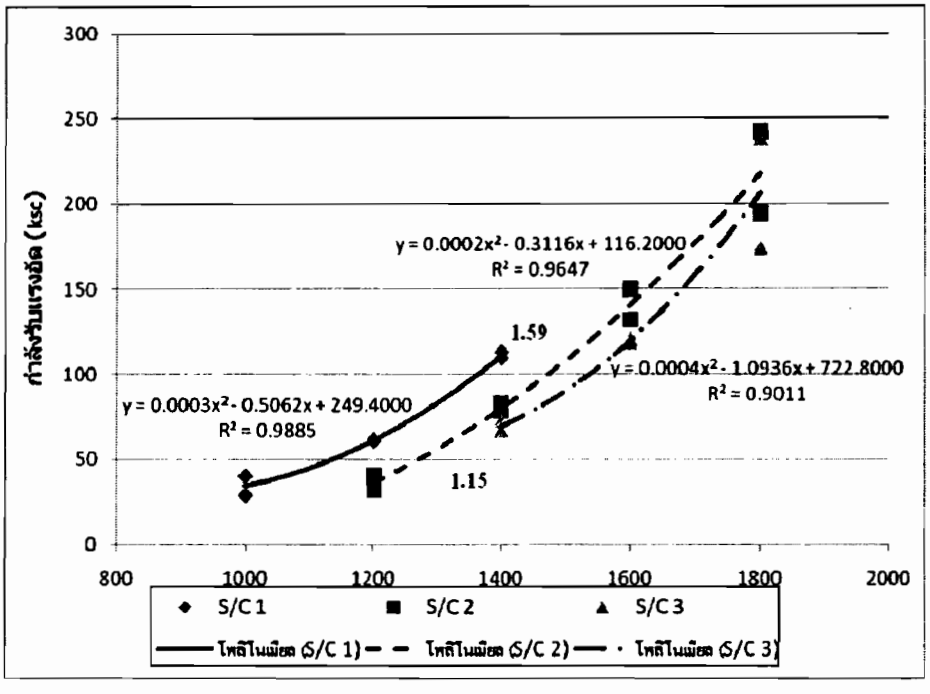
$y = 0.00002x^2 - 0.3116x + 116.2$

โดยสมการแนวโน้มของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบอายุ 28 วัน โดยใช้ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 คือ

$y = 0.00004x^2 - 1.0936 + 722.8$

เมื่อ y คือ กำลังรับแรงอัด (ksc) และ x คือ หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)

โดยมีค่า $R^2 = 0.9885, 0.9647$ และ 0.9011 ตามลำดับ

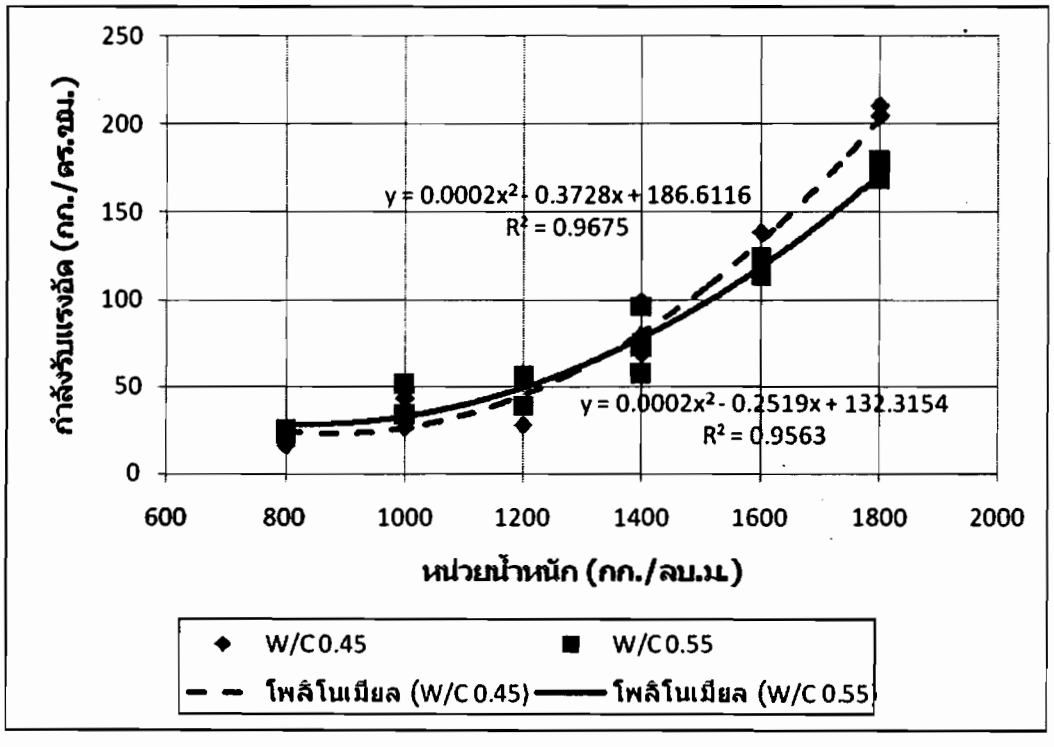


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 1, 2 และ 3 ที่อายุ 56 วัน

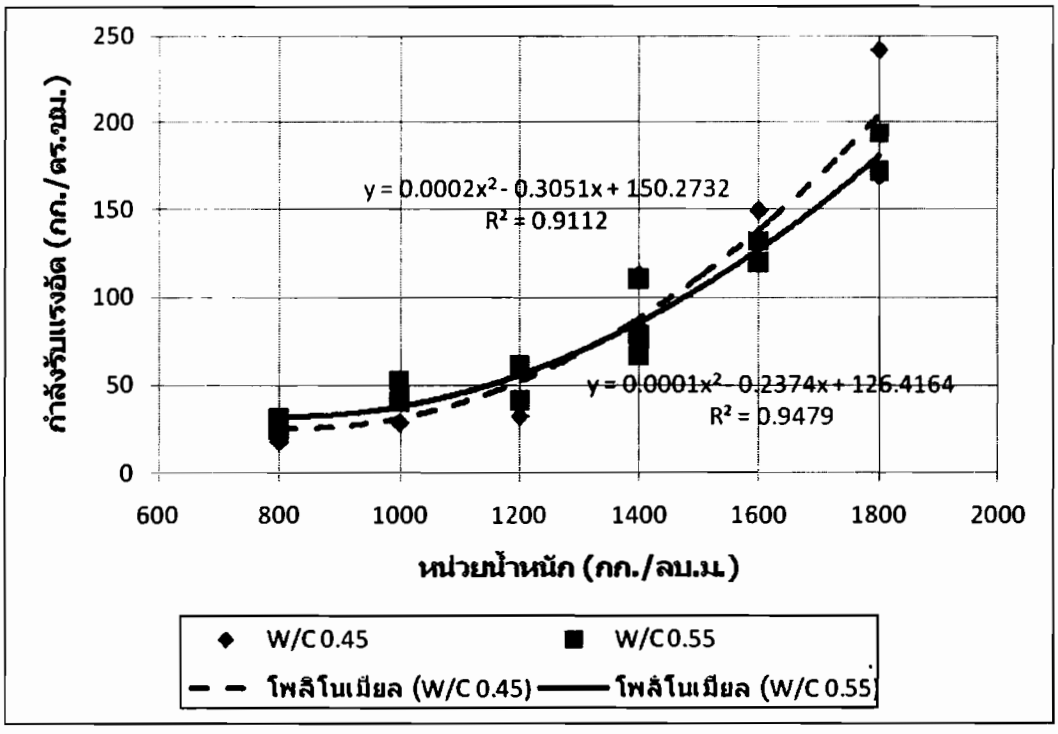
4.2.2.3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

จากผลการทดสอบเมื่อนำมาแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยพิจารณาตามอัตราการใช้น้ำต่อปูนซีเมนต์พบว่าแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งที่อายุ 28 วันและ 56 วัน มีลักษณะคล้ายกัน คือ

ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 อย่างไรก็ตาม ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1400-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน และภาพที่ 4.8 เป็นของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างทรงกระบอก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน

4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

4.2.3.1 อายุตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่องตามอายุ จากผลการทดสอบ พบว่า ที่อายุ 14 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน และยังมีแนวโน้มพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น การที่คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังช่วงต้นได้เร็วนั้น เนื่องจากอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีเพียงส่วนผสมเป็นปูนซีเมนต์และทราย ไม่มีหินเป็นส่วนผสม ทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีมาก ทำให้สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดช่วงอายุต้นได้เร็ว

ตารางที่ 4.3 อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2) อายุ (วัน)			
				7	14	28	56
1	800	0.25	0.45	0.88	0.92	1.00	1.15
2			0.55	0.89	0.90	1.00	1.25
3		0.5	0.45	0.65	0.91	1.00	1.11
4			0.55	0.89	0.94	1.00	1.09
5	1000	0.5	0.45	0.36	0.96	1.00	1.09
6			0.55	0.39	0.89	1.00	1.04
7		1	0.45	0.79	0.91	1.00	1.08
8			0.55	0.80	0.92	1.00	1.20
9	1200	1	0.45	0.56	0.91	1.00	1.10
10			0.55	0.79	0.93	1.00	1.11
11		2	0.45	0.78	0.99	1.00	1.14
12			0.55	0.75	0.90	1.00	1.05
13	1400	1	0.45	0.52	0.85	1.00	1.14
14			0.55	0.29	0.87	1.00	1.14
15		2	0.45	0.41	0.85	1.00	1.03
16			0.55	0.55	0.92	1.00	1.09
17		3	0.45	0.54	0.94	1.00	1.06
18			0.55	0.41	0.95	1.00	1.18
19	1600	2	0.45	0.81	0.91	1.00	1.08
20			0.55	0.84	0.89	1.00	1.06
21		3	0.45	0.86	0.93	1.00	1.06
22			0.55	0.85	0.96	1.00	1.05
23	1800	2	0.45	0.84	0.88	1.00	1.15
24			0.55	0.71	0.88	1.00	1.08
25		3	0.45	0.64	0.80	1.00	1.16
26			0.55	0.79	0.89	1.00	1.03

ตารางที่ 4.4 อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก kg/m^3	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)			
				อายุ (วัน)			
				7	14	28	56
1	800	0.25	0.45	0.93	0.99	1.00	1.03
2			0.55	0.91	0.92	1.00	1.12
3		0.5	0.45	0.88	0.96	1.00	1.16
4			0.55	0.97	0.98	1.00	1.20
5	1000	0.5	0.45	0.45	0.98	1.00	1.02
6			0.55	0.48	0.99	1.00	1.01
7		1	0.45	0.89	0.97	1.00	1.14
8			0.55	0.76	0.94	1.00	1.22
9	1200	1	0.45	0.77	0.80	1.00	1.08
10			0.55	0.76	0.98	1.00	1.23
11		2	0.45	0.84	0.92	1.00	1.18
12			0.55	0.89	0.99	1.00	1.09
13	1400	1	0.45	0.40	0.86	1.00	1.09
14			0.55	0.43	0.90	1.00	1.06
15		2	0.45	0.53	0.81	1.00	1.04
16			0.55	0.49	0.82	1.00	1.02
17		3	0.45	0.44	0.82	1.00	1.01
18			0.55	0.48	0.94	1.00	1.02
19	1600	2	0.45	0.78	0.83	1.00	1.03
20			0.55	0.76	0.89	1.00	1.03
21		3	0.45	0.70	0.90	1.00	1.02
22			0.55	0.71	0.90	1.00	1.02
23	1800	2	0.45	0.70	0.88	1.00	1.05
24			0.55	0.77	0.78	1.00	1.12
25		3	0.45	0.83	0.86	1.00	1.03
26			0.55	0.84	0.91	1.00	1.09

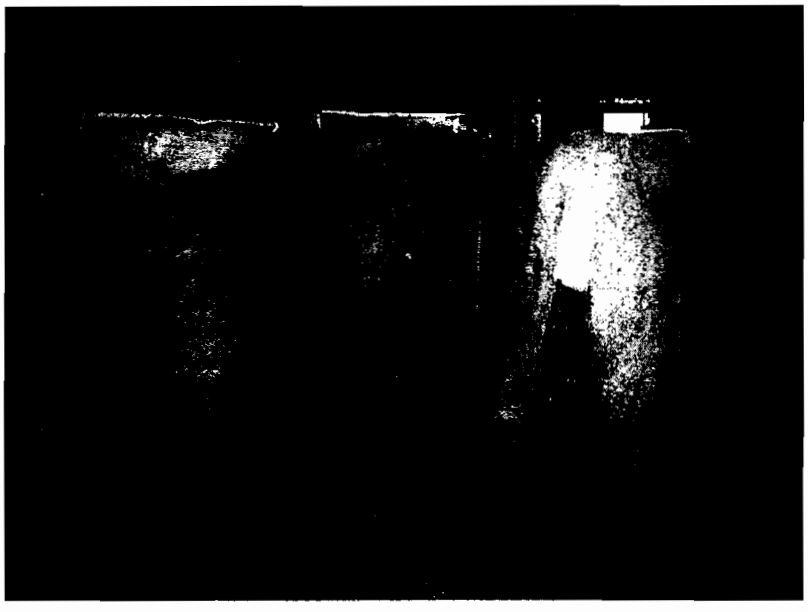
4.2.3.2 รูปทรงตัวอย่างทดสอบ

ในคอนกรีตปกติ กำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 2 รูปทรงนี้ จะให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าจะใช้ส่วนผสมเดียวกัน ทำการบ่มภายใต้สภาวะเดียวกันและทดสอบที่อายุเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจาก องค์ประกอบเรื่องความชะลูด กล่าวคือ รูปทรงกระบอกมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้าง (Slenderness Ratio) มากกว่ารูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลูดมาก ส่งผลให้กำลังอัดของรูปทรงกระบอกจะให้แรงอัดต่ำกว่ารูปทรงลูกบาศก์ และขณะที่กดก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าว จะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า Confining Stress โดยค่านี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ จึงมีค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก

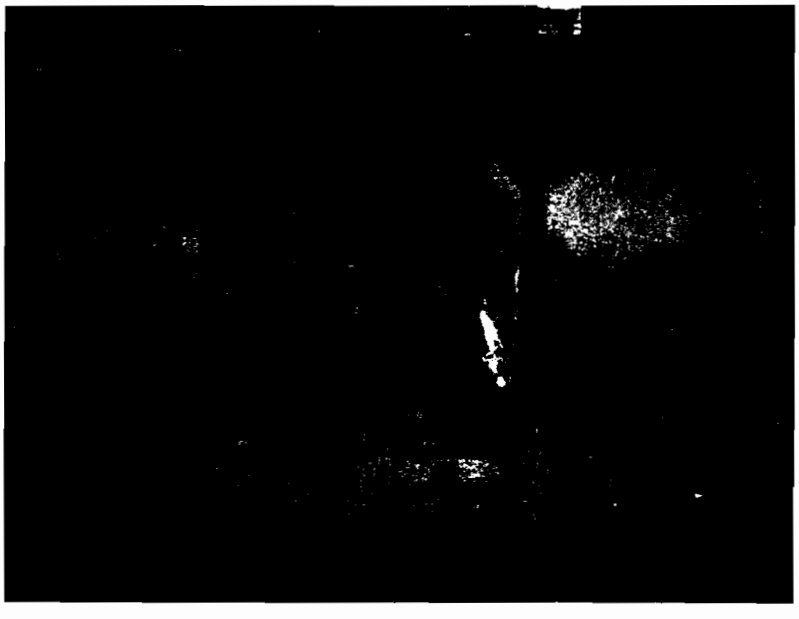
แต่จากการทดลองพบว่าโดยรวมแล้วตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก

1) ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกจะมีการหล่อหัวตัวอย่างทดสอบด้วยกำมะถัน ซึ่งกำมะถันมีความหนาแน่นใกล้เคียงคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ทำให้บริเวณผิวหน้ามีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นและตัวอย่างมีผิวหน้าเรียบสามารถรับแรงเสียดทานด้านข้างเพิ่มขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกสามารถรับแรงกดได้เพิ่มขึ้น

2) ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์รับแรงกดได้น้อย เพราะ เวลาทำการทดสอบกดตัวอย่าง จะกดทดสอบด้านข้างของตัวอย่างทดสอบทำให้รับแรงกดได้น้อย เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยเกิดจากขั้นตอนการผลิตคอนกรีต เมื่อเทคอนกรีตฟองอากาศจะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ ทำให้บริเวณผิวหน้าตัวอย่างทดสอบจะมีความพรุนด้วยฟองอากาศมากกว่าบริเวณด้านล่างตัวอย่างทดสอบ เมื่อกดตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ด้านข้าง ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติด้านข้างที่อ่อนแอก่อน ด้านผิวหน้าตัวอย่าง



ภาพที่ 4.9 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอก



ภาพที่ 4.10 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์

4.2.3.3 การเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

โดยภาพรวมพบว่า ที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างรูปทรงกระบอกหายไปมากกว่าตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักคอนกรีต ที่อายุ 56 วัน

ลำดับ	หน่วยน้ำหนักออกแบบ (kg/m^3)	S/C	W/C	หน่วยน้ำหนักเปียก (kg/m^3)	หน่วยน้ำหนักทรงกระบอก (kg/m^3)	หน่วยน้ำหนักทรงลูกบาศก์ (kg/m^3)	หน่วยน้ำหนักที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	
							กระบอก	ลูกบาศก์
1	800	0.25	0.45	830	750	794	9.64	4.36
2			0.55	820	754	765	8.06	6.76
3		0.5	0.45	820	765	792	6.67	3.45
4			0.55	820	748	767	8.78	6.50
5	1000	0.5	0.45	1020	956	970	6.30	4.88
6			0.55	1000	939	966	6.09	3.38
7		1	0.45	1000	971	952	2.87	4.79
8			0.55	1000	970	963	3.01	3.69
9	1200	1	0.45	1220	1181	1185	3.19	2.89
10			0.55	1180	1110	1140	5.89	3.42
11		2	0.45	1190	1152	1171	3.23	1.64
12			0.55	1230	1141	1182	7.27	3.94
13	1400	1	0.45	1440	1398	1409	2.89	2.13
14			0.55	1430	1356	1397	5.17	2.29
15		2	0.45	1420	1363	1390	4.05	2.10
16			0.55	1440	1329	1398	7.69	2.91
17		3	0.45	1430	1365	1408	4.54	1.51
18			0.55	1390	1352	1342	2.74	3.47
19	1600	2	0.45	1600	1566	1571	2.13	1.84
20			0.55	1590	1554	1562	2.23	1.73
21		3	0.45	1610	1573	1576	2.30	2.14
22			0.55	1640	1600	1616	2.41	1.48
23	1800	2	0.45	1840	1788	1803	2.84	2.00
24			0.55	1800	1728	1724	3.99	4.24
25		3	0.45	1850	1809	1791	2.20	3.18
26			0.55	1810	1753	1730	3.13	4.41

4.3 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.3.1 ผลทดลองการหดตัวแบบแห้ง

การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าทำได้โดยวัดความยาวของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้เครื่องวัดการหดตัวแห้งของคอนกรีตกับแท่งความยาวอ้างอิง เมื่อตัวอย่างมีอายุตามที่กำหนด คือ 3, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 112, 224 และ 448 วัน แล้วนำค่าความยาวที่ได้ไปคำนวณค่าการหดตัวแบบแห้ง สำหรับผลการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.6

ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด คือ คอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีค่าเท่ากับ -0.218 และ -0.366 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 28 และ 448 วัน ตามลำดับ

สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด คือ สูตรทดสอบที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าประมาณ -0.055 และ -0.093 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 28 และ 448 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

สูตร	หน่วยน้ำหนัก kg/m³	S/C	W/C	เปอร์เซ็นต์การหดตัวแบบแห้ง										
				อายุ (วัน)										
				1	3	7	14	21	28	35	56	112	224	448
1	800	0.25	0.45	0	-0.055	-0.130	-0.172	-0.199	-0.209	-0.214	-0.250	-0.285	-0.310	-0.329
2			0.55	0	-0.061	-0.135	-0.187	-0.201	-0.218	-0.221	-0.252	-0.290	-0.320	-0.366
3		0.5	0.45	0	-0.048	-0.085	-0.126	-0.153	-0.167	-0.184	-0.197	-0.217	-0.233	-0.244
4			0.55	0	-0.056	-0.118	-0.150	-0.175	-0.189	-0.194	-0.224	-0.252	-0.274	-0.289
5	1000	0.5	0.45	0	-0.048	-0.117	-0.148	-0.163	-0.179	-0.190	-0.202	-0.236	-0.259	-0.274
6			0.55	0	-0.063	-0.116	-0.149	-0.176	-0.182	-0.193	-0.205	-0.243	-0.272	-0.307
7		1	0.45	0	-0.058	-0.099	-0.127	-0.155	-0.167	-0.172	-0.175	-0.196	-0.212	-0.224
8			0.55	0	-0.061	-0.096	-0.131	-0.15	-0.166	-0.172	-0.181	-0.211	-0.235	-0.254
9	1200	1	0.45	0	-0.056	-0.086	-0.106	-0.122	-0.133	-0.143	-0.152	-0.180	-0.200	-0.210
10			0.55	0	-0.049	-0.095	-0.107	-0.132	-0.135	-0.143	-0.153	-0.180	-0.204	-0.222
11		2	0.45	0	-0.044	-0.069	-0.080	-0.096	-0.107	-0.110	-0.113	-0.132	-0.142	-0.145
12			0.55	0	-0.031	-0.081	-0.095	-0.106	-0.117	-0.123	-0.128	-0.147	-0.159	-0.163

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ต่อ)

สูตร	หน่วยน้ำหนัก kg/m³	S/C	W/C	เปอร์เซ็นต์การหดตัวแบบแห้ง										
				อายุ (วัน)										
				1	3	7	14	21	28	35	56	112	224	448
13	1400	1	0.45	0	-0.036	-0.064	-0.090	-0.106	-0.115	-0.116	-0.118	-0.144	-0.176	-0.185
14			0.55	0	-0.031	-0.080	-0.106	-0.116	-0.120	-0.129	-0.131	-0.160	-0.202	-0.215
15		2	0.45	0	-0.035	-0.062	-0.075	-0.079	-0.088	-0.089	-0.091	-0.109	-0.122	-0.125
16			0.55	0	-0.033	-0.062	-0.081	-0.084	-0.094	-0.098	-0.101	-0.121	-0.139	-0.142
17		3	0.45	0	-0.043	-0.057	-0.068	-0.071	-0.078	-0.081	-0.082	-0.095	-0.104	-0.102
18			0.55	0	-0.031	-0.058	-0.075	-0.082	-0.092	-0.093	-0.095	-0.112	-0.125	-0.125
19	1600	2	0.45	0	-0.040	-0.054	-0.065	-0.073	-0.076	-0.079	-0.083	-0.101	-0.120	-0.121
20			0.55	0	-0.032	-0.065	-0.076	-0.081	-0.086	-0.091	-0.092	-0.112	-0.135	-0.136
21		3	0.45	0	-0.024	-0.042	-0.059	-0.061	-0.067	-0.068	-0.074	-0.091	-0.103	-0.109
22			0.55	0	-0.047	-0.053	-0.065	-0.071	-0.080	-0.082	-0.084	-0.101	-0.117	-0.114
23	1800	2	0.45	0	-0.024	-0.049	-0.054	-0.057	-0.060	-0.065	-0.069	-0.084	-0.101	-0.103
24			0.55	0	-0.019	-0.059	-0.069	-0.073	-0.075	-0.082	-0.085	-0.102	-0.124	-0.134
25		3	0.45	0	-0.028	-0.043	-0.047	-0.053	-0.055	-0.062	-0.067	-0.079	-0.093	-0.093
26			0.55	0	-0.028	-0.053	-0.062	-0.064	-0.065	-0.070	-0.073	-0.087	-0.103	-0.100

4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

จากผลการทดลองสามารถนำเสนอผลในรูปแบบกราฟของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าของแต่ละหน่วยน้ำหนักได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.11-4.16

เมื่อพิจารณาปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถนำเสนอแนวโน้มความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

4.3.2.1 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยภาพรวมมีค่าแปรผกผันกับหน่วยน้ำหนักคอนกรีต หมายความว่า หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยรวมแล้วมีการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1600, 1400 และ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ อาจเป็นผลเนื่องมาจากคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักสูงปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมน้อยกว่าในคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำ การขยายและหดตัวของ

ฟองอากาศเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือปริมาณน้ำในฟองอากาศ ซึ่งมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

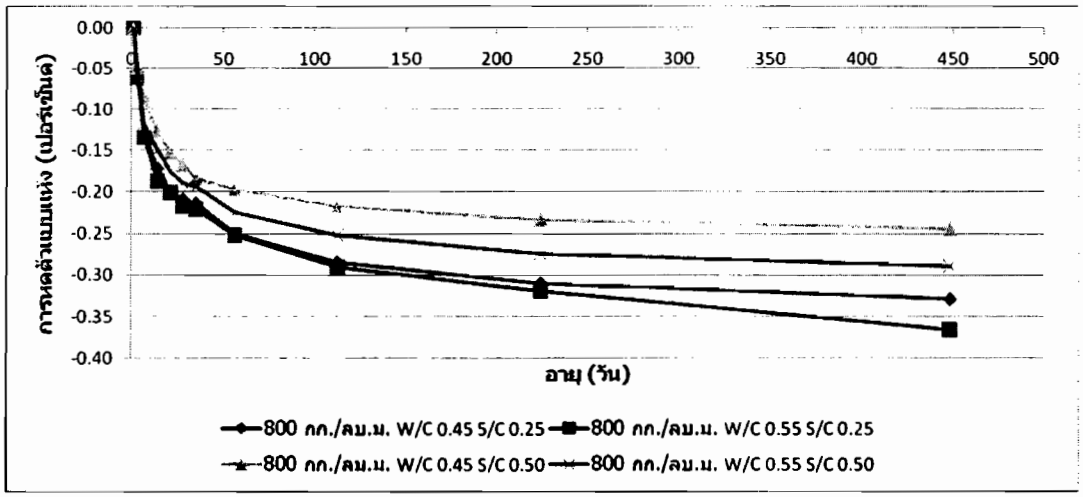
4.3.2.2 คอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยจะมีการหดตัวแบบแห้งมากโดยเฉพาะในช่วง 1-2 สัปดาห์แรก เมื่อตัวอย่างทดลองมีอายุเพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งจะลดลง เนื่องจากเมื่ออายุเพิ่มขึ้นกำลังก็สูงขึ้นไปด้วย การหดตัวแบบแห้งจึงลดลง ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้วัดค่าการหดตัวแบบแห้งถึงอายุ 448 วัน ตัวอย่างทดสอบยังมีแนวโน้มการหดตัวแบบแห้งอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่มากเหมือนในช่วงแรก

4.3.2.3 หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันทุกช่วงอายุทดสอบ และหน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ให้ค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุดซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันทุกช่วงอายุทดสอบเช่นกัน

4.3.2.4 เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักเท่ากันและที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เดียวกัน พบว่า คอนกรีตที่มีทรายผสมมากจะมีอัตราการหดตัวแห้งต่ำ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.11-4.16

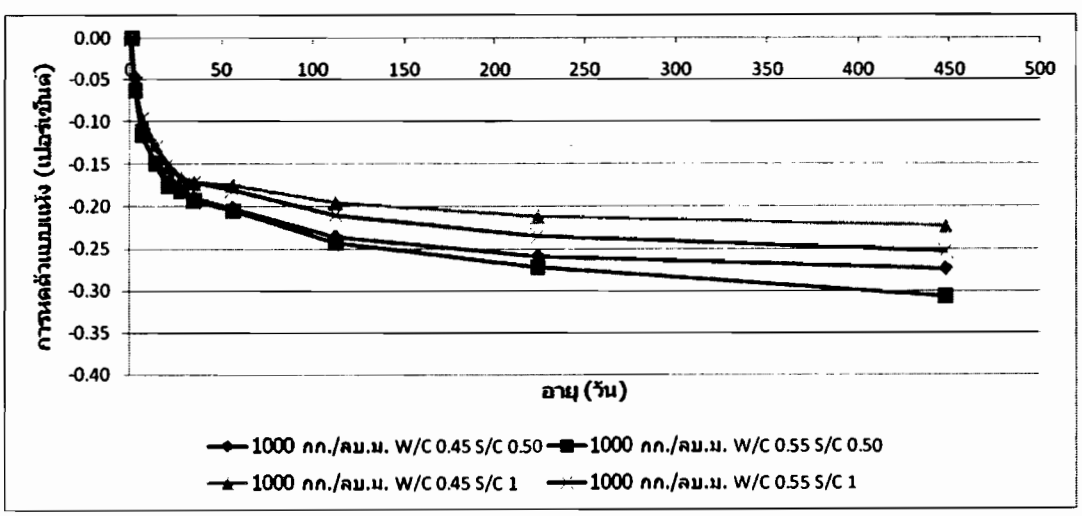
4.3.2.5 เมื่อพิจารณาที่หน่วยน้ำหนักเท่ากันและที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีอัตราการหดตัวแห้งน้อยด้วย นั่นคือ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีการหดตัวแห้งน้อยกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 จะมีปริมาณปูนซีเมนต์และทราย ซึ่งเป็นของแข็งมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 จึงมีการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่านั่นเอง ดังภาพที่ 4.19

ที่หน่วยน้ำหนัก 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.11) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.218 และ -0.366 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.167 และ -0.244 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



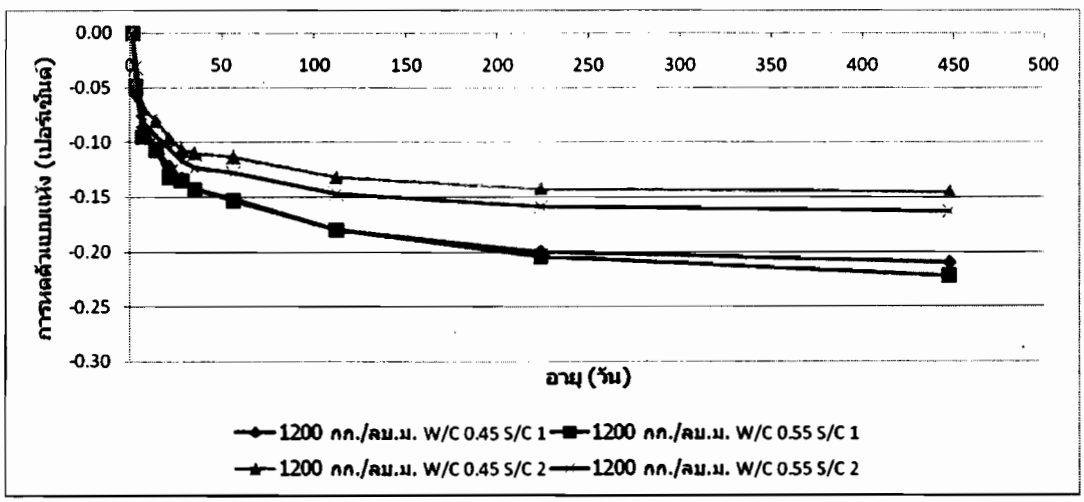
ภาพที่ 4.11 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ที่หน่วยน้ำหนัก 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.12) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.1.82 และ -0.307 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.167 และ -0.244 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



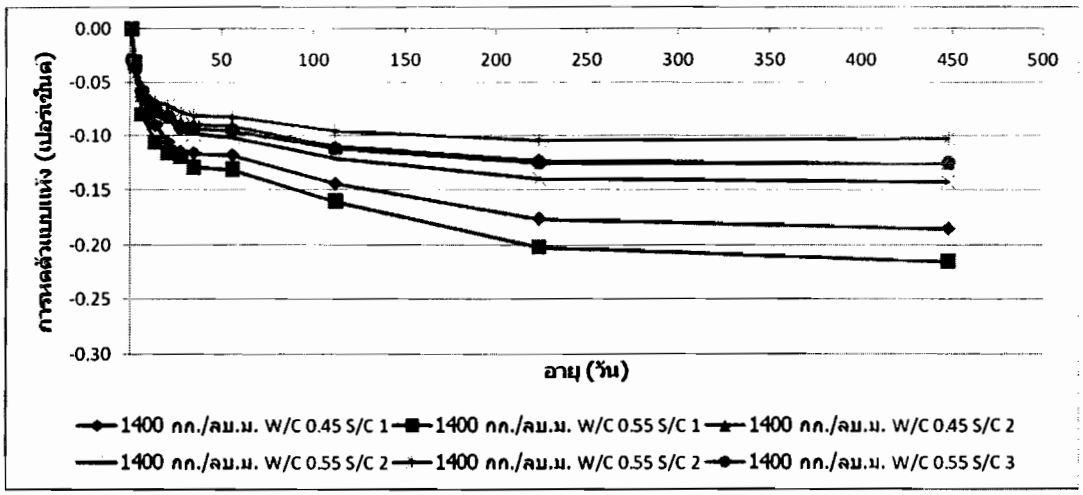
ภาพที่ 4.12 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ที่หน่วยน้ำหนัก 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.13) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.1.35 และ -0.222 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.107 และ -0.145 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



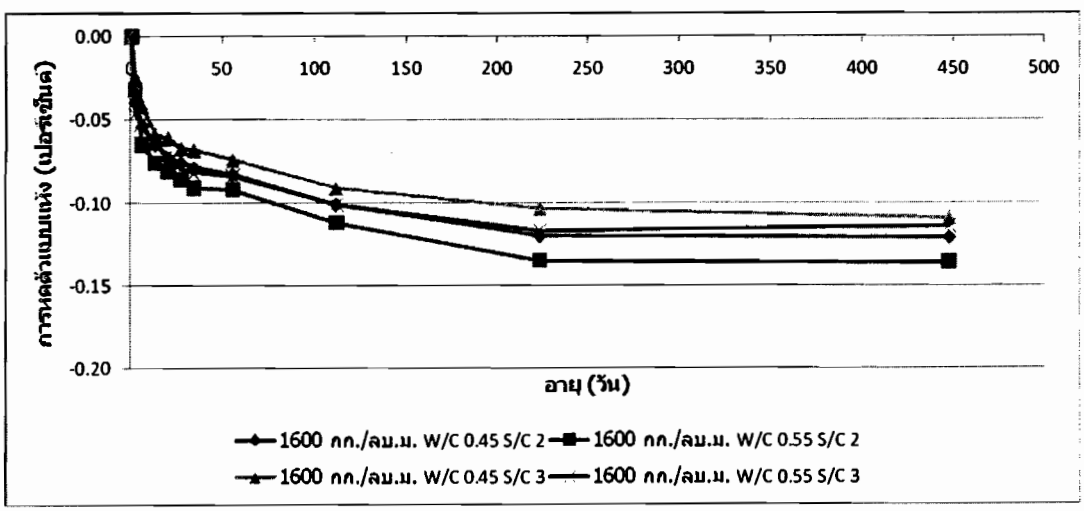
ภาพที่ 4.13 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ที่หน่วยน้ำหนัก 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.14) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.120 และ -0.215 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.078 และ -0.102 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



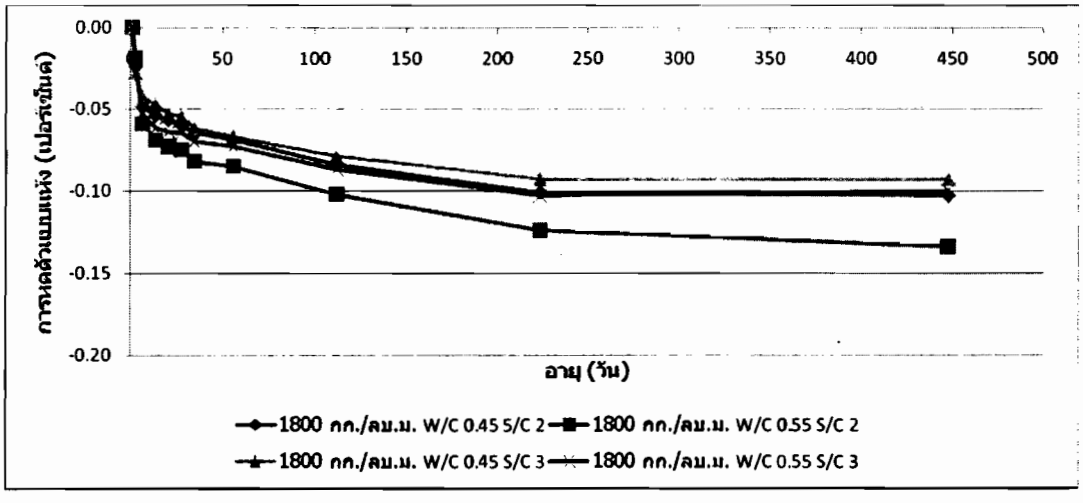
ภาพที่ 4.14 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ที่หน่วยน้ำหนัก 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.15) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.086 และ -0.136 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.067 และ -0.109 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.15 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ที่หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 4.16) ค่าการหดตัวแบบแห้งมากสุด พบในสูตรที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 448 วัน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณ -0.075 และ -0.134 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุด พบในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ที่อายุ 28 และ 448 วัน อัตราการหดตัวแห้งมีค่าประมาณ -0.055 และ -0.093 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



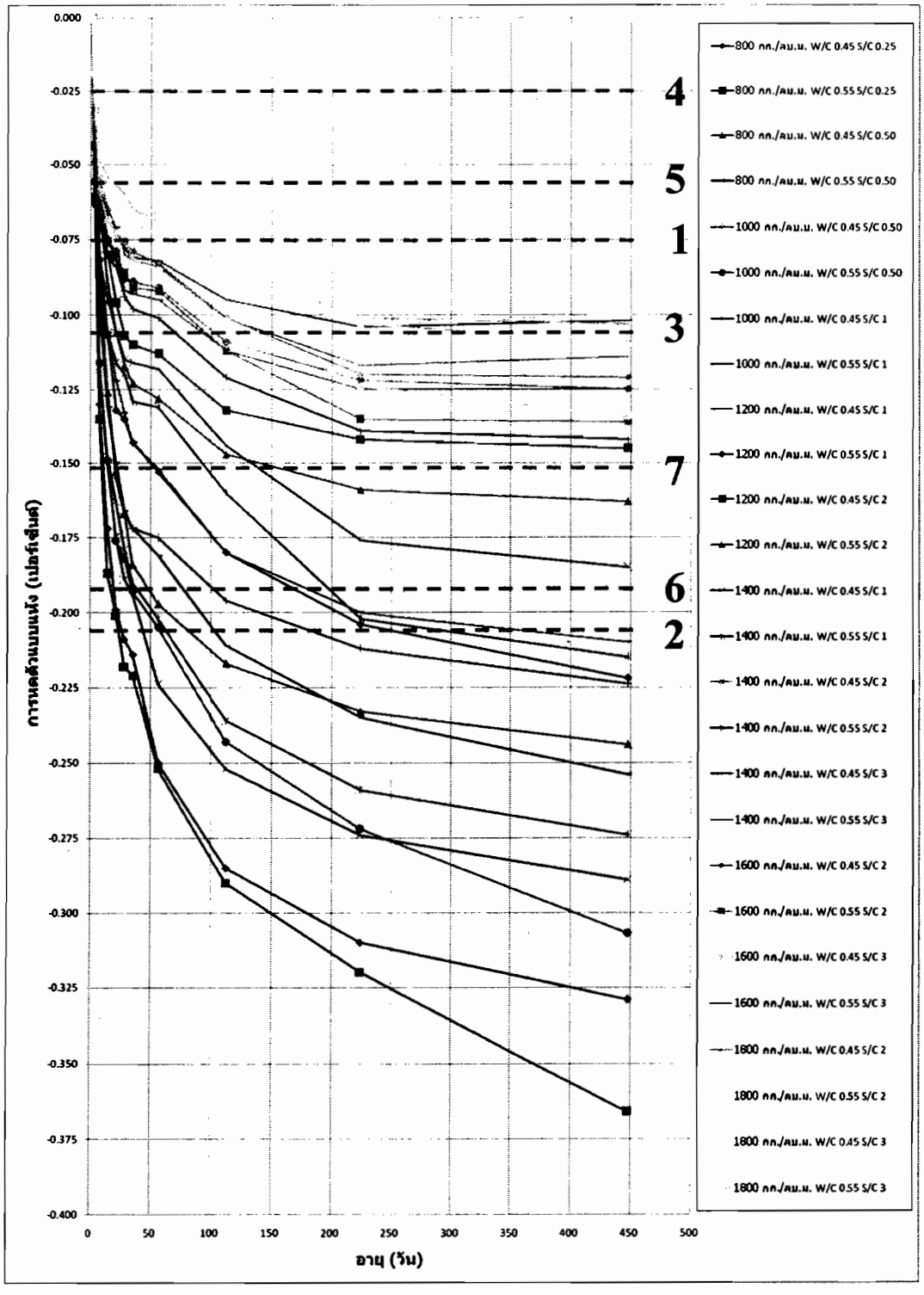
ภาพที่ 4.16 การหดตัวแบบแห้งกับอายุ ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4.3.3 วิเคราะห์ผลการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 448 วัน

จากผลการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ผลิตเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นๆ สามารถนำเสนอได้ดังในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.20 พบว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีการหดตัวแบบแห้งค่อนข้างมากว่าคอนกรีตชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตชนิดอื่นๆ

หมายเลข	รายละเอียดคอนกรีต	การหดตัวแบบแห้ง เปอร์เซ็นต์	สูตรออกแบบที่การหดตัวแบบแห้งใกล้เคียงกัน			
			การหดตัวแบบแห้ง เปอร์เซ็นต์	หน่วยน้ำหนัก กก./ลบ.ม.	S/C	W/C
1	ดีคอน ระบบ CLC	0.070	-	-	-	-
2	นีโอโพร์ ระบบ CLC	0.200	0.244	800	0.5	0.45
			0.224	1000	1	0.45
			0.222	1200	1	0.55
			0.215	1400	1	0.55
3	ไลท์บิลท์ ระบบ AAC	0.100	0.102	1400	3	0.45
			0.109	1600	3	0.45
			0.103	1800	2	0.45
			0.093	1800	3	0.45
			0.100	1800	3	0.55
4	คิวคอน ระบบ AAC	0.020	-	-	-	-
5	มอก. 1505-2541	0.050	-	-	-	-
6	อิฐมอญ	0.180	0.185	1400	1	0.45
7	คอนกรีตปกติ	0.145	0.145	1200	2	0.45
			0.142	1400	2	0.55



หมายเหตุ : หมายเลขที่ใช้เปรียบเทียบในภาพ แสดงในตารางที่ 4.7

ภาพที่ 4.17 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 0-448 วัน

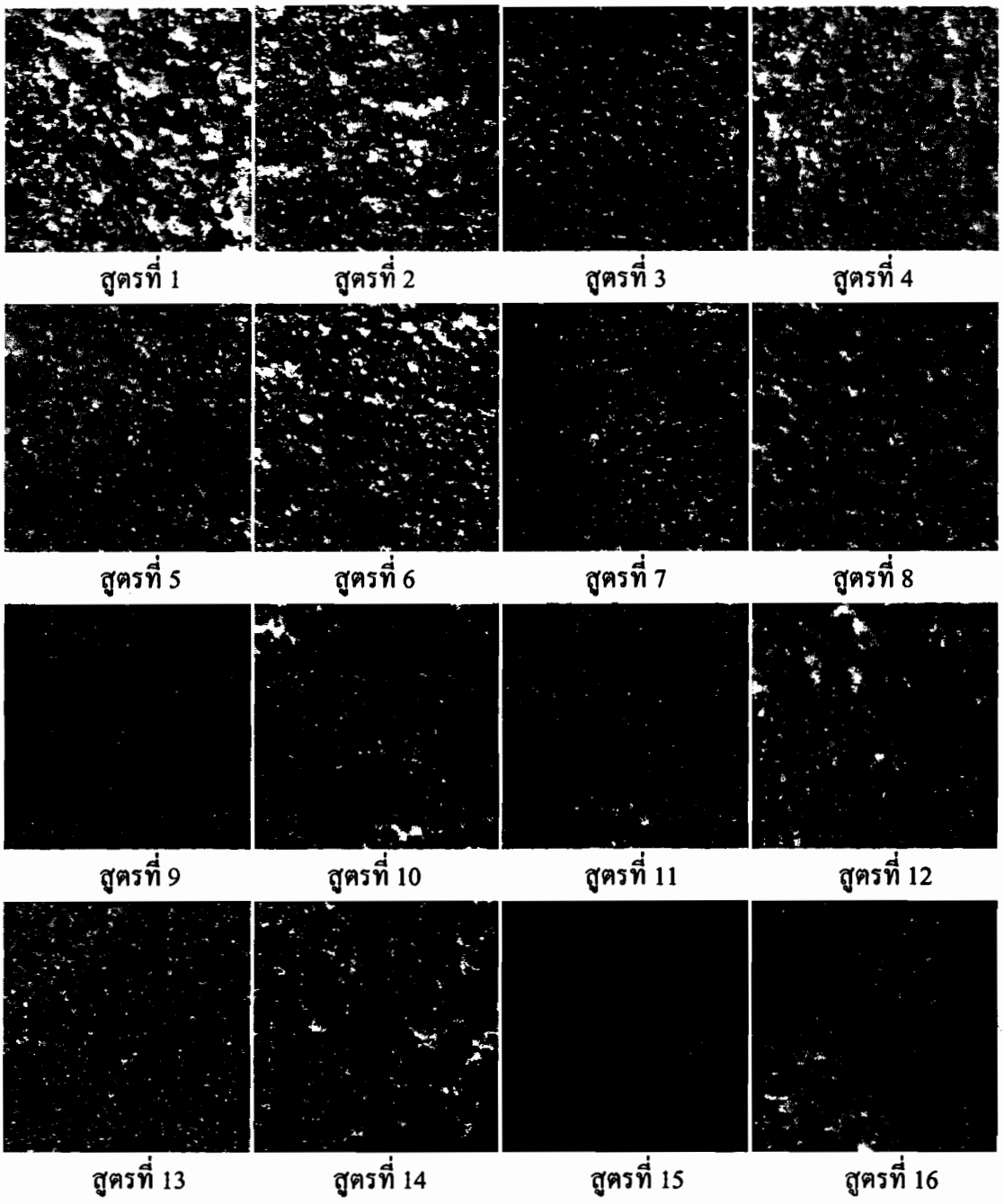
4.4 ปริมาณฟองอากาศอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.4.1 ผลทดสอบปริมาณฟองอากาศ

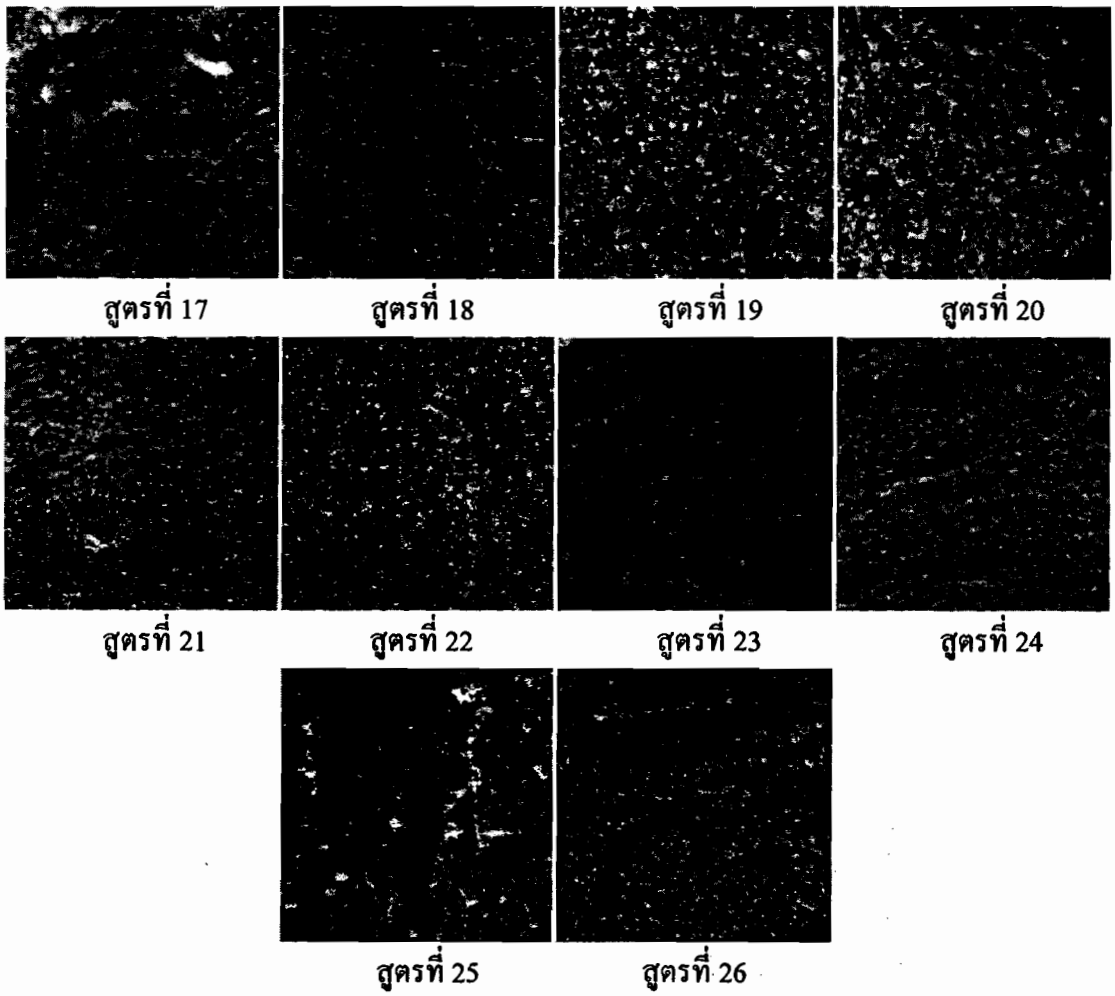
ผลทดสอบปริมาณฟองอากาศจะทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยใช้โปรแกรม Air void Analyzer โดยอัตราส่วนผสมที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีปริมาณฟองอากาศต่ำสุดเท่ากับ 13.35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีปริมาณฟองอากาศสูงสุดเท่ากับ 64.71 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ได้จากการสแกนหลังจากทาสีและลงแป้งเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22

ตารางที่ 4.8 ปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนักออกแบบ (kg/m^3)	S/C	W/C	ฟองอากาศ (เปอร์เซ็นต์)
1	800	0.25	0.45	48.33
2			0.55	43.78
3		0.5	0.45	17.24
4			0.55	44.40
5	1000	0.5	0.45	42.01
6			0.55	35.63
7		1	0.45	32.68
8			0.55	26.77
9	1200	1	0.45	17.31
10			0.55	29.68
11		2	0.45	64.74
12			0.55	28.64
13	1400	1	0.45	37.79
14			0.55	20.19
15		2	0.45	42.93
16			0.55	54.02
17		3	0.45	41.76
18			0.55	14.86
19	1600	2	0.45	30.30
20			0.55	16.86
21		3	0.45	27.15
22			0.55	24.89
23	1800	2	0.45	13.35
24			0.55	26.89
25		3	0.45	26.96
26			0.55	16.20



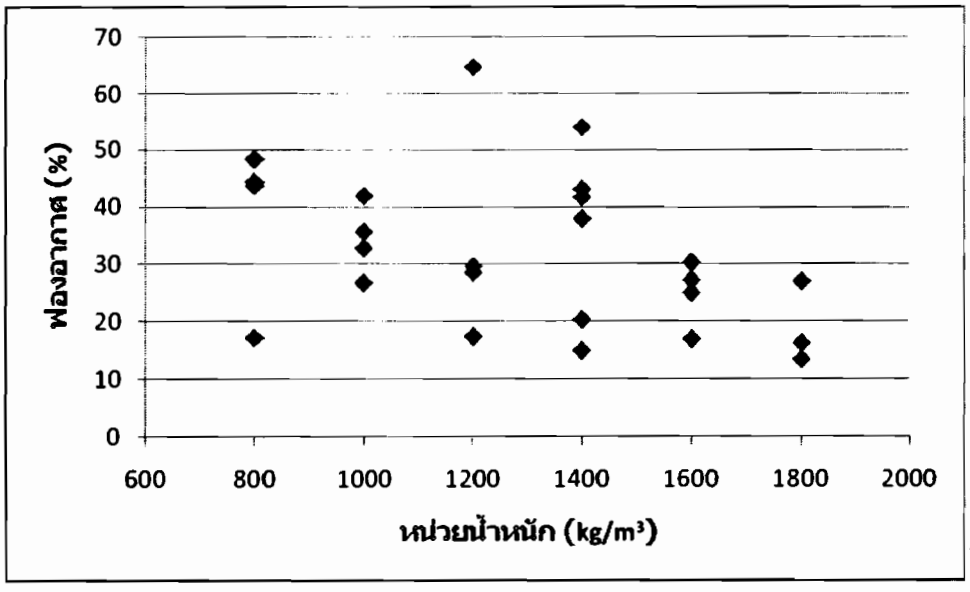
ภาพที่ 4.18 ภาพที่ได้จากการสแกนหลังจากทาสีและลงแป้งเรียบร้อยแล้ว สูตรที่ 1-16



ภาพที่ 4.19 ภาพที่ได้จากการสแกนหลังจากทาสีและลงแป้งเรียบร้อยแล้ว สูตรที่ 17-26

4.4.2 วิเคราะห์ผลทดสอบปริมาณฟองอากาศ

จากผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.20 พบว่า แนวโน้มปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตยังไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดในทางทฤษฎี ความไม่สอดคล้องที่พบจากการศึกษาอาจมาจากค่าปริมาณฟองอากาศที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศเป็นการพัฒนาโปรแกรมของ Jeremy Carlson, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Tech University โปรแกรมนี้ใช้ทดสอบคอนกรีตแบบปกติซึ่งมีปริมาณของมวลรวมหยาบ ดังนั้น ภาพที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างที่แข็งแรงเนื่องจากมีส่วนผสมของมวลรวมหยาบจึงมีความแม่นยำ เพราะ โปรแกรมสามารถแยกแยะส่วนผสมในเนื้อคอนกรีตได้อย่างชัดเจนว่าส่วนใดเป็นมวลรวม ส่วนใดเป็นช่องว่างอากาศ



ภาพที่ 4.20 หน่วยน้ำหนักกับฟองอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การประยุกต์ใช้โปรแกรมดังกล่าวกับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบและความเปราะบางของโครงสร้างฟองอากาศอย่างมาก เป็นเรื่องยากและสำคัญมาก เพราะส่งผลโดยตรงต่อผลการมีฟองอากาศ การเตรียมตัวอย่างดำเนินการโดยใช้ใบตัดคอนกรีตตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาดกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตรและหนา 2 เซนติเมตร ขั้นตอนนี้หากคอนกรีตที่มีค่าความหนาแน่นน้อยมากๆ นั่นคือ มีฟองอากาศมากจะมีความพรุนสูง โครงสร้างฟองอากาศจะเปราะบางมากและผนังฟองอากาศจะล้มง่าย ดังนั้น ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดได้ผิวหน้าจะไม่เรียบเป็นระนาบเดียวกันซึ่งยากต่อการเตรียมพื้นผิว สำหรับโปรแกรมในการวิเคราะห์แยกแยะลักษณะของฟองอากาศออกจากส่วนผสมอื่น

ในขั้นตอนการลงสีที่ผิวหน้าคอนกรีตเพื่อแสดงในเห็นความแตกต่างระหว่างผิวคอนกรีตกับฟองอากาศ ดำเนินการโดยใส่แป้งลงไปในช่องว่างของอากาศให้เต็มแล้วทาสีดำบริเวณขอบโพรงอากาศในเนื้อคอนนกรีต ดังนั้น ปริมาณฟองอากาศจะเสมือนว่ามีสีขาวและเนื้อคอนกรีตส่วนอื่นจะเป็นสีดำ ขั้นตอนนี้มีความยาก เมื่อตัดลงสีดำให้กับเนื้อคอนกรีตเพราะสีบางส่วนจะซึมไปในส่วนของฟองอากาศที่มีแป้งสีขาวลงไว้แล้วทำให้ทั้งพื้นผิวมีสีกลืนกัน เป็นสีเทา ยากต่อการแยกแยะของโปรแกรมรวมถึงการที่โครงสร้างฟองอากาศล้ม เนื่องจากความเปราะของคอนกรีต ดังนั้นการเติมแป้งเข้าไปในฟองอากาศบางส่วนจึงไม่เห็นเป็นฟองอากาศขนาดเล็กแยกกันแต่จะเห็นเป็นโพรงต่อเนื่องกัน ทำให้ผลการอ่านค่าฟองอากาศที่ได้มาเกินความเป็นจริง

4.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.5.1 ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จะทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยอัตราส่วนผสมที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.168 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน ส่วนหน่วยน้ำหนักออกแบบ 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.189 วัตต์ต่อเมตร.องศาเคลวิน สำหรับผลการทดสอบอัตราส่วนผสมอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก กก./ม^3	S/C	W/C	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์ / (เมตร x องศาเคลวิน)
1	800	0.5	0.45	ไม่ได้ทำการทดสอบ
2			0.55	
3		1	0.45	
4			0.55	
5	1000	0.5	0.45	
6			0.55	
7		1	0.45	
8			0.55	
9	1200	1	0.45	
10			0.55	
11		2	0.45	
12			0.55	

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ต่อ)

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก กก./ม^3	S/C	W/C	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัตต์ / (เมตร x องศาเคลวิน)
13	1400	1	0.45	ไม่ได้ทำการทดสอบ
14			0.55	
15		2	0.45	
16			0.55	
17		3	0.45	
18			0.55	
19	1600	2	0.45	0.178
20			0.55	0.180
21		3	0.45	0.168
22			0.55	0.174
23	1800	2	0.45	0.182
24			0.55	0.189
25		3	0.45	0.181
26			0.55	0.187

4.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากผลการทดลองสามารถนำเสนอผลในรูปแบบกราฟของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าของแต่ละหน่วยน้ำหนักได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.21

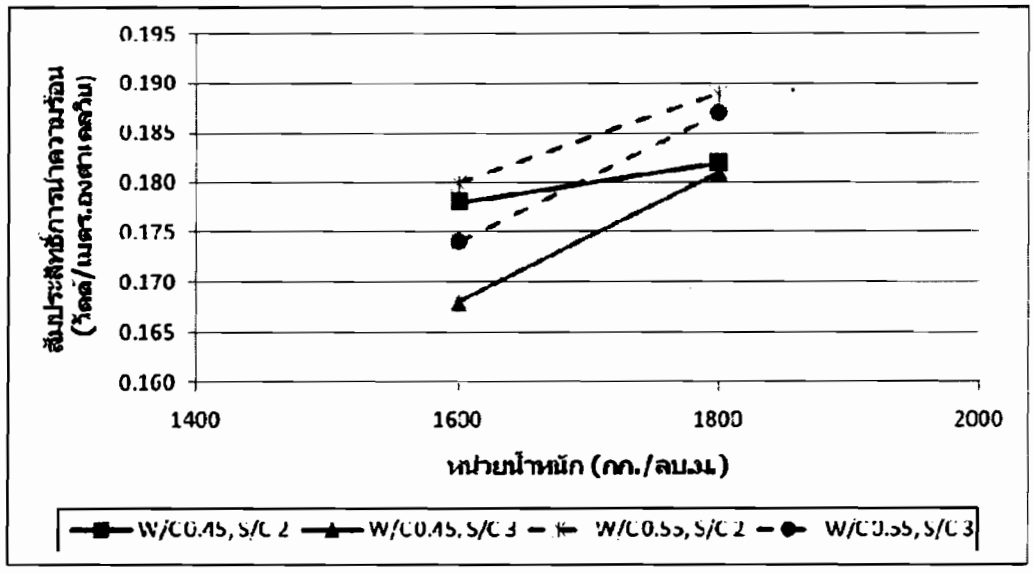
เมื่อพิจารณาปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถนำเสนอแนวโน้มความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

4.5.2.1 การที่หน่วยน้ำหนักคอนกรีตสูงมีคุณสมบัติการนำความร้อนดีนั้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักสูงมักจะมีความแข็ง กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักต่ำกว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะเป็นคอนกรีตพรุนด้วยโพรงอากาศ ซึ่งอากาศมีคุณสมบัติการนำความร้อนได้ไม่ดีเท่าของแข็ง จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนักออกแบบต่ำมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าหน่วยน้ำหนักออกแบบที่สูงกว่านั่นเอง

4.5.2.2 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์จะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์

การนำความร้อนสูงกว่าอัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 ดังแสดงในภาพที่ 4.22 เนื่องจากอัตราส่วนผสมที่มีทรายน้อยจะมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมาก ทำให้ความยึดเกาะเชื่อมประสานกันดี ทำให้สามารถนำความร้อนได้ดี

4.5.2.3 โดยภาพรวมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าหน่วยน้ำหนัก 1600-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งไม่เป็นไปตามกำลังรับแรงอัดเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงความชื้นคงค้างที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็จะสูง ความชื้นในแผ่นตัวอย่างทดลองยังคงมีอยู่มาก ซึ่งความชื้นนั้นมีผลต่อการนำความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนก็จะสูงผิดปกติเช่นกัน



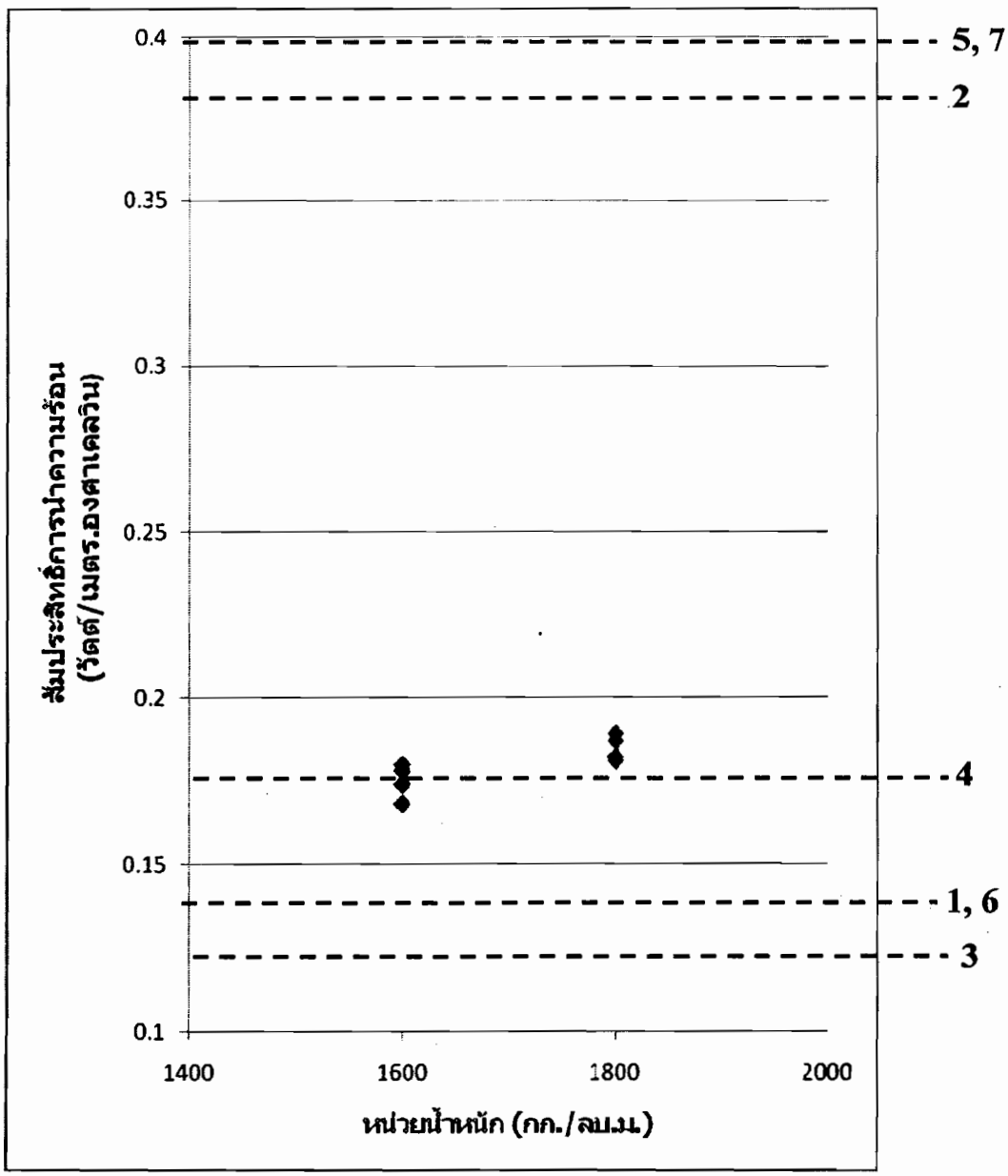
ภาพที่ 4.21 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.5.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

โดยภาพรวม คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนัก 1600-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนไม่ใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่วไป แต่ใกล้เคียงกับบล็อกมวลเบาระบบอบด้วยไอน้ำ ยี่ห้อคิวคอน รุ่น G4 แสดงในตารางที่ 4.10 และ ภาพที่ 4.22

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

หมายเลข	รายละเอียด	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	สูตรที่ทดสอบ			
			สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	หน่วยน้ำหนัก	S/C	W/C
		(W/m.K)	(W/m.K)	กก./ลบ.ม.		
1	ดีคอน ระบบ CLC	0.135	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่า			
2	นีโอโพร์ ระบบ CLC	0.38	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า			
3	คิวคอน G2 ระบบ AAC	0.124	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่า			
4	คิวคอน G4 ระบบ AAC	0.178	1.78	1600	2	0.45
			1.80	1600	2	0.55
			1.81	1800	3	0.45
5	อิฐมอญ	1.15	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า			
6	k Block ระบบ CLC	0.14	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่า			
7	คอนกรีตปกติ	1.63	ทุกสูตรให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า			



หมายเหตุ : หมายเลขที่ใช้เปรียบเทียบในภาพ แสดงในตารางที่ 4.10

ภาพที่ 4.22 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

4.6 กำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4.6.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบ เซลลูล่า ที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25, 0.50, 1, 2 และ 3 ได้ผลการทดสอบทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และผลการทดสอบสูงสุดและต่ำสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด 56 วัน (ksc)		การหดตัวแบบแห้ง	ปริมาณฟองอากาศ	K
				ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์	448 วัน (เปอร์เซ็นต์)	28 วัน (เปอร์เซ็นต์)	28 วัน (W/m.K)
1	800	0.25	0.45	27	23.4	-0.329	48.33	-
2			0.55	30.8	27.8	-0.366	43.78	-
3		0.5	0.45	17.9	14.1	-0.244	17.24	-
4			0.55	24.6	19.9	-0.289	44.40	-
5	1000	0.5	0.45	47.5	33.6	-0.274	42.01	-
6			0.55	53	41.2	-0.307	35.63	-
7		1	0.45	28.7	20.9	-0.224	32.68	-
8			0.55	40.1	29.0	-0.254	26.77	-
9	1200	1	0.45	60.8	49.0	-0.210	17.31	-
10			0.55	61.8	55.6	-0.222	29.68	-
11		2	0.45	32	28.0	-0.145	64.74	-
12			0.55	41.1	28.4	-0.163	28.64	-
13	1400	1	0.45	113.2	95.3	-0.185	37.79	-
14			0.55	109.8	88.0	-0.215	20.19	-
15		2	0.45	82.8	68.2	-0.125	42.93	-
16			0.55	78.7	61.7	-0.142	54.02	-
17		3	0.45	73.1	57.5	-0.102	41.76	-
18			0.55	67	45.3	-0.125	14.86	-

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (ต่อ)

ลำดับที่	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	S/C	W/C	กำลังรับแรงอัด 56 วัน (ksc)		การหดตัวแบบแห้ง	ปริมาณฟองอากาศ	K
				ทรงกระบอก	ทรงลูกบาศก์	448 วัน (เปอร์เซ็นต์)	28 วัน (เปอร์เซ็นต์)	28 วัน (W/m.K)
19	1600	2	0.45	149.3	117.1	-0.121	30.30	0.178
20			0.55	132.1	106.4	-0.136	16.86	0.180
21		3	0.45	121.3	101.4	-0.109	27.15	0.168
22			0.55	119.1	100.1	-0.114	24.89	0.174
23	1800	2	0.45	241.6	185.0	-0.103	13.35	0.182
24			0.55	193.6	175.6	-0.134	26.89	0.189
25		3	0.45	238.3	175.5	-0.093	26.96	0.181
26			0.55	174.1	144.5	-0.100	16.20	0.187

ตารางที่ 4.12 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด

ลำดับที่	คุณสมบัติ		อายุคอนกรีต วัน	หน่วย	ค่าที่ได้	หน่วยน้ำหนักออกแบบ kg/m^3	S/C	W/C	คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง: กำลังรับแรงอัด ksc	การหดตัวแบบแห้ง 448 วัน %	ปริมาณฟองอากาศ %	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน W/m.K
1	กำลังรับแรงอัด (ทรงกระบอก)	สูงสุด	56	ksc	241.6	1800	2	0.45	-	-0.103	13.35	0.182
2		ต่ำสุด			17.9	800	0.5	0.45	-	-0.244	17.24	-
3	กำลังรับแรงอัด (ทรงลูกบาศก์)	สูงสุด	56	ksc	185.0	1800	2	0.45	-	-0.103	13.35	0.182
4		ต่ำสุด			14.1	800	0.5	0.45	-	-0.244	17.24	-
5	การหดตัวแบบแห้ง	สูงสุด	448	%	0.366	800	0.25	0.55	30.8	-	43.78	-
6		ต่ำสุด			0.093	1800	3	0.45	238.3	-	26.29	0.181
7	ปริมาณฟองอากาศ	สูงสุด	28	%	64.74	1200	2	0.45	32.0	-0.145	-	-
8		ต่ำสุด			13.35	1800	2	0.45	241.6	-0.103	-	0.182
9	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	สูงสุด	28	W/m.K	0.189	1800	2	0.55	193.6	-0.134	26.89	-
10		ต่ำสุด			0.168	1600	3	0.45	121.3	-0.109	27.15	-

4.6.2 การนำไปใช้งาน

มาตรฐานของวัสดุสำหรับงานก่อสร้างโดยทั่วไปจะกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาให้เป็นหลัก ดังนั้นการเปรียบเทียบคุณภาพเพื่อนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าไปใช้งานจึงใช้กำลังรับแรงอัดเป็นค่าเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไปและใช้คุณสมบัติอื่นๆ ประกอบการพิจารณาว่าจะนำไปใช้งานในส่วนใดของอาคาร ดังตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง

ตารางที่ 4.13 ค่าเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง

ลำดับที่	วัสดุ	มาตรฐาน	ชั้นคุณภาพ	กำลังรับแรงอัดมาตรฐาน ksc	กำลังรับแรงอัดทดสอบ ksc	หน่วยน้ำหนักออกแบบ kg/m^3	S/C	W/C	คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง		
									การหดตัวแบบแห้ง 448 วัน %	ปริมาณฟองอากาศ %	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน W/m.K
1	คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก	มอก. 58-2533		25	27	800	0.25	0.45	-0.329	48.33	-
					28.7	1000	1	0.45	-0.224	32.68	-
2	คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก	มอก. 57-2516	ก, ข	50	53.0	1000	0.5	0.55	-0.307	35.63	-
			ค	70	60.8	1200	1	0.45	-0.210	17.31	-
					61.8	1200	1	0.55	-0.222	29.68	-
					78.7	1400	2	0.55	-0.142	54.02	-
					73.1	1400	3	0.45	-0.12	41.76	-
3	คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ	มอก. 1505-2541	4	25	27	800	0.25	0.45	-0.329	48.33	-
					28.7	1000	1	0.45	-0.224	32.68	-
			6	50	53.0	1000	0.5	0.55	-0.307	35.63	-
					60.8	1200	1	0.45	-0.210	17.31	-
					61.8	1200	1	0.55	-0.222	29.68	-
			8	75	78.7	1400	2	0.55	-0.142	54.02	-
					82	1400	2	0.45	-0.125	42.93	-
			10	100	113.2	1400	1	0.45	-0.185	37.79	-
					109.8	1400	1	0.55	-0.215	20.19	-
4	มาตรฐานงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป			180	193.6	1800	2	0.55	-0.134	26.89	0.189
				210	238.3	1800	3	0.45	-0.093	26.96	0.181
				240	241.6	1800	2	0.45	-0.103	13.5	0.182

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้นำเสนอปัจจัยหน่วยน้ำหนักและอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าในหัวข้อที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศ และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนในหัวข้อที่ 5.2 การนำไปใช้ในหัวข้อที่ 5.3 สุดท้ายหัวข้อที่ 5.4 เป็นข้อเสนอแนะในการศึกษาและการทดสอบ

5.1 ปัจจัยหน่วยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นคอนกรีตพรุนมีฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีตในการผลิตใช้อุปกรณ์เหมือนกับการผลิตคอนกรีตทั่วไป มีส่วนผสมหลัก คือ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และฟองโฟมเหลวคงรูป จะไม่มีมวลรวมหยาบหรือหินเป็นส่วนผสม การสร้างโฟมเหลวทำได้โดยอาศัยเครื่องผลิตโฟม และน้ำยาสร้างฟองโฟม หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าขึ้นกับปริมาณโฟมเหลวที่ฉีดเข้าไปผสมในเนื้อคอนกรีต หากต้องการค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบน้อยต้องฉีดโฟมเหลวปริมาณมาก หมายถึง ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมาก

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ใช้หลักการออกแบบค่าหน่วยน้ำหนักที่ต้องการ แล้วกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ จึงทำการคำนวณปริมาณน้ำยาสร้างฟองโฟม และน้ำที่ใช้ผสมน้ำยาฟองโฟม ระยะเวลาในการฉีดฟองโฟมเป็นตัวกำหนดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) กำลังรับแรงอัดสูง ต้องใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ยกเว้นที่หน่วยน้ำหนัก 800-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง

(2) การหดตัวแบบแห้งต่ำ ต้องใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์สูง และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ

(3) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ต้องใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์สูง และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ

5.2 ค่ากำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง ปริมาณฟองอากาศ และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดลองที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 800-1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25, 0.50, 1, 2 และ 3 ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.2.1 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอกที่ทดสอบทั้งหมด 26 สูตร ที่อายุ 56 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 17.9 - 241.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์มีค่าอยู่ในช่วง 14.1 - 185.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ที่อายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 1.2 เท่าของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ และ ที่อายุ 56 วัน กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 1.3 เท่าของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์

5.2.2 ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 448 วัน ของตัวอย่างที่ทดลองทั้ง 26 สูตร มีค่าอยู่ในช่วง 0.093 – 0.366 เปอร์เซ็นต์

คอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักออกแบบน้อย มีการหดตัวแห้งสูงกว่าค่าหน่วยน้ำหนักมาก คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศมากจะเกิดการหดตัวสูง เนื่องจากการสูญเสียน้ำที่เคยอยู่ในฟองอากาศไป คล้ายกับกรณีที่ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากอาจมีน้ำอิสระเหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมาก เมื่อคอนกรีตเริ่มต้นก่อตัวน้ำอิสระนี้ก็เริ่มระเหยออกจากเนื้อคอนกรีตทำให้การหดตัวแห้งในช่วงแรกค่อนข้างสูง กรณีปริมาณทรายในส่วนผสม พบว่า คอนกรีตมีส่วนผสมของทรายปริมาณมาก คอนกรีตจะมีค่าการหดตัวน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากทรายเป็นวัสดุคงรูป ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดจึงน้อยกว่า

5.2.3 ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตทดสอบโดยใช้โปรแกรมของ Jeremy Carlson, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Tech University พบว่า ปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ในช่วง 13.35 – 64.74 เปอร์เซ็นต์

ฟองอากาศมีผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีปริมาณฟองอากาศสูงจะมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อย ปัญหาที่พบในการทดลองหาปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต คือ การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยจะมีความเปราะบางสูง และข้อจำกัดที่ว่าผิวหน้าของตัวอย่างต้องมีความเรียบเสมอกันโปรแกรมจึงจะให้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อด้อยของการศึกษาโดยใช้วิธีการนี้ การเตรียมตัวอย่างให้ดีและสมบูรณ์นั้นทำได้ยาก

5.2.4 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนทดสอบโดยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate ได้ทำการทดสอบเฉพาะที่คอนกรีตหน่วยน้ำหนัก 1600 – 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.168 – 0.189 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนบ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุว่ามีความเป็นฉนวนมีความสามารถในการหน่วงการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุฉนวนจะมีค่าต่ำ คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักน้อย หมายความว่า มีปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมากจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำซึ่งก็คือ ความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ช่องอากาศหรือฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีตเหล่านี้ทำหน้าที่ลดทอนหรือยืดหน่วงพลังงานความร้อนเอาไว้ไม่ให้ผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ จากการทดลองพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำมากจะมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง หากผสมด้วยปริมาณทรายมากจะมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า

5.3 การนำไปใช้งาน

การศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปการนำไปใช้งานโดยใช้กำลังรับแรงอัดเป็นตัวเลือกหลัก เพราะ กำลังรับแรงอัดเป็นหน้าที่หลักของคอนกรีต ตัวเลือกรองลงมาคือการหดตัวแบบแห้ง เพราะการหดตัวที่มากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างไม่สามารถรับกำลังต่อไปได้ หรือเมื่อนำไปเป็นบล็อกสำหรับก่อผนังการหดตัวก็มีผลกับผนังฉาบด้วย ถ้าการหดตัวมีมากเกินไปผนังที่ฉาบไว้อาจหลุดล่อนได้ ตัวเลือกที่สามคือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เป็นคุณสมบัติที่เด่นอีกอย่างของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งต้องมีค่าน้อยเพื่อลดความร้อนภายในอาคาร เป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่งด้วย ตัวเลือกไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในที่นี้ คือ ปริมาณฟองอากาศ ถึงแม้ว่าฟองอากาศมีผลโดยตรงต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต แต่ทว่าในการศึกษานี้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองยังไม่น่าเชื่อถือเท่าที่ควร ดังอธิบายในวิเคราะห์ผลการทดสอบ บทที่ 4 ฉะนั้นจึงขอละเว้นการวิเคราะห์เชื่อมโยงข้อมูลดังกล่าว และเห็นว่าควรให้มีการศึกษาเพิ่มเติมจนน่าเชื่อถือก่อนนำมาเชื่อมโยงกับค่าคุณสมบัติอื่นที่ทดสอบได้

การนำไปใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถเทียบเคียงกับวัสดุมาตรฐาน มอก. ได้ดังนี้ (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 4)

5.3.1 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่หน่วยน้ำหนักออกแบบ 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 58-2533

5.3.2 หน่วยน้ำหนัก 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพและมีการหดตัวน้อยซึ่งน่าจะเทียบเคียงได้กับคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 57-2516 ชั้นคุณภาพ ก และ ข

5.3.3 หน่วยน้ำหนัก 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีกำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและมีอัตราการหดตัวแห้งต่ำมากเพียงแค่ประมาณ 0.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน่าจะเทียบเคียงได้กับคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 57-2516 ชั้นคุณภาพ ค

5.3.4 สำหรับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ – อบไอน้ำ แบ่งออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ คือ 4, 6, 8 และ 10 เมื่อพิจารณาโดยอาศัยเกณฑ์มาตรฐานกำลังรับแรงอัดเป็นหลักและพิจารณาที่การหดตัวแห้งต่ำ สามารถคัดเลือกสูตรส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ชั้นคุณภาพทั้ง 4 ชั้นคุณภาพ ตามลำดับ ดังนี้

ชั้นคุณภาพ 4 - หน่วยน้ำหนัก 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน ทราย ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

ชั้นคุณภาพ 6 - หน่วยน้ำหนัก 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

ชั้นคุณภาพ 8 - หน่วยน้ำหนัก 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

ชั้นคุณภาพ 10 - หน่วยน้ำหนัก 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทราย ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45

5.3.5 การนำไปใช้งานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปที่กำลังรับแรงอัด 180, 210 และ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบที่

หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55

หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 3 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ

หน่วยน้ำหนัก 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ตามลำดับ

5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษา

5.4.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าซึ่งทดสอบด้วยตัวอย่างทรงกระบอกได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าทรงลูกบาศก์นั้น แตกต่างจากคอนกรีตปกติ ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันว่าผลการทดสอบนั้นเป็นคุณลักษณะของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า หรือเกิดจากขั้นตอนการผลิตคอนกรีตที่ต้องควบคุมคุณภาพให้มากยิ่งขึ้น

5.4.2 ในการศึกษาคุณสมบัติการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มีข้อจำกัดของข้อมูลที่อายุคอนกรีต 448 วัน แต่ดูเหมือนว่าอัตราการหดตัวของคอนกรีตยังมีต่อไปเรื่อยๆ ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การศึกษานี้น่าจะมีการดำเนินงานต่อไปอีกจนพบว่าค่าอัตราการหดตัวเริ่มคงที่หรือน้อยมาก

5.4.3 การหาปริมาณฟองอากาศ เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างส่งผลโดยตรงต่อผลการศึกษา ดังนั้น ควรมีการค้นคว้าหาวิธีที่เหมาะสมกับการเตรียมตัวอย่างของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเพื่อให้ผลการศึกษาออกมาถูกต้อง

5.4.4 ถึงแม้ว่าเครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะให้ค่าที่สอดคล้องกับช่วงค่าการนำความร้อนของวัสดุคอนกรีตประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตามยังไม่ทราบได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่หาได้จากเครื่องมือชุดนี้ถูกต้องแม่นยำเพียงใด เนื่องจากยังไม่ได้มีการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบนี้กับชุดทดสอบมาตรฐานอื่นๆ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของเครื่องมือควรมีการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบโดยใช้อุปกรณ์มาตรฐานอื่นๆ และการศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นเรื่องที่น่าสนใจมากเพราะเป็นลักษณะเด่นของคอนกรีตประเภทนี้การออกแบบสูตรส่วนผสมให้หลากหลายประกอบกับการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีที่แตกต่างกันหลายวิธีน่าจะช่วยให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้ดียิ่งขึ้น

5.4.5 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอัตราส่วนผสมเดียวกัน และอัตราส่วนผสมอื่นๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาและนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

[1] นิพนธ์ สุวรรณสุขโรจน์. 2540. คอนกรีตวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 4. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.

[2] A.M. Neville. 1995. Properties of Concrete. fourth ed. England: Longman Group Limited, Essex.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.

[4] Valore, J.C. 1954. "Cellular concretes-physical properties", Journal of the American Concrete Institute. 25: 817-36.

[5] ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี. คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ม.ปพ.

[6] ปีติ สุคนธสุขกุล. 2542. คอนกรีตขั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[7] Neopor System GmbH. 2009. Cellular Lightweight Concrete Engineering Manual. http://www.neopor.com/en/intro.htm., September 15, 2009.

[8] ศักรินทร์ เหลืองกำจร. 2552. Control Drying Shrinkage Crack in Concrete. http://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf. 15 กันยายน, 2552.

[9] Kosmatka, Steven H., and Panarese, William C. 2003. Design and Control of Concrete Mixtures EB001. 14th edition. Illinois, USA: Portland Cement Association.

[10] กรัณย์ กันพ้นภัย และคณะ. 2539. การพัฒนาเครื่องมือวัดหาค่าประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างในช่วงอุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส. ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[11] Litebuilt. 2009. Hankbook Aerated Concrete Procuct. www.litebuilt.com. May 25, 2009.

[12] นระ คมนามูล. 2547. วัสดุและการทดสอบแบบไม่ทำลายในงานวิศวกรรมโยธา. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[13] E.K.K. Nambiar and K. Ramamurthy. 2007. "Air void characterisation of foam concrete", Cement and Concrete Composites. 37: 221-230.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[14] สมชาย มณีวรรณ์ และคณะ. 2550. "อิทธิพลของฟองอากาศที่มีผลต่อการดูดซึมความชื้นในเนื้อวัสดุก่อสร้าง", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. น. 25-26. 17-19 ตุลาคม 2550 ณ โรงแรมเวลดัม จอมเทียน บีช จังหวัดชลบุรี.

[15] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ. 2551. "กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4. น.41-42. 20-22 ตุลาคม 2551 ณ โรงแรมลายทอง จังหวัดอุบลราชธานี.

[16] สุเมธ สันทัดวัฒนา และคณะ. 2552. "การวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC จากความหนาแน่นของคอนกรีต", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5. น.56-57. 20-22 ตุลาคม 2552 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา.

[17] ศิวะ วาสาลา และคณะ. 2551. "อิทธิพลของ Foaming Agent ระบบ CLC ที่มีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตเสริมเหล็ก", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. น.128-129. 14-16 พฤษภาคม 2551 ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา จังหวัดชลบุรี.

[18] ประสิทธิ์ มีสุขหมาย และวิษณุ มาสุด. 2541. การศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในช่วงอุณหภูมิต่ำ. ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[19] วินิต ช่อวิเชียร. 2529. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สัมพันธ์พาณิชย์.

[20] จันทนา สุขุมานนท์ และคณะ. 2551. อินทรีคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน).

[21] อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชญ์ และคณะ. 2552. "การหดตัวแห้งและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5. น.84-85. 20-22 ตุลาคม 2552 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา.

[22] N. Narayanan, K. Ramamurthy. 2000. "Structure and properties of aerated concrete: a review", Cement & Concrete Composites. 22: 321-329.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[23] Pospisil F, Jambor J and Belko J. 1992. "Unit weight reduction of fly ash aerated concrete", In Wittmann FH. editor. Advances in Autoclaved Aerated Concrete. 15: 43-52.

[24] บริษัท ดีคอนโปรดักส์ จำกัด (มหาชน). "บล็อกคอนกรีตมวลเบา", บล็อกเทากันความร้อนดีคอน. www.dconproduct.com. 15 กันยายน, 2552.

[25] บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่น โปรดัคส์ จำกัด (มหาชน). 2547. ข้อมูลผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบา Q CON. พระนครศรีอยุธยา : บริษัท ควอลิตี้คอนสตรัคชั่น โปรดัคส์ จำกัด (มหาชน).

[26] มีชัย เข็มธนู และคณะ. 2552. ปริมาณช่องว่างอากาศและค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1 บทนำ

ประกอบด้วยกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ทดลองหาข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบส่วนผสม ดำเนินการผลิตและเก็บตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบหาการรับกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและปริมาณช่องว่างอากาศของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

2 วัสดุ และเครื่องมือในการศึกษา

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2) ทรายสะอาด ผ่านการร่อนเอาเศษอินทรีย์ออก

3) น้ำสะอาด โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

4) สารเพิ่มฟองอากาศ โดยผสมสารเพิ่มฟองอากาศกับน้ำในอัตราส่วน 1:30 ของบริษัท แอลซีเอ็ม ประเทศไทย จำกัด

5) เครื่องผลิตโฟมเหลว

6) แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร

7) แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30x15 เซนติเมตร

8) แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร

9) แบบหล่อคอนกรีต ขนาด 300x300x25 มิลลิเมตร

10) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต

11) เครื่องวัดเปรียบเทียบความยาว

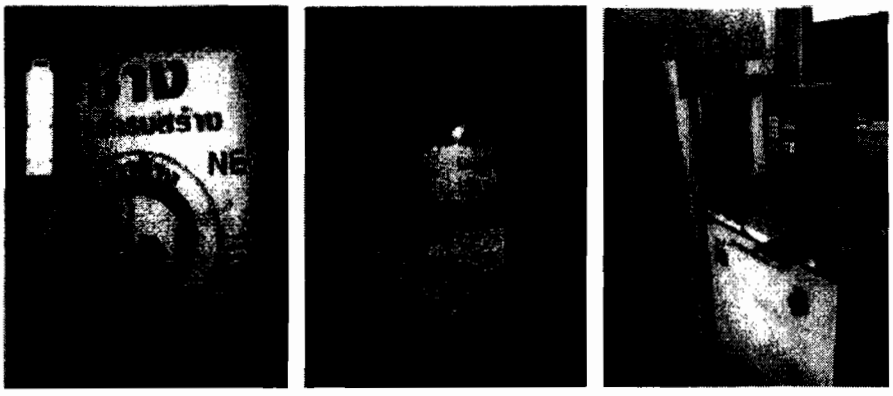
12) เครื่องทดสอบการนำความร้อนแบบแผ่นทำความร้อนแบบส่วนควบคุม

13) เครื่องสแกน HP รุ่น Officejet 6500A

14) เครื่องตัดไฟเบอร์ 14 นิ้ว

15) เครื่องชั่งน้ำหนักที่ชั่งได้ละเอียด 1 กรัม

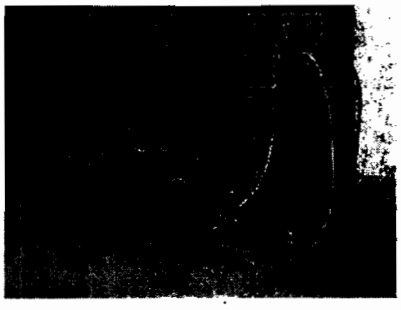
16) เครื่องชั่งน้ำหนักที่ชั่งได้ละเอียด 5 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 60 กิโลกรัม



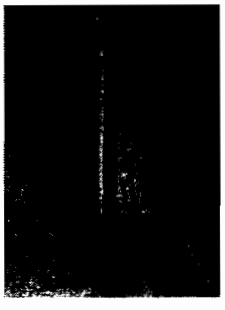
(ก)

(ข)

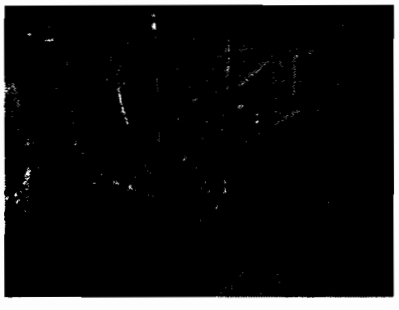
(ค)



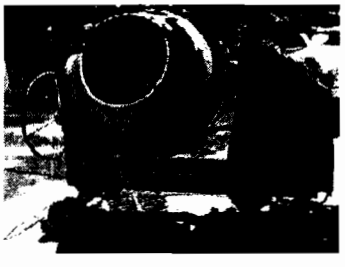
(ง)



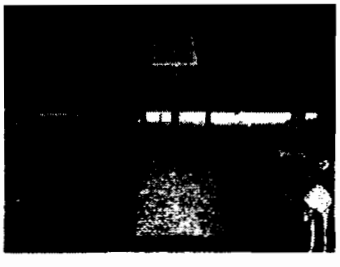
(จ)



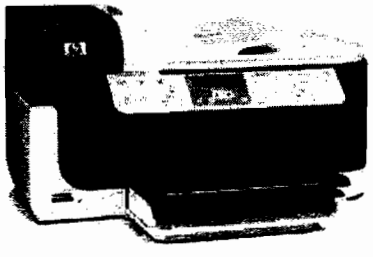
(ฉ)



(ช)



(ซ)



(ฌ)

(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ข) สารเพิ่มฟองอากาศ (ค) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต (ง) เครื่องผลิตฟองโฟม (จ) เครื่องทดสอบการนำความร้อนแบบแผ่นทำความร้อนแบบส่วนควบคุม (ฉ) เครื่องวัดเปรียบเทียบความยาว (ช) โม่ผสมคอนกรีต (ซ) เครื่องชั่งน้ำหนักที่ชั่งได้ละเอียด 5 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 60 กิโลกรัม (ฌ) เครื่องสแกน HP รุ่น Officejet 6500A

ภาพที่ ก.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการศึกษา

3 การคำนวณหาส่วนผสมต่างๆ

1) กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมต่อครั้ง (ใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์) โดยการสุ่ม เมื่อคำนวณได้ส่วนผสมตามต้องการแล้ว จะทราบปริมาตรคอนกรีต ตรวจสอบปริมาตรคอนกรีตที่ผสมได้ กับปริมาตรคอนกรีตที่ต้องการเก็บตัวอย่าง ว่าเพียงพอต่อการเก็บตัวอย่างหรือ ไม่ หากไม่

เพียงก็ทำการสุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ใหม่ แล้วคำนวณส่วนผสม จนได้ปริมาตรคอนกรีตเพียงพอต่อการเก็บตัวอย่าง โดยเผื่อปริมาตรที่ผสมคอนกรีตไว้เพิ่มอีก 20 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรคอนกรีตที่ต้องการ จากความเสียหาย เช่น การเทคอนกรีตเผื่อการทรุดตัว คอนกรีตติดตามโม่ผสมคอนกรีต และคอนกรีตตกหล่นเสียหาย เป็นต้น

2) คำนวณหาปริมาตรวัสดุผสม ตามสมการดังต่อไปนี้

(1) คำนวณหาปริมาตรของวัสดุผสมทั้งหมด, V_r

$$V_r = V_c + V_s + V_w \qquad \text{(ก.1)}$$

เมื่อ V_c คือ ปริมาตรปูนซีเมนต์ (ลูกบาศก์เมตร)
V_s คือ ปริมาตรทราย (ลูกบาศก์เมตร)
V_w คือ ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

โดยที่ $$V = \frac{M}{\rho} \qquad \text{(ก.2)}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัสดุ (ลูกบาศก์เมตร)
M คือ น้ำหนักของวัสดุ (กิโลกรัม)
ρ คือ หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(2) คำนวณหาปริมาตรที่ต้องการ, V_R

$$V_R = {}^{M_r}/_{\rho_R} \qquad \text{(ก.3)}$$

เมื่อ M_r คือ น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด (กิโลกรัม)
ρ_R คือ หน่วยน้ำหนักที่ต้องการ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(3) คำนวณหาปริมาตรฟองโฟมเหลวที่ต้องใช้,

$$V_F = V_R - V_r \qquad \text{(ก.4)}$$

(4) คำนวณหาปริมาณน้ำรวมน้ำยาโฟมที่ต้องใช้ในการผสม, M_{F+W}

$$M_{F+W} = \frac{V_F \times 1{,}000}{Q_F} \qquad \text{(ก.5)}$$

(5) คำนวณหาปริมาณน้ำยาโฟมที่ใช้, M_F

$$M_F = \frac{M_{F+W}}{((W:F)+1)} \qquad \text{(ก.6)}$$

(6) คำนวณหาปริมาณน้ำสำหรับผสมน้ำยาโฟม, M_{WF}

$$M_{WF} = M_F \times (W:F) \qquad \text{(ก.7)}$$

เมื่อ $(W:F)$ คือ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำยาโฟม
- ปรับแก้อัตราส่วนผสม เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของน้ำและน้ำยาโฟมและเนื่องจากความชื้นของทราย
- ปรับแก้อัตราส่วนผสม เนื่องจากความชื้นของทราย

4 การผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าและการเก็บตัวอย่างสำหรับศึกษา

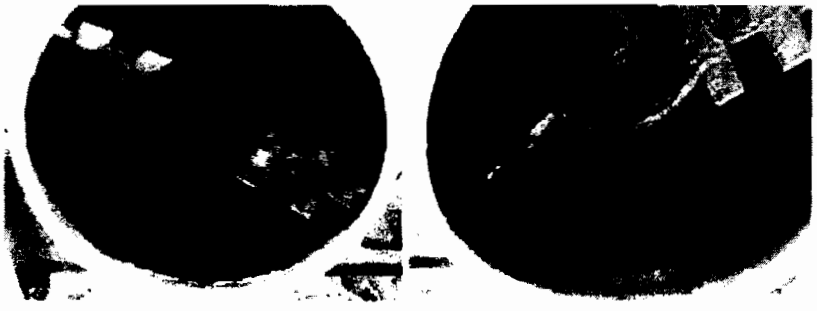
เมื่อได้ทำการออกแบบส่วนผสม นำอัตราส่วนส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณออกแบบมาทำการผลิตคอนกรีต และทำการเก็บตัวอย่างตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เตรียมโม่ผสมคอนกรีต โดยฉีดน้ำเข้าในโม่ผสมคอนกรีต เพื่อให้โม่ผสมคอนกรีตดูดน้ำ เมื่อเวลาผสมคอนกรีตจะได้โม่ดูดน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต รอจนโม่ผสมคอนกรีตแห้ง

2) ระหว่างรอโม่ผสมคอนกรีตแห้งหมาด เตรียมน้ำยาโฟมและน้ำ ในอัตราส่วนน้ำยาโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 30 โดยผสมให้เพียงพอต่อการใช้ในการผสมคอนกรีต โดยวิธีการฉีดโฟมเหลวที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีแรกผสมน้ำยาโฟมและน้ำตามปริมาณที่ คำนวณได้แล้วฉีดโฟมเหลวให้หมด อีกวิธีที่สอง คือ ผสมน้ำยาโฟมและน้ำให้มากกว่าที่จะใช้ผสมคอนกรีตจริงเล็กน้อย แล้วใช้วิธีการจับเวลาในฉีดโฟมเหลว โดยในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธีการที่สอง โดยทำการตวงน้ำยาโฟม 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร และชั่งน้ำผสมน้ำยาโฟม 3 กิโลกรัม ผสมน้ำยาโฟมและน้ำคนให้เข้ากัน แล้วเทใส่ถังแรงดันผลิตโฟม เปิดเครื่องอัดอากาศ เปิดวาล์วเข้าถังแรงดันผลิตโฟมจนค่าแรงดันถังแรงดันผลิตโฟมมีค่า 0.65 เมกกะปาสคาล

3) ชั่งส่วนผสมปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำผสมคอนกรีตตามที่ออกแบบไว้

4) เมื่อโม่ผสมคอนกรีตแห้งหมาด ใส่ทรายและปูนซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีต เปิดเครื่องผสมให้ทรายและปูนซีเมนต์คลุกเคล้ากัน

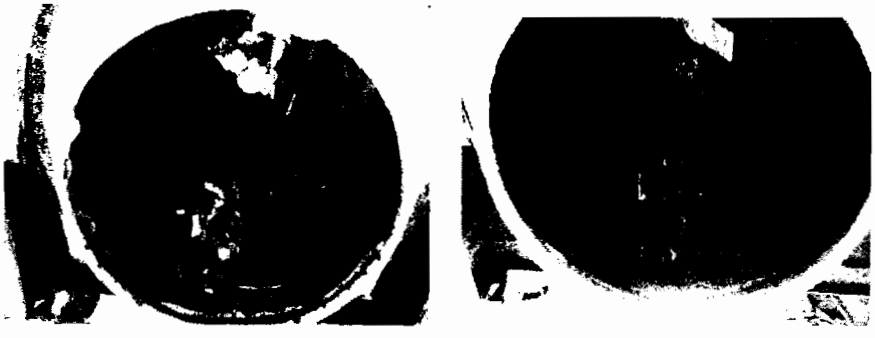


ภาพที่ ก.2 ทรายและปูนซีเมนต์ที่คลุกเคล้ากันดีแล้วและน้ำผสมกับทรายและปูนซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกัน

5) เมื่อทรายและปูนซีเมนต์ คลุกเคล้ากันดีแล้ว ใส่น้ำลงไปในโม่ผสมคอนกรีตโดยระหว่างเติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีตเพื่อให้น้ำที่เติมลงไปเข้ากันได้ดีกับทรายและปูนซีเมนต์ ในระหว่างผสมให้สังเกต การผสมกันของ ทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำ หรือมอร์ต้า หากพบว่ามอร์ต้าจับตัวกันเป็นก้อนให้ปิดเครื่องผสมแล้วใช้เกรียงบดก้อนมอร์ต้าให้แตกออกจากกัน เสร็จแล้วก็เปิดเครื่องอีกครั้งจนมอร์ต้าผสมกันดี

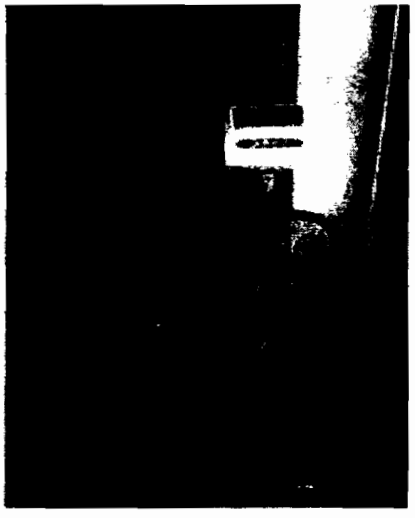
6) เมื่อน้ำผสมกับทรายและปูนซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการฉีดโฟมเหลวโดยจับเวลาตามที่ได้ออกแบบไว้ลงไป โดยระหว่างการฉีดโฟมเหลวต้องเปิดเครื่องผสมคอนกรีต

7) เมื่อมอร์ต้ากับโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงหยุดเครื่องผสม ในการผสมในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที



ภาพที่ ก.3 การฉีดโฟมเหลวและมอร์ต้าผสมโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน

8) ตรวจสอบหน่วยน้ำหนัก โดยใช้ภาชนะที่มีปริมาตร 1 ลิตร ตวงคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วนำไปชั่ง เช่น เมื่อผสมคอนกรีตที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อตวงด้วยภาชนะปริมาตร 1 ลิตร จะต้องได้น้ำหนักเท่ากับ 1,800 กรัม โดยยอมให้คลาดเคลื่อนได้ ± 50 กรัม

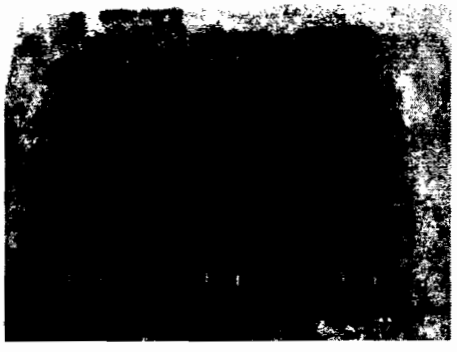


ภาพที่ ก.4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักคอนกรีตที่ทำการผลิต

9) นำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x 15 เซนติเมตร จำนวน 12 ตัวอย่าง แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร จำนวน 12 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเทคอนกรีตให้เต็มแบบหล่อในครั้งเดียว เพื่อให้ได้เนื้อคอนกรีตสม่ำเสมอตลอดชิ้นตัวอย่าง เทให้คอนกรีตให้ล้นแบบหล่อเล็กน้อย เผื่อการทรุดตัวของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวประมาณ 1 ชั่วโมง จึงตัดแต่งคอนกรีตด้วยเกรียงเหล็ก ให้ได้ขนาดตัวอย่างตามที่ต้องการ

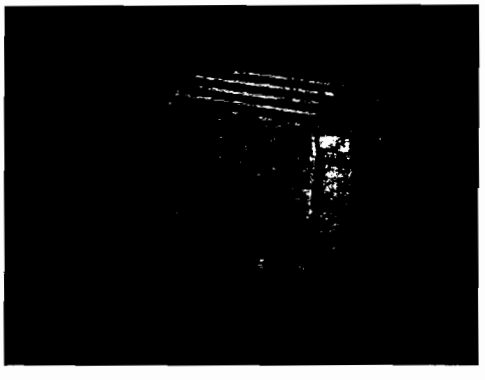
ภาพที่ ก.5 ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบหล่อทรงลูกบาศก์และแบบหล่อทรงกระบอก

10) นำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อคอนกรีตขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการติดตั้งพุกช่วยวัดความยาว (gage stud) เรียบร้อยแล้ว จำนวน 6 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบการหดตัวแบบแห้ง วิธีการเทคอนกรีตเช่นเดียวกันกับข้อ (9)



ภาพที่ ก.6 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

11) นำคอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อคอนกรีต ขนาด 300x300x25 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วิธีการเทคอนกรีตเช่นเดียวกันกับข้อ (9)



ภาพที่ ก.7 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ในแผ่นซีดี ชื่อไฟล์ ข้อมูลผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ในแผ่นซีดี

ชื่อไฟล์ ข้อมูลผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งคอนกรีตมวลเบา แบบเซลลูล่า

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ในแผ่นซีดี ชื่อไฟล์ ข้อมูลผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายปภาวิน สินรัมย์
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ. 2545-2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ. 2550-2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ประวัติการวิจัย	พ.ศ. 2555 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2549-2549 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็มทีเอ็นวายเทค 2000 งานก่อสร้างประปาหมู่บ้านขนาดกลางและขนาดเล็ก จังหวัดร้อยเอ็ด, งานเดินท่องานระบบประปาภูมิภาคเขต 8 จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างตึกแถว 3 ชั้น 6 คูหา จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2550-2550 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด คำผองวิศวกรรม งานก่อสร้างอาคารเรียนมหาวิทยาลัยโปลีเทคนิคภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อาคาร 4 ชั้น ระบบพื้น post-tention จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างโชว์รูมรถยนต์ โตโยต้าดีเยี่ยม จังหวัดอุบลราชธานี, งานสำรวจรังวัดที่ดิน จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2551-2551 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด อโนธิชา งานก่อสร้างตลาดเทศบาลวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างศาลจังหวัดเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2552-2553 ตำแหน่งวิศวกรโยธา บริษัท เกทเวย์อาร์คิเทค ที่ปรึกษางานก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยข้าราชการตุลาการ 24 หน่วย และอาคารชุดพักอาศัยข้าราชการศาลยุติธรรม 36 หน่วย จังหวัดอุบลราชธานี

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายปภาวิน สินรัมย์
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ. 2545-2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, พ.ศ. 2550-2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ประวัติการวิจัย	พ.ศ. 2555 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2549-2549 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็มทีเอ็นวายเทค 2000 งานก่อสร้างประปาหมู่บ้านขนาดกลางและขนาดเล็ก จังหวัดร้อยเอ็ด, งานเดินท่องานระบบประปาภูมิภาคเขต 8 จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างตึกแถว 3 ชั้น 6 คูหา จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2550-2550 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด คำผองวิศวกรรม งานก่อสร้างอาคารเรียนมหาวิทยาลัยโปลีเทคนิคภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อาคาร 4 ชั้น ระบบพื้น post-tention จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างโชว์รูมรถยนต์ โตโยต้าดีเยี่ยม จังหวัดอุบลราชธานี, งานสำรวจรังวัดที่ดิน จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2551-2551 ตำแหน่งวิศวกรโยธา ห้างหุ้นส่วนจำกัด อโนธิชา งานก่อสร้างตลาดเทศบาลวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี, งานก่อสร้างศาลจังหวัดเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2552-2553 ตำแหน่งวิศวกรโยธา บริษัท เกทเวย์อาร์คิเทค ที่ปรึกษางานก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยข้าราชการตุลาการ 24 หน่วย และอาคารชุดพักอาศัยข้าราชการศาลยุติธรรม 36 หน่วย จังหวัดอุบลราชธานี

ประวัติผู้วิจัย (ต่อ)

พ.ศ. 2554-2554 ตำแหน่งวิศวกรโยธา
ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็มทีเอ็นวายเทค 2000 งานก่อสร้าง
สถานีอนามัยและอาคารชุดพักอาศัย 6 คูหา จังหวัดร้อยเอ็ด,
งานก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัย 32 ห้อง โรงพยาบาล
อำเภอเขาวง จังหวัดกาฬสินธุ์, งานตกแต่งภายใน
สำนักคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี