

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จารุพันธ์ ไพพุลพิมพ์

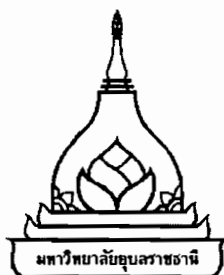
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



# STRESS-STRAIN CURVE OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

JARUPHAN PHAIPHULPHIM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2014  
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

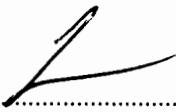
เรื่อง เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

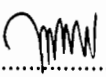
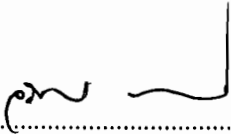
ผู้วิจัย นายจรรพันธ์ ไพพูลพิมพ์

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ทวีวุฒิ	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญดา พรรณเชษฐ์	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย)

 ..... (รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง) คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	 ..... (รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์) รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปีการศึกษา 2557

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง “เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า” สำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์และความเมตตากรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ทวีวุฒิ ประธานกรรมการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทดา พรรณเชษฐ์ กรรมการสอบ ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่าน ที่ได้ให้โอกาสในการศึกษา ให้ความรู้ และคำแนะนำสั่งสอน ตลอดจนแง่คิดการใช้ชีวิตที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และขอบคุณนักศึกษารุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย และเป็นกำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่เป็นกำลังใจอันดียิ่ง คอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือแก่ผู้ศึกษาตลอดมา และตลอดจนผู้มีพระคุณที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และกำลังใจอันดียิ่งจากทุกท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

จารุพันธ์ ไพพลพิมพ์  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

เรื่อง : เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า  
ผู้วิจัย : จารุพันธ์ ไพพูลพิมพ์  
ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย  
คำสำคัญ : เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด, คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า, โฟมคอนกรีต

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากการเติมโฟมเหลวคงรูปที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ ปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไปมีผลต่อความหนาแน่นและคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานทางด้านโครงสร้างต่อไปได้ งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้สูตรผสมจำนวนเก้าสูตร รวม 540 ตัวอย่าง โดยทดสอบแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าสามารถใช้สมการกำลังสองในการประมาณรูปร่างของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.003 และ 0.004 ตามลำดับ และพบว่าอัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่าความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยปริมาณน้ำที่มากขึ้นและปริมาณทรายที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นและความเครียดมีค่าลดลง

## ABSTRACT

TITLE : STRESS-STRAIN CURVE OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE  
AUTHOR : JARUPHAN PHAIPHULPHIM  
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR : CIVIL ENGINEERING  
ADVISOR : ASST. PROF. GRIENGSAK KAEWKULCHAI, Ph.D.  
KEYWORDS : STRESS-STRAIN CURVE, CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE,  
FOAMED CONCRETE

Cellular lightweight concrete is produced by uniform distribution of air bubbles made from preformed foam throughout the mass of concrete in substitution of coarse aggregates. This air bubbles affect the density and the properties of cellular lightweight concrete. Previous studies have found that cellular lightweight concrete can develop its strength more than  $180 \text{ kg/cm}^2$  which can be used as structural concrete. This research has studied stress-strain curves of cellular lightweight concrete having a wet density of  $1,800 \text{ kg/m}^3$  using sand to cement ratios of 1:1, 2:1, and 3:1 and water to cement ratios of 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 and 0.65 in total of nine mixes with 540 specimens. Standard cylinder samples were tested at 28 and 56 days. The results, have shown that the stress-strain curve of cellular lightweight concrete can be estimated by a quadratic equation in which strain of cellular lightweight concrete at maximum strength and ultimate strength are about 0.003 and 0.004 respectively. The results have shown that a mixture of sand to cement and water to cement ratio affects the stress and strain of cellular lightweight concrete. The higher amount of water results in lower stress and strain.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 สมมุติฐาน	2
1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 คอนกรีตมวลเบา	3
2.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส	9
2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส	10
2.4 พองอากาศ	13
2.5 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติ	14
2.6 ความเค้น-ความเครียดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติ	15
2.7 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
2.8 สรุป	29
<b>บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ</b>	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ	30
3.2 อัตราส่วนผสม	32
3.3 การคำนวณอัตราส่วนผสม	32
3.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ	36
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	40
3.6 สรุป	44

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ</b>	
4.1 บทนำ	45
4.2 ผลการทดสอบ	45
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน	49
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน	63
4.5 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์	70
4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	74
4.7 สรุปผล	77
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	80
5.2 ข้อเสนอการออกแบบงานโครงสร้างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	81
5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	81
5.4 ข้อเสนอแนะ	82
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	83
<b>ภาคผนวก</b>	
ก การออกแบบอัตราส่วนผสมและคุณสมบัติของวัสดุ	87
ข ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	93
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	128



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทและค่าทางสมบัติของมวลรวมน้ำหนักเบา	5
2.2	คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC	6
2.3	ค่าการเป็นตัวนำความร้อนของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ	7
2.4	ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดลูกบาศก์ของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ	8
2.5	ค่าหดตัวเมื่อแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ	9
2.6	คุณสมบัติของซิก้าโปโร-40 (Sikaporo-40)	14
3.1	สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	35
4.1	ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 28 วัน	46
4.2	ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่อายุ 56 วัน	48
4.3	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน	50
4.4	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน	64
ก.1	สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	88
ก.2	การทดสอบขนาดคละของทรายและค่าโมดูลัสความละเอียด	91
ก.3	การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการคูดน้ำของมวลรวมละเอียด	92
ก.4	การทดสอบปริมาณดินและฝุ่นผงในทรายโดยวิธีตกตะกอน	92
ก.5	การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย	92
ข.1	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.05 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน	94
ข.2	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.05 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน	95
ข.3	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 28 วัน	96
ข.4	ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 56 วัน	97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กราฟความสัมพันธ์เส้นแนวโน้มระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่นที่ S:C เท่ากับ 1:1 และ 2:1	11
2.2	การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบ (chord modulus) กับค่าจากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI ที่อายุ 28 และ 56 วัน	13
2.3	ฟองโฟมที่ผลิตจากน้ำยาผลิตฟองโฟมซิคาโปโร-40 (Sikaporo-40)	14
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต	15
2.5	ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตของ Hognestad	16
2.6	การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตบนเส้นความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดโดยวิธีต่าง ๆ	17
2.7	ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Hognestad	18
2.8	ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Wang and et al.	19
2.9	ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ CEB	21
2.10	ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Carreira and Chu	22
2.11	หน่วยแรงอัดสมมูลของ Whitney (a) หน้าตัดคาน, (b) ความเครียด, (c) รูปหน่วยแรงจริง, (d) รูปหน่วยแรงสมมูล	23
2.12	หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ณ สภาวะสมมูล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง	24
2.13	หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง	26
2.14	หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กมากกว่าเกณฑ์สมมูล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง	27
3.1	โม้ผสมคอนกรีต	30
3.2	เครื่องผลิตโฟมเหลว	31
3.3	แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก	31
3.4	เครื่องทดสอบแบบ Quasi-Static compressive and tensile testing Machine	32
3.5	ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนผสม	33
3.6	ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	36
3.7	ทรายที่ทำการร่อนแล้วผึ่งลมเพื่อเตรียมการผสม	37
3.8	การเตรียมเครื่องมือและวัสดุพร้อมผสม	37
3.9	ปูนซีเมนต์และทรายที่คลุกเคล้ากันได้ดีแล้ว	38
3.10	เติมน้ำในระหว่างที่เปิดเครื่องผสม	38
3.11	ฉีดฟองโฟมเหลวเข้ากับมอร์ตาร์	39

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.12	คอนกรีตที่ผสมกันดีแล้ว	39
3.13	เทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและแกะแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง	40
3.14	ขั้นตอนการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า	41
3.15	ชั่งน้ำหนักและวัดความสูงตัวอย่าง	42
3.16	กำหนดค่าโหลดเริ่มต้น โหลดสูงสุดและระยะหัดตัวสูงสุด	42
3.17	กำหนดความเร็วทดสอบและขนาดหน้าตัดตัวอย่าง	43
3.18	จัดวางตัวอย่างในตำแหน่งที่พร้อมสำหรับการทดสอบ	43
3.19	เส้นความเค้น-ความเครียดและลักษณะการวิบัติ	44
4.1	ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน	47
4.2	ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน	49
4.3	พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50	52
4.4	ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50	55
4.5	ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน	56
4.6	ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อายุ 28 วัน	58
4.7	ความเครียดเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน	59
4.8	จำลองความสัมพันธ์เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน	60
4.9	เปรียบเทียบความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติ	62
4.10	ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อายุ 56 วัน	66
4.11	ความเครียดเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน	67
4.12	จำลองความสัมพันธ์เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน	68
4.13	ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	70
4.14	ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน	70
4.15	ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน	72

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน	72
4.17 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	74
4.18 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน	75
4.19 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน	76
4.20 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน	76
ข.1 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50	99
ข.2 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50	102
ข.3 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน	103
ข.4 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55	105
ข.5 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55	108
ข.6 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน	109
ข.7 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55	111
ข.8 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55	114
ข.9 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน	115
ข.10 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65	117
ข.11 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65	120
ข.12 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 28 วัน	121

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข.13	พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65	123
ข.14	ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65	126
ข.15	ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 56 วัน	127

**คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ**

<b>สัญลักษณ์และอักษรย่อ</b>	<b>ความหมาย</b>
CLC	คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า
S:C	อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์
W/C	อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์
kg/cm <sup>2</sup>	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kg/m <sup>3</sup>	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
mm/mm	มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร
ASTM	สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน หรือ American Society for Testing and Materials
ACI	สถาบันคอนกรีตอเมริกัน หรือ American Concrete Institute

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเป็นคอนกรีตที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา สะดวกและลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเริ่มแรกนั้น ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างประเภทอิฐบล็อกก่อผนังหรือส่วนที่ไม่ได้รับน้ำหนักของโครงสร้างโดยตรง แต่ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้างทางด้านอื่น ๆ มากขึ้น

ในประเทศไทยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส เป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมกันเมื่อไม่นานมานี้ และการนำมาใช้ในงานก่อสร้างก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เฉพาะในการก่อสร้างผนังไม่รับน้ำหนัก หรือทำพื้นบล็อกคอนกรีต ดังนั้นจึงเริ่มมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในด้านต่าง ๆ กันมากขึ้น โดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้านกำลัง ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับใช้ในงานโครงสร้าง เช่น กำลึงรับแรงอัด กำลึงรับแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น แต่ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษาหรือยังไม่มีผลทดสอบและมีเอกสารอ้างอิงอย่างแน่ชัด เช่น คุณสมบัติทางด้านความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการนำไปประกอบการพิจารณาออกแบบทางด้านงานโครงสร้าง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเรื่อง เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยจะทำการศึกษาที่ค่าความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากสามารถพัฒนากำลึงได้มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้ จะเป็นส่วนหนึ่งที่จะใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาออกแบบและพฤติกรรมทางโครงสร้างต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเรื่องเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

1.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

#### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

รายละเอียดของขอบเขตในการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส มีดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาที่ค่าความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.2 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- 1.3.3 ใช้ น้ำสะอาดและทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.28 (ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4)
- 1.3.4 ใช้ อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 โดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65
- 1.3.5 ใช้ สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agents) ผลิตจากสารสังเคราะห์
- 1.3.6 ทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน

#### 1.4 สมมุติฐาน

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่สามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างได้ คุณสมบัติทางด้านความเค้น-ความเครียดมีความจำเป็นในการนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมและหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน rectangular stress block เพื่อนำไปวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้าง เช่น คานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็กได้

#### 1.5 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในส่วนบทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและสมมุติฐานของการศึกษาวิทยานิพนธ์เรื่องความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส เนื้อหาในส่วนบทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เป็นองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เนื้อหาในส่วนบทที่ 3 จะเป็นวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการทดสอบ เช่น การเตรียมตัวอย่าง วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้และวิธีการทดสอบที่นำไปสู่ผลที่คาดหวังตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เนื้อหาในส่วนบทที่ 4 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ รวมถึงคำตอบที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ เนื้อหาส่วนบทที่ 5 เป็นข้อสรุปจากการวิจัยและข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย เอกสารอ้างอิงและภาคผนวกที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ ตามลำดับ



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในประเทศไทยคอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นเพื่อลดน้ำหนักของอาคารและเป็นการประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง เป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมเมื่อไม่นานมานี้ซึ่งส่วนมากจะใช้งานก่อผนังและพื้นบล็อกคอนกรีต เนื่องจากเป็นฉนวนกันความร้อนและเป็นชั้นส่วนที่ไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง สำหรับการนำคอนกรีตมวลเบามาใช้ในงานโครงสร้างนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่และยังไม่ได้มีการตรวจสอบคุณสมบัติและความปลอดภัยในการนำมาใช้ในการก่อสร้าง จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านกำลังเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา ให้สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างได้ โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งหน่วยความเครียดนี้จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่จะนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมทางด้านทานแรงดัดของโครงสร้างและจะเป็นค่าที่นำไปใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบโครงสร้างต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตมวลเบาซึ่งเป็นพื้นฐานและแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้

### 2.1 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาคือวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาคือต่ำกว่า 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานก่อสร้างผนังและพื้น มีคุณสมบัติพิเศษคือมีน้ำหนักเบาและสามารถป้องกันความร้อนได้ดีทำให้ประหยัดการใช้พลังงาน คอนกรีตมวลเบาจำแนกออกเป็นสามประเภทดังนี้ ไพทูร์ย ประสมศรี (2543)

#### 2.1.1 คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (No – Fine Aggregate)

เป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบหลักคือ ซีเมนต์ น้ำและมวลรวมหยาบโดยไม่มีมวลรวมละเอียด ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบส่งผลให้มีน้ำหนักเบาขึ้น วัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ได้แก่ กรวดไม่หรือหินไม่ ตะกรันเม็ดหยาบ ซีเมนต์เช็ลล์เพลิ่งเผา ดินเหนียวพองตัวและตะกรันเผา คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดนี้จะมีลักษณะเป็นอนุภาคของมวลหยาบ ที่ถูกเคลือบโดยอนุภาคของซีเมนต์เฟสต์ที่มีความหนาประมาณ 1-3 มิลลิเมตร โดยที่ซีเมนต์เฟสต์จะเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมให้ยึดเกาะเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ น้ำหนักหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดจะขึ้นอยู่กับชนิดมวลรวมหยาบที่ใช้ ขนาดที่ใช้จะอยู่ช่วง 9.5-19 มิลลิเมตร และควรมีขนาดเท่าๆ กัน ซึ่งยอมให้มวลรวมหยาบที่ขนาดใหญ่กว่านี้ประมาณร้อยละ 15 และมวลรวมหยาบที่มีขนาดเล็กแต่ไม่เล็กกว่า 4.76 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 10 โดยทั่วไปคอนกรีตชนิดนี้จะมีน้ำหนักหนาแน่นประมาณ 1,600-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 18-180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับมวลรวมที่แปรผันโดยตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดมักไม่ใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ถ้าต้องใช้ควรจะ

เคลือบเหล็กเสริมด้วยน้ำปูนให้หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะและป้องกันการกัดกร่อน วิธีง่ายที่สุดในการเคลือบเหล็กเสริมคือใช้วิธีการพ่น

### 2.1.2 คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate Concrete)

คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาเป็นคอนกรีตมวลเบาชนิดหนึ่ง ที่ใช้วัสดุมวลรวมที่มีน้ำหนักเบาแทนที่หิน ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญคือมีความพรุนทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบามีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 60-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลรวมน้ำหนักเบาสามารถจำแนกออกได้เป็นสามชนิดคือ

2.1.2.1 มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หิน Vermiculite, Perlite, Pumice และ Scoria ซึ่งเป็นลาวาที่พองตัวตามธรรมชาติ เกิดขึ้นเวลาภูเขาไฟระเบิด มวลรวมชนิดนี้ใช้ผสมคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูงมากนัก

2.1.2.2 มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต เป็นมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตมากที่สุดสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท

1) Expanded Clay Aggregate ได้จากการนำดินเหนียวมาผสมกับสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศและนำไปเผาในหม้อ (Rotary Kiln) ที่ 1,200 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้จะมีการขยายตัวเนื่องจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์เกิดเป็นฟองอากาศอยู่ในเนื้อหิน ลักษณะของหินพวกนี้จะมีรูปร่างกลมแข็งผิวเรียบแน่นแต่เนื้อภายในเป็นโพรงอากาศ

2) Expanded Shale Aggregate ได้จากการนำดินดาน (Shale) มาผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์จะถูกหลอมรวมกันและจะมีฟองอากาศถูกกักไว้ภายในเนื้อหิน มีลักษณะเป็นหินที่มีความแข็งมาก หลังจากที่ได้เผาแล้วจะนำมวลรวมที่ได้ไปย่อยให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ มวลรวมชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงค่อนข้างดี จึงเป็นที่นิยมใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา

3) Sintered Fly Ash ได้จากการเอาซีเมนต์ (Fly Ash) ที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินไปทำให้เป็นเม็ดก่อนแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้อนุภาคของซีเมนต์จะเกาะกันผิวของมวลรวมเบาชนิดนี้ค่อนข้างเรียบ

2.2.2.3 มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ การใช้ไม้หรือพลาสติกบางชนิดผสมเข้าไปในคอนกรีต มวลรวมที่ได้จากของเหลือจากกระบวนการผลิต เช่น ถ่านที่หนัก (Furnace Bottom ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหรือจากการพ่นน้ำไปบนซีตกรัน (Slag) ที่หลอมเหลวที่ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อตะกรันที่แข็งตัว หลังจากนั้นจะนำไปย่อยเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ

มวลรวมน้ำหนักเบามีหลายประเภทและมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของมวลรวม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทและค่าทางสมบัติของมวลรวมน้ำหนักเบา

วัสดุ	หน่วยน้ำหนักมวลรวมเบา (kg/m <sup>3</sup> )	แหล่งกำเนิด	หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังรับแรงอัดรูปทรงลูกบาศก์ (kg/m <sup>3</sup> )	การดูดซึมน้ำ (%)
Expanded Clay, Expanded Shale	550-1,050	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	1,100-1,850	180-450	5-15
Foamed Slag	650-900	สังเคราะห์	1,100-1,850	180-450	5-25
Sintered Fly Ash	600-1,000	สังเคราะห์	1,350-1,900	180-450	14-24
Vermiculite	65-200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	400-950	8-35	20-35
Perlite	65-200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	550-800	7-42	10-50
Pumice	-	ธรรมชาติ	800-1,300	50-60	สูงมาก
Crushed Stone	1,450-1,750	ธรรมชาติ	2,250-2,400	240-550	0.5-0.2

ที่มา: ไพฑูรย์ ประสมศรี (2543)

### 2.1.3 คอนกรีตพรุน (Aerated Concrete)

ชยันต์ เจริญพร และสุเชษฐ์ เอี่ยมเมขย (2542) คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตซึ่งทำให้น้ำหนักเบาโดยทำให้เกิดการกระจายฟองอากาศในส่วนผสมของซีเมนต์และทรายละเอียดที่ยังอยู่ในสภาพพลาสติก จากนั้นปล่อยให้แข็งตัว เนื่องจากคอนกรีตพรุนจะมีรูพรุนจากฟองอากาศและไม่ใช้มวลรวมหายาบในการผลิต ลักษณะการผลิตคอนกรีตพรุนแบ่งได้เป็นสองลักษณะคือ แบบหล่อในที่ (In Situ concrete) และแบบหล่อสำเร็จซึ่งรวมทั้งบล็อกสำหรับก่อสร้าง (Building Blocks) โดยทั่วไปแล้วมักจะบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง แต่แบบหล่อในที่นั้นใช้บ่มด้วยอากาศ ความแตกต่างเพียงวิธีการบ่มก็เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ในค่าที่ต้องการหรือไม่ โดยที่คอนกรีตพรุนที่บ่มด้วยอากาศมักจะมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเป็นครึ่งหนึ่งของแบบที่บ่มด้วยไอน้ำความดันสูงเมื่อมีความหนาแน่นเท่ากัน และจะมีค่าการหดตัวเมื่อแห้งเป็นสี่หรือห้าเท่า ยิ่งไปกว่านั้นคอนกรีตพรุนที่บ่มด้วยอากาศไม่สามารถใช้ปูนขาวเป็นตัวเชื่อมได้ วิธีการผลิตคอนกรีตพรุนแบ่งออกได้เป็นสองวิธีคือ

2.1.3.1 วิธีทางเคมี (Chemical method) เป็นวิธีการผลิตคอนกรีตพรุนโดยใช้ผลจากปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นในส่วนของเนื้อคอนกรีต ขณะที่ยังเหลวหรืออยู่ในสภาพพลาสติก

(Plastic) เมื่อใส่สารเคมีเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต จากความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของคอนกรีต จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดฟองอากาศขึ้นอย่างมากมาย โดยทั่วไปจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ตัวเชื่อมประสานโดยทั่วไปจะใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือปูนขาวหรือทั้งสองพร้อม ๆ กัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำยาก ควบคุมคุณภาพการผลิตยาก สารที่ทำให้เกิดฟอง ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ผงอะลูมิเนียม คอนกรีตพูนที่ได้จากวิธีทางเคมีโดยการเติมสารที่ทำให้เกิดฟองโดยบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงเรียกว่า คอนกรีตมวลเบาแบบ AAC (Autoclave Aerated Concrete)

Narayanan and Ramamurthy (2000) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตเติมฟองอากาศ (Aerated concrete) พบว่าวิธีการก่อตัวของรูพูนและวิธีการบ่ม มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติต่อตัวมันเอง คุณสมบัติได้รับอิทธิพลจากความหนาแน่นซึ่งขึ้นกับปริมาณความชื้นที่ระเหย การผลิตโฟมด้วยวิธีอบไอน้ำ (Autoclave Aerated Concrete; AAC) มีเสถียรภาพมากกว่าการผลิตโฟมด้วยวิธีไม่อบไอน้ำ (Non-Autoclave Aerated Concrete; NAAC) ซึ่งทำให้มีกำลังสูงกว่า การหดตัวเมื่อแห้งของ AAC ต่ำกว่าของ NAAC ประมาณหนึ่งในสี่ของคุณสมบัติของวัสดุ และสภาพภูมิอากาศมีผลต่อการหดตัว คุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตเติมฟองอากาศสามารถสรุปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC

Dry density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (ksc)	Static modulus of elasticity (x10 <sup>-5</sup> ksc)	Thermal conductivity (Watt/m -°C)
400	13.25-28.55	0.18-1.17	0.07-0.11
500	20.39-44.86	1.24-1.84	0.08-0.13
600	28.55-64.24	1.76-2.64	0.11-0.17
700	39.76-86.67	2.42-3.58	0.13-0.21

ที่มา: Narayanan and Ramamurthy (2000)

2.1.3.2 วิธีทางกล (Mechanical Method) เป็นวิธีที่ทำงานง่าย ควบคุมคุณภาพได้ดีกว่าวิธีทางเคมีและประหยัดกว่า เป็นวิธีที่ใช้ในการหล่อในที่เพื่อใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป โดยแบ่งออกได้ดังนี้

1) Excess Water Method เป็นการผสมโดยใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปจนทำให้ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ ทำโดยผสมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้จำนวนมาก ๆ และทำการผสมหลายครั้งซึ่งจะทำให้มีจำนวนน้ำปริมาณมาก เมื่อนำไปบ่มด้วยไอน้ำความดันสูงให้แห้งจะเกิดช่องว่างอากาศแทนที่น้ำส่วนเกินที่ระเหยออกไป คอนกรีตที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำและเรียกว่า Light Line Concrete เพราะที่ใช้ปูนขาวเป็นตัวเชื่อม

2) Air Entraining Agent เป็นวิธีมีส่วนที่เหลว ๆ กับสารกักกระจายฟองอากาศ จะทำให้เกิดฟองอากาศในลักษณะเดียวกับการตีไข่ขาว โดยที่ไม่มีความเร็วมาก ๆ นั้น จะทำให้เกิดค่าแรงเฉือนในระหว่างที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ ในบางครั้งการผสมจะใช้เครื่องมือผสมที่ใบพัดหมุนในแนวราบ (Horizontal Propeller-Type Mixes) และภายในเครื่องยังประกอบไปด้วยลวดตะแกรงยาง 3/4 นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 55-60 รอบต่อนาที

3) Preformed Foam Method ฟองอากาศที่ได้จากวิธีนี้โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับสารกระตุ้นพวกโปรตีน ซึ่งไม่มีพวกแป้งและน้ำตาลผสมอยู่หรือสารเคมีอื่น ๆ วิธีการที่ทำให้เกิดฟองได้หลายวิธี เช่น ให้ความดันสูงในถังผลิตฟองโฟม สำหรับคอนกรีตพูนที่ได้จากวิธี Preformed Form Method ทำโดยการทำฟองอากาศขึ้นมาก่อนแล้วจึงนำฟองอากาศไปผสมกับมอร์ตาร์ จะได้คอนกรีตพูนขึ้นมา เรียกคอนกรีตพูนชนิดนี้ว่า โฟมคอนกรีต (Foam Concrete) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC)

สำหรับสารเคมีและสารผสมเพิ่มอาจใช้สารประเภท อลูมิเนียมซิลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมหรือโพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซดาไฟ ซึ่งจะใช้ผสมในคอนกรีตประมาณร้อยละ 0.1-3 ต่อน้ำหนักของซีเมนต์ หรืออาจใช้สารที่ทำให้เกิดฟองโดยการกระตุ้นสารดังกล่าวด้วยแรงดันลมในภาชนะทนแรงดัน หรือการใช้เครื่องผสมผสมสารนี้กับน้ำแล้วตีให้เกิดฟองที่มีเนื้อละเอียดก่อนจึงนำไปผสมในคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ เช่น การหดตัวเมื่อแห้ง ความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดและการนำความร้อน แสดงดังตารางที่ 2.3 ถึง 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ค่าการเป็นตัวนำความร้อนของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ

วัสดุ (Material)	ความหนาแน่นของคอนกรีต (Dry density of concrete), (kg/m <sup>3</sup> )	การเป็นตัวนำความร้อน (Thermal Conductivity), (Watt/m °C)
Aerated concrete	400-800	0.08-0.20
Lightweight aggregate Concrete, Expanded vermiculite and perlite	400-1,120	0.11-0.29
Pumice	720-1,280	0.14-0.36
Foamed slag	960-1,520	0.22-0.48
Expanded clay or shale	960-1,200	0.33-0.46
Clinker	1,040-1,520	0.35-0.58
Dense concrete	2,320	1.2-1.7

ที่มา: นระ คมนามูล (2547)

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดลูกบาศก์ของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ

ชนิดของคอนกรีต	มวลรวม	ความหนาแน่นของมวลรวม (kg/m <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นของคอนกรีต (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังรับแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน (kg/cm <sup>2</sup> )
คอนกรีตฟองอากาศ (Aerated Concrete)			400-800	14-49
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาอัดแน่นบางส่วน (Partially Compacted lightweight aggregate concrete)	Expanded vermiculite and perlite	64-240	400-1,120	50-35
	Pumice	320-880	720-1,120	14-49
	Foamed slag	480-960	960-1,520	14-56
	Sintered pulverized-fuel ash	640-960	1,120-1,280	28-70
	Expanded clay or shale	560-1,040	960-1,200	56-84
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (No-fines concrete)	Clinker	720-1,040	1,040-1,520	21-70
	Natural aggregate	1,360-1,600	1,600-1,920	42-140
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับโครงสร้าง (Structural Lightweight aggregate concrete)	Lightweight aggregate	480-1,040	880-1,200	28-70
	Pumice	480-880	1,040-1,600	105-210
	Foamed slag	480-960	1,680-2,080*	105-420
	Sintered pulverized-fuel ash	640-960	1,360-1,760*	140-420
คอนกรีตธรรมดา (Dense concrete)	Expanded clay or shale	560-1,040	1,360-1,840*	140-420
	Gravel	1,600	2,240	280

\*คอนกรีตเหล่านี้มีเนื้อแน่นโดยการใช้ทรายละเอียดแทนมวลรวมละเอียดน้ำหนักเบา

ที่มา: นระ คมนามูล (2547)

ตารางที่ 2.5 ค่าหดตัวเมื่อแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ

วัสดุ (Material)	การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage, %)
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (No-fines aggregate)	
Natural aggregate	0.018
Lightweight aggregate	0.025
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)	
Expanded vermiculite	0.25-0.35
Pumice	0.04-0.10
Foamed slag	0.03-0.07
Sintered pulverized-fuel ash	0.04-0.07
Expanded clay	0.04-0.07
Clinker	0.04-0.08
คอนกรีตฟองอากาศ (Aerated concrete)	
Precast	0.05
In-situ	0.5
คอนกรีตธรรมดา	
Dense gavel concrete	0.035

ที่มา: นระ คมนามูล (2547)

## 2.2 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลูล่า

ชยันต์ เจริญพร และสุเชษฐ์ เอี่ยมเซย (2542) คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลูล่า (Cellular Lightweight Concrete; CLC) คือคอนกรีตที่ผลิตโดยการสร้างโฟมเหลวที่มีฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายตัวในเนื้อโฟมอย่างสม่ำเสมอ ผลิตโดยการผสมน้ำยาโฟมกับน้ำในอัตราส่วนที่ผู้ผลิตกำหนด แล้วเทลงในเครื่องผลิตฟองโฟม โดยอาศัยการอัดอากาศของปั๊มเพื่อดันอากาศกับสารผลิตโฟมเหลวซึ่งจะได้โฟมเหลว (Prefoamed Foam) จากนั้นฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ตาร์ เพื่อให้ฟองอากาศเข้าไปแทรกตัวตามเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้จะมีรูพรุนและมีน้ำหนักเบา โดยส่วนประกอบและคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลูล่าสามารถแยกได้สองส่วนคือ

### 2.2.1 เนื้อฟองอากาศ (Foam)

เป็นฟองอากาศที่กระจายอยู่สม่ำเสมอและคงตัว โดยขนาดและการกระจายของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจะเป็นตัวบ่งชี้คุณลักษณะด้านฉนวน เช่น เมื่อฟองอากาศที่ใช้มากและมีขนาดเล็กอาจทำให้คุณสมบัติการดูดซึมน้ำดีขึ้นเนื่องจากมีฟองอากาศขนาดเล็ก แต่อาจทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตต่ำลงแต่กำลังของคอนกรีตก็จะลดตามลงไปด้วย อีกทั้งการหดตัวก็จะมากขึ้น

ตามจำนวนฟองอากาศที่ใช้ แต่คุณสมบัติทางด้านนำความร้อนจะต่ำลงด้วยเนื่องจากมีฟองอากาศจำนวนมาก ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศ คือ

2.2.1.1 เวลาในการผสม (Mixing Time) การสั่นสะเทือนจะมีผลต่อปริมาณฟองอากาศที่ลดลง

2.2.1.2 การสั่นสะเทือน (Vibration) การสั่นสะเทือนจะมีผลต่อปริมาณฟองอากาศเพียงเล็กน้อย แต่การสั่นสะเทือนมากจะทำให้ฟองอากาศลอยขึ้นด้านบนและส่วนหนักจมสู่ด้านล่าง ทำให้เนื้อคอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอทั้งก้อน

2.2.1.3 สารผสม (Admixture) ความคงตัวและปริมาณฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาที่ใช้ น้ำยาบางชนิดจะเกิดฟองได้ง่ายและมีปริมาณมาก และฟองที่ได้มีความคงตัว (Stable) ส่วนสปูหรือสารสำหรับล้างต่างๆ เช่น ผงซักฟอกนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตฟองอากาศ

## 2.2.2 ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) หรือ มอร์ตาร์ (Mortar)

ปกติจะใช้เฉพาะซีเมนต์เพสต์ในการทำโฟมคอนกรีตเพราะจะมีกำลังรับแรงอัดและการยึดเกาะดีกว่ามอร์ตาร์ แต่การเพิ่มทรายในส่วนผสมจะช่วยลดการยุบตัวลง (Shrinkage) โดยการลดฟองอากาศลงและเพิ่มจำนวนทรายเข้าไป อย่างไรก็ตาม ไม่มีวิธีการในการผสมและน้ำยาชนิดใดจะผสมและทำให้โฟมคอนกรีตมีเนื้อเดียวกันและสม่ำเสมอ ตลอดจนมีคุณสมบัติสม่ำเสมอทั้งก้อน (ในแนวตั้ง) ทั้งนี้เนื่องจากฟองอากาศที่ใช้ผสมจะลอยขึ้นสู่ด้านบนและวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่าจะจมอยู่ด้านล่าง ทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตหรือโครงสร้างที่ใช้งานจะเปราะบางและมีความแข็งแรงลดลง

## 2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

คุณสมบัติทางด้านกำลังของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานทางด้านโครงสร้าง ซึ่งได้แก่

### 2.3.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

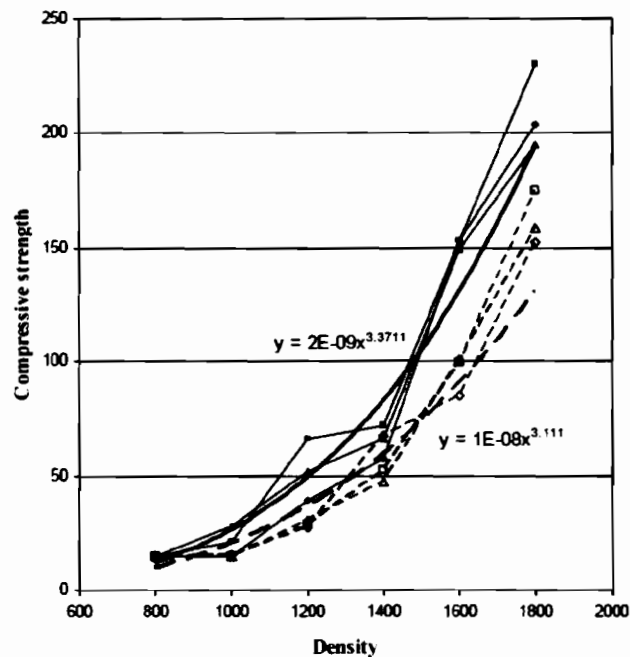
ขนาดและรูปร่างของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต โครงสร้างของฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ทิศทางของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ อายุของคอนกรีต ปริมาณน้ำในส่วนผสม ลักษณะของส่วนผสมที่ใช้ และวิธีการบ่มมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของคอนกรีตของคอนกรีต

ชยันต์ เจริญพร และสุเชษฐ์ เอี่ยมเขย (2542) พบว่าปริมาณ ขนาด และการกระจายตัวของฟองอากาศจะมีผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ในคอนกรีตที่มีการกระจายของขนาดฟองอากาศในช่วงแคบ ๆ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูง ขณะที่คอนกรีตที่มีปริมาณโฟมในส่วนผสมมาก จะมีการรวมตัวของฟองทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ และมีการกระจายของขนาดของฟองอากาศในช่วงกว้าง ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ต่ำ

นัฐฉมิ ทิพย์โยธา และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ความหนาแน่น 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 15-230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจากการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถพัฒนา กำลังได้ถึง 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาพิจารณากับการพิจารณาออกแบบของ



คอนกรีตปกติแล้ว คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดมีความเหมาะสมในการนำมาพิจารณาออกแบบงานโครงสร้างได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่น ได้แสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์เส้นแนวโน้มระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความหนาแน่นที่ S:C เท่ากับ 1:1 และ 2:1

ที่มา: นัฐวดี ทิพย์โยธา และคณะ (2551)

อิทธิเชษฐ อุตะธีรวิชญ์ (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติสำหรับการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ความหนาแน่นระหว่าง 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะแปรผกผันกับปริมาณทราย คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลน้อยต่อกำลังรับแรงอัด ขณะที่ ปภาวิน สินรัมย์ (2555) ได้ทดสอบตัวอย่างที่มีเงื่อนไขครอบคลุมในเรื่องเดียวกันนี้ ได้ให้เหตุผลว่ากำลังรับแรงอัดสูงต้องใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1,400-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Hamidah and et al. (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมทรายต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันโดยศึกษาที่ความหนาแน่นระหว่าง 1,300-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าอัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำลง และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำสามารถทำให้เพิ่มขึ้นให้เท่ากับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่าโดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์

### 2.3.2 กำลังรับแรงดึง (Tensile strength)

แก้วตา ดิยง และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสามลักษณะ คือทดสอบกำลังรับแรงดึงโดยตรง กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสการแตกร้าว ที่ความหนาแน่นระหว่าง 800-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน มีค่าประมาณ 1-23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าประมาณ 3-16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และโมดูลัสการแตกร้าวมีค่าประมาณ 1-19 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และยังพบว่ากำลังรับแรงดึงแปรผันโดยตรงกับค่าความหนาแน่น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะไม่เชิงเส้น และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง ค่ากำลังรับแรงดึงผ่าซีกและค่าโมดูลัสแตกร้าว จากผลการทดสอบที่มีเงื่อนไขครอบคลุมในเรื่องเดียวกันนี้ ธนกร ทวีวุฒิ และคณะ (2552) ได้ให้เหตุผลว่ากำลังรับแรงดึงแยกและค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต มีลักษณะแปรผันตามหน่วยน้ำหนักและอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงแยกและโมดูลัสแตกร้าวมากนัก และพบว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์น้อยจะให้ค่ากำลังรับแรงดึงแยกสูง

### 2.3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

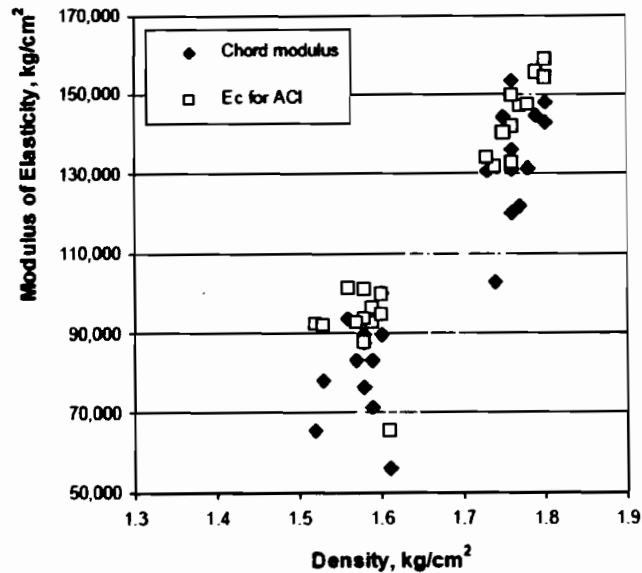
นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1,600 และ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทำการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI มีค่าแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดสอบสูงสุดร้อยละ 29.02 โดยมีสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบ (Chord Modulus) ต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจาก ACI ที่ความหนาแน่น 1,600 และ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 0.71-0.96 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.85-1.03 ที่อายุ 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะแสดงในภาพที่ 2.2

### 2.3.4 กำลังต้านทานแรงเฉือน

กิตติธัช หมูทอง และคณะ (2554) คานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมีค่ากำลังรับแรงเฉือนขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งคานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็ก ที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณเหล็กตามยาวร้อยละ 0.2-1 มีค่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสน้อยกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากเป็นคอนกรีตปราศจากมวลรวมหยาบ และคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสามารถมีกำลังรับแรงเฉือนร่วมกับเหล็กปลอกได้แต่ไม่ครอบคลุมถึงปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ได้ทดสอบ

### 2.3.5 กำลังต้านทานโมเมนต์คด

นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ (2552) คานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็ก ที่ความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 มีกำลังรับแรงอัด 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถใช้ทฤษฎีการออกแบบโดยวิธีกำลังตามมาตรฐาน ACI ออกแบบคานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเสริมเหล็กเพื่อต้านโมเมนต์คดได้อย่างปลอดภัย



ภาพที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบ (chord modulus) กับค่าจากการคำนวณตามมาตรฐาน ACI ที่อายุ 28 และ 56 วัน  
ที่มา: นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ (2553)

## 2.4 ฟองอากาศ

Ramamurthy and et al. (2009) วิธีการผลิตฟองอากาศหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าฟองโฟมมีสองวิธี คือวิธีผลิตก่อนเกิดฟอง (Pre-foaming) เป็นการฉีดพ่นน้ำยาผลิตฟองโฟมเข้าไปพร้อมกับการผสมมอร์ตาร์ ซึ่งโฟมที่ผลิตโดยวิธีนี้จำเป็นต้องมีความคงรูปและมีเสถียรภาพ เพื่อต้านแรงกดของปูนซีเมนต์จนกว่าคอนกรีตจะเริ่มการก่อตัว และการก่อตัวแข็งตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นรอบช่องว่างที่เต็มไปด้วยอากาศ ขนาดของฟองอากาศจะมีขนาด 2-5 มิลลิเมตร มีเสถียรภาพน้อย ส่วนวิธีผสมฟองโฟม (mixed foaming) คือการผลิตฟองโฟมขึ้นมาก่อน แล้วค่อยเติมลงไปหลังจากที่ผสมมอร์ตาร์แล้ว โดยการฉีดพ่น ซึ่งอาศัยแรงดันอากาศจากถังแรงดัน เพื่อฉีดอากาศและน้ำยาผลิตฟองอากาศให้ออกมาพร้อมกันผ่านหัวฉีด ซึ่งวิธีนี้จะควบคุมปริมาณการใช้ฟองอากาศพร้อมทั้งควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และมีเสถียรภาพมาก น้ำยาผลิตฟองโฟมซิกาโปโร-40 (Sikaporo-40) เป็นสารกักกระจายฟองอากาศประเภทหนึ่ง ที่ดัดแปลงมาจากสารลดแรงตึงผิวจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ ซึ่งเมื่อนำมาผ่านกระบวนการผลิตฟองโฟมแล้ว เนื้อโฟมที่ได้มีความละเอียด ฟองอากาศมีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (ภาพที่ 2.3) ทำให้มีปริมาณของฟองอากาศมาก และเมื่อนำมาผสมกับมอร์ตาร์ ฟองอากาศเล็กๆ นี้ก็จะเข้าไปแทนที่ช่องว่างของคอนกรีตมวลเบาได้ดี ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าดีขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของซิกาโปโร-40 มีรายละเอียดดังนี้ (ตารางที่ 2.6)



ภาพที่ 2.3 ฟองโฟมที่ผลิตจากน้ำยาผลิตฟองโฟมซิก้าโปโร-40 (Sikaporo-40)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของซิก้าโปโร-40 (Sikaporo-40)

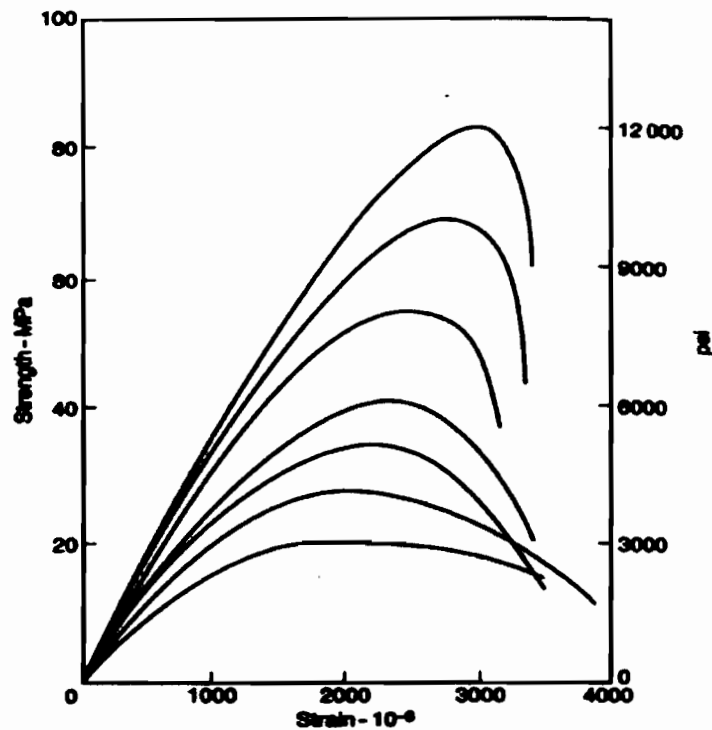
คุณสมบัติของน้ำยาผลิตฟองโฟมซิก้าโปโร-40 (Sikaporo-40)	
สี	ใส ไม่มีสี
ความถ่วงจำเพาะ	1.05
จุดเยือกแข็ง	ที่ -1 องศาเซลเซียส
การเก็บรักษา	ที่ร่ม หลีกเลียะแสงแดดโดยตรง อุณหภูมิ 5-25 องศาเซลเซียส
อายุการใช้งาน	1 ปี ในภาชนะปิดสนิท ในสภาวะอากาศแห้ง
อัตราส่วนการใช้น้ำยาโฟมต่อน้ำ	1:50

## 2.5 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติ

วินิต ซอวีเชียร (2550) กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่เป็นตัวบอกให้ทราบถึงคุณสมบัติอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี เพราะค่ากำลังต้านทานหรือรับแรงแบบอื่นเป็นส่วนส่วนกับกำลังต้านทานแรงอัด ด้วยเหตุที่คอนกรีตมีกำลังต้านทานต่อแรงอัดมากกว่ากำลังต้านทานต่อแรงดึงหลายเท่า ดังนั้นในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงออกแบบโดยให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดเพียงอย่างเดียว ส่วนแรงดึงที่เกิดขึ้นให้เหล็กเสริมซึ่งหล่ออยู่ในคอนกรีตทำหน้าที่ต้านทาน การทดสอบหาลำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตนิยมปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบตามมาตรฐานอย่างช้า ๆ ด้วยเครื่องทดสอบ และอาจทำการวัดหาการเสียรูปหรือการหดตัวตามแนวแกนด้วย จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก (ภายในช่วงเวลาประมาณ 2-3 นาที) ลักษณะการวิบัติของแท่งคอนกรีต อาจเป็นแบบที่แยกออกตามแนวยาวหรือเฉียงเอียงทำมุมประมาณ  $45 \pm 15$  องศา หรือทั้งสองแบบรวมกัน เมื่อหารน้ำหนักกดสูงสุดด้วยพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรงกระทำ จะได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตนั้น ก่อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ใช้อย่างแพร่หลายมีสองรูปทรง คือ (1) รูปทรงกระบอกเป็นการทดสอบตาม

มาตรฐานอเมริกาขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร (2) รูปทรงลูกบาศก์เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษขนาดที่ใช้คือขนาด 15x15x15 เซนติเมตร

ปัจจัยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ขึ้นกับอัตราส่วนผสม ปริมาณน้ำ อายุของแท่งทดสอบ การบ่ม ตลอดจนรูปร่างและขนาดของแท่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะน้อยลงเมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานอยู่ประมาณร้อยละ 13 และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน จะน้อยกว่าที่อายุ 28 วันอยู่ประมาณร้อยละ 25 กำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้ต่อเมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $f_c'$  ที่กำหนด โดยที่กำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง (แท่งทดสอบ 2 แท่ง) อาจให้ค่าต่ำกว่า  $f_c'$  ได้ไม่เกิน 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต แสดงได้ดังภาพที่ 2.4

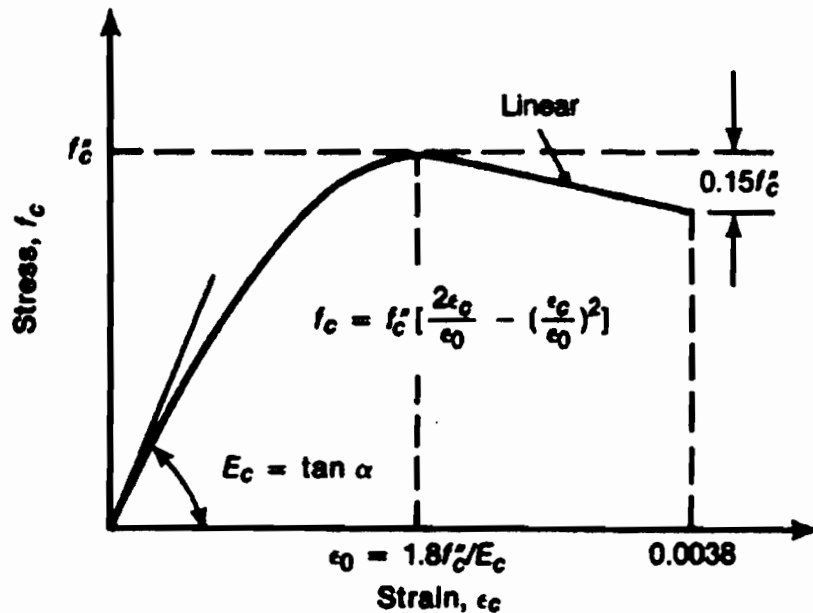


ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต  
ที่มา: Neville (1998)

## 2.6 ความเค้น-ความเครียดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติ

สถาพร โภคา (2546) โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งบอกความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุ คือ ความลาดชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ความสัมพันธ์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชั้นคุณภาพของคอนกรีต  $f_c'$  ทุกเส้นความสัมพันธ์แทบไม่ปรากฏส่วนใดที่เป็นเส้นตรง ณ ตำแหน่งที่มีกำลังอัดสูงสุด (Characteristic strength,  $f_{cu}$ ) ของคอนกรีตทุกชั้นคุณภาพสอดคล้องกับ

ความเครียดประมาณ 0.002 ณ จุดแตกหัก (Rupture strength,  $f_{ult}$ ) ค่าความเครียดจะแปรผันระหว่าง 0.003-0.004 เว้นแต่ในกรณีพิเศษค่าความเครียดอาจสูงถึง 0.008 (ACI R10.2.3; 1995) ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ภายใต้การดัดขององค์อาคารรับแรงดัด (Flexural Member) จึงกำหนดค่าความเครียดของคอนกรีต ณ ฝักรับแรงอัดที่ 0.003 (ว.ส.ท. 2534; ACI 10.2.3) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในภาพที่ 2.5

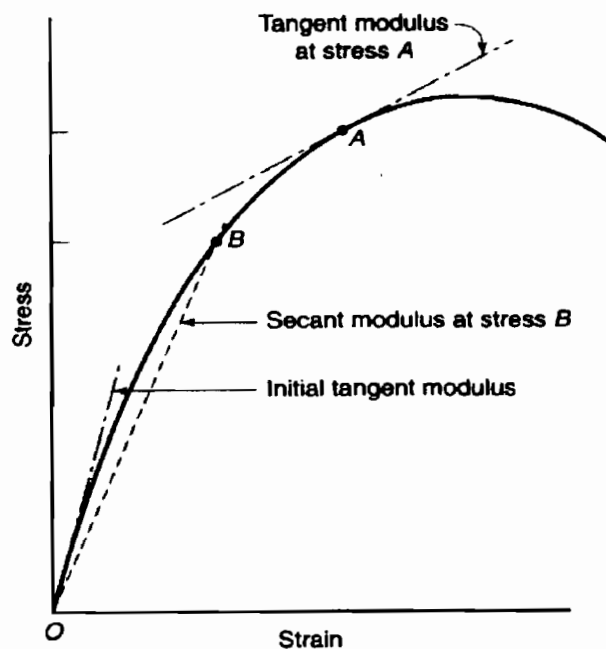


ภาพที่ 2.5 ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตของ Hognestad  
ที่มา: Park and Paulay (1974)

ในระหว่างการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด ถ้าหากกำลังรับแรงอัดไม่เกินร้อยละ 30 ของกำลังอัดประลัย ( $f_c \leq 0.30 \cdot f'_c$ ) รอยแตกเล็ก ๆ (Micro cracks) ที่ปรากฏในคอนกรีตก่อนการทดสอบ (ที่มีอยู่เดิม) ยังคงสภาพและไม่เกิดการขยายตัว ที่กำลังอัดระหว่างร้อยละ 30-50 ของกำลังอัดประลัย ( $0.30 \cdot f'_c < f_c \leq 0.50 \cdot f'_c$ ) จะเกิดรอยแตกที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวในเนื้อคอนกรีต (Bond cracks) เนื่องจากความเค้นที่สูงขึ้นทำให้ความเครียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดที่บริเวณปลายรอยแตกเล็ก ๆ (Crack tip) ที่มีอยู่เดิม รอยแตกจะขยายและมีความยาวเพิ่มขึ้น แม้ว่าอัตราความเค้นจะไม่เพิ่มขึ้นก็ตาม ที่กำลังอัดระหว่างร้อยละ 50-75 ของกำลังอัดประลัย ( $0.50 \cdot f'_c < f_c \leq 0.75 \cdot f'_c$ ) Bond cracks รอยแตกยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องและเกิดรอยแตกในมอร์ตาร์ แม้อัตราความเค้นจะไม่เพิ่มขึ้น แต่รอยแตกจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราที่ช้าลง และที่ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของกำลังอัดประลัย ( $f_c > 0.75 \cdot f'_c$ ) รอยแตกของคอนกรีตขยายตัวจนไม่เสถียร ความเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนวิบัติซึ่งเป็นจุดที่คอนกรีตถูกกดหรือบดอัดจนแตก (Crush failure)

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะจึงไม่ปรากฏจุดคราก (Yield Point) ดังนั้นผลทดสอบที่ได้คือกำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) เมื่อพิจารณาจากเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้วิธี คือ (1) วิธี Initial Tangent

Modulus (เส้นสัมผัสลากจากจุดเริ่มต้น) (2) วิธี Tangent Modulus (เส้นสัมผัสจุดใด ๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด) (3) วิธี Secant Modulus (เส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปตัดเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ณ จุดใด ๆ) และวิธี (4) วิธี Chord Modulus (เส้นตรงที่ลากระหว่างสองจุดใด ๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด หรือเส้นตรงที่ลากจากจุดที่เป็นค่าของ Secant Modulus จนถึงจุดที่เป็นค่าของ Tangent Modulus) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตบนเส้นความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด โดยวิธีต่าง ๆ

ที่มา: Wight and McGregor (2012)

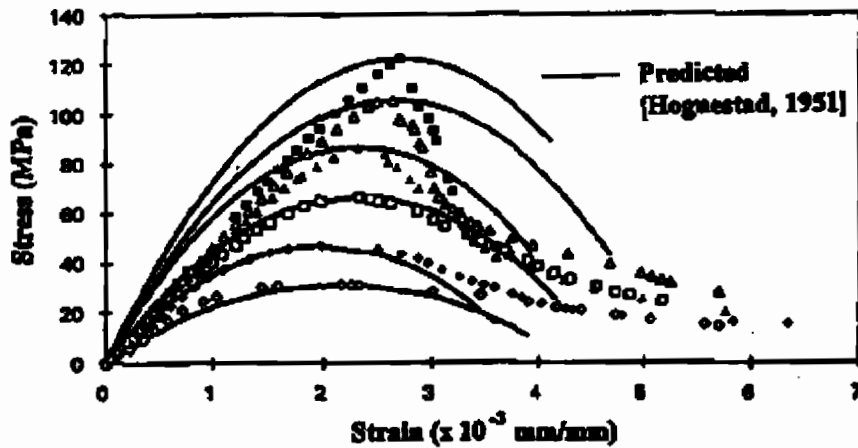
การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจากกำลังอัดประลัยตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น ว.ส.ท. 4105(ก) และ ACI 8.5.1;1995 ค่าโมดูลัสที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีของ Secant Modulus ณ ตำแหน่งที่คอนกรีตมีกำลังอัดประมาณร้อยละ 45 (หรือระหว่างร้อยละ 45-50) ของกำลังอัดประลัย ( $f_c = 0.45 \cdot f'_c$  or  $0.45 \cdot f'_c - 0.50 \cdot f'_c$ ) ในงานโครงสร้างพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง มีค่ามากกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากคอนกรีตกำลังสูงมีซีเมนต์เพสต์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าและมีกำลังยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมมากกว่า

Wee and et al. (1996) สำหรับการออกแบบในการใช้งานจริงเพื่อลดความยุ่งยากของรูปแบบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต เช่น การประมาณเส้นโค้งให้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนของโครงสร้าง เส้นโค้งเสมือนจริงของความเค้น-ความเครียดที่จำเป็นสำหรับคอนกรีตรับแรงอัด มีตัวแปรหลักของเส้นโค้งเหล่านี้คือ เส้นสัมผัสที่ลากจากจุดเริ่มต้น ความเครียดที่ค่าความเค้นสูงสุด และรูปร่างของเส้นที่ลดลง (หลังจากจุดที่เกิดความเค้น-ความเครียดสูงสุด) ซึ่งจะเป็นความลาด

ชั้นของคอนกรีตกำลังสูง (มีความเปราะ) เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ได้รับการแนะนำเพื่อนำไปวิเคราะห์ชิ้นส่วนภายใต้แรงดัดร่วมและแรงตามแกน สามารถสรุปรูปแบบการทำนายความเค้นและความเครียดชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 2.6.1 แบบทำนายของ Hognestad

สมการที่นำเสนอโดย Hognestad เป็นสมการพาราโบลากำลังสอง (ภาพที่ 2.7) ดังนี้



ภาพที่ 2.7 ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Hognestad  
ที่มา: Wee and et al. (1996)

$$f_c = f'_c \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต  
 $f'_c$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต  
 $\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต  
 $\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

การทำนายของสมการ (2.1) เป็นการทำนายเส้นโค้งที่ได้รับการทดลอง  $\epsilon_0$  สำหรับตัวอย่างแต่ละตัวอย่างแทนที่ด้วยค่าคงที่ 0.002 ซึ่งให้ค่าการทำนายที่ดีสำหรับเส้นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและเส้นแนวโน้มที่ลดลง โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 60 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่านี้ สมการนี้ไม่สามารถใช้งานได้

### 2.6.2 แบบทำนายของ Wang and et al.

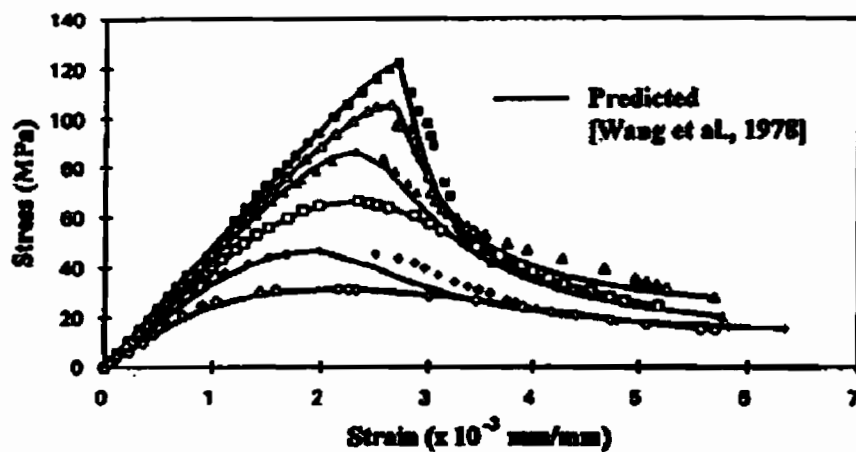
มีสมการทำนายความเค้นและความเครียดดังแสดงต่อไปนี้



$$f_c = f_c' \cdot \left[ \frac{A \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) + B \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2}{1 + C \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) + D \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2} \right] \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต  
 $f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต  
 $\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต  
 $\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด  
A, B, C, D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้อง

จากสมการ (2.2) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สองชุดเพื่อสร้างเส้นโค้งที่สมบูรณ์ ชุดแรกสำหรับเส้นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (ช่วงที่คอนกรีตเริ่มรับกำลังจนถึงค่ากำลังสูงสุด) และอีกชุดใช้สำหรับเส้นแนวโน้มที่ลดลง (ช่วงที่คอนกรีตรับกำลังสูงสุดจนถึงจุดวิบัติของคอนกรีต) ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องได้มาจากขอบเขตเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องที่กำหนดให้เป็นส่วนหนึ่งของเส้นโค้งแต่ละส่วน การเปรียบเทียบการทดลองกับสมการ (2.2) ให้ค่าการทำนายที่ติดตลอดช่วงทั้งหมดในเส้นโค้ง (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Wang and et al.  
ที่มา: Wee et al. (1996)

### 2.6.3 แบบทำนายของ CEB

แบบทำนายของ CEB ได้นำเสนอสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด สำหรับสองช่วงของความเครียดคอนกรีต สำหรับช่วง  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{max}$  เมื่อ  $\epsilon_{max}$  เป็น

ความเครียดของคอนกรีตเมื่อกำลังคอนกรีตที่ค่าเท่ากับ  $0.5 \cdot f_c'$  ในส่วนของเส้นแนวโน้มที่ลดลงของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด

$$f_c = f_c' \cdot \left[ \frac{\left( \frac{E_{it}}{E_c} \right) \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2}{1 + \left( \frac{E_{it}}{E_c} - 2 \right) \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_0 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{it}}{E_c} + 1 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{it}}{E_c} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2}} \right] \quad (2.4)$$

และสำหรับ  $\epsilon > \epsilon_{\max}$

$$f_c = \frac{f_c'}{\left[ \frac{1}{\left( \epsilon_{\max}/\epsilon_0 \right)} \cdot \xi - \frac{2}{\left( \epsilon_{\max}/\epsilon_0 \right)^2} \right] \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 + \left[ \frac{4}{\left( \epsilon_{\max}/\epsilon_0 \right)} - \xi \right] \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\xi = - \frac{4 \cdot \left[ \left( \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left( \frac{E_{it}}{E_c} - 2 \right) + 2 \cdot \left( \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_0} \right) - \frac{E_{it}}{E_c} \right]}{\left[ \left( \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_0} \right) \cdot \left( \frac{E_{it}}{E_c} - 2 \right) + 1 \right]^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

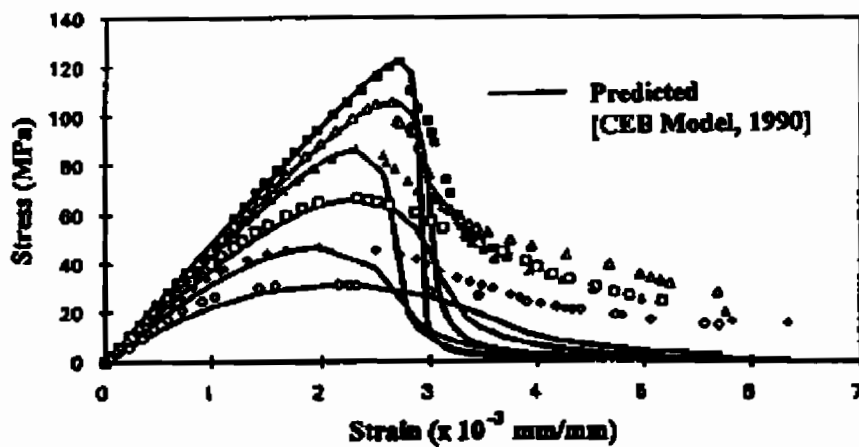
$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

$E_c$  คือ Secant modulus of elasticity at  $0.40 \cdot f'_c$

$E_{it}$  คือ Initial tangent modulus

สังเกตเห็นว่าการลดลงของ  $\epsilon_0$  ไม่คงที่ตลอดระยะการเพิ่มขึ้นของกำลังคอนกรีตที่สมมติขึ้นในแบบจำลอง และที่ ( $E_{it}$ ) เป็นตัวแทนที่ดีในการแสดงค่า  $E_{it} = 10,300 \cdot (f'_c)^{0.3}$  ที่นำเสนอการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองค่าในสมการ (2.3) ถึง (2.6) ในการจำลองเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตกำลังสูงถึง 116 เมกะปาสกาล

การทำนายของแบบจำลอง CEB มีความลาดชันเกินไปในส่วนที่ลดลงจากจุดสูงสุดของเส้นโค้งสำหรับคอนกรีตกำลังสูง (ภาพที่ 2.9)



ภาพที่ 2.9 ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ CEB  
ที่มา: Wee and et al. (1996)

#### 2.6.4 แบบทำนายของ Carreira and Chu

รูปแบบการทำนายของ Carreira and Chu เป็นเส้นโค้งคดเคี้ยวทั่วไปที่แสดงได้ดังนี้

$$f_c = f'_c \cdot \left[ \frac{\beta \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) \cdot \beta} \right] \quad (2.7)$$

และ

$$\beta = \frac{1}{1 - \left( \frac{f_c'}{\epsilon_0 \cdot E_{it}} \right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

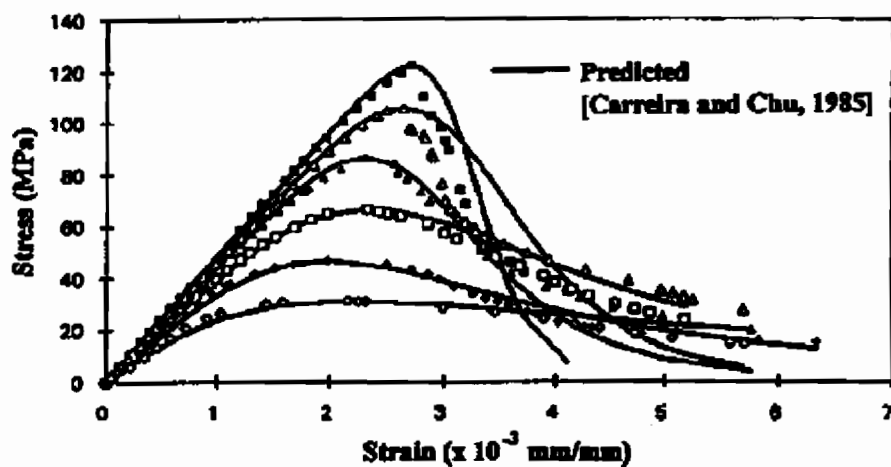
$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

$E_{it}$  คือ Initial tangent modulus

$\beta$  คือ ตัวแปรของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของแผนภาพความเค้น-ความเครียด

การทำนายเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดโดยใช้สมการที่ (2.7) ให้การทำนายที่ดีพอสมควรสำหรับเส้นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (ก่อนถึงจุดสูงสุด) ส่วนเส้นแนวโน้มที่ลดลง (หลังจากจุดสูงสุด) การทำนายเส้นโค้งมีความเบี่ยงเบนและเป็นช่วงกว้าง (ภาพที่ 2.10) ทำให้ไม่สามารถเป็นตัวแทนอย่างเพียงพอของกำลังส่วนที่เหลือที่ความเครียดสูง ๆ สำหรับคอนกรีตกำลังสูง



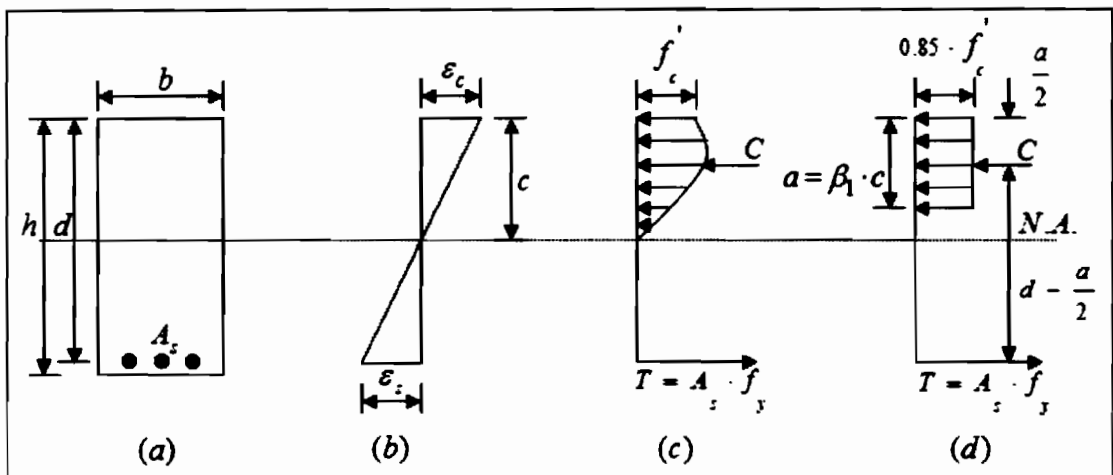
ภาพที่ 2.10 ผลการทำนายความเค้น-ความเครียดของ Carreira and Chu  
ที่มา: Wee and et al. (1996)

## 2.7 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคอนกรีตเสริมเหล็ก

สถาพร โภคา (2546) การดัดของชิ้นส่วนคานเป็นผลมาจากความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดัดขึ้นในคานหรือ การดัดเกิดจากความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดคาน มักเรียกว่าการกระจายความเค้นและความเครียด ความเค้น (หน่วยแรง)

อาจเป็นหน่วยแรงอัดหรือดึง และความเครียดอาจเป็นความเครียดซึ่งมีแนวโน้มทำให้องค์อาคารหดสั้นลงหรือยืดออก

วีระ หอสกุลไท (2544) นำหนักบรรทุกภายนอกที่กระทำกับคานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเครียดและการเสียรูปของคานเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ทำให้เกิดพิกัดแตกร้าวเนื่องจากการดัด (Flexural crack) เกิดขึ้นทั่วไปตามช่วงความยาวของคาน ถ้าน้ำหนักบรรทุกยังเพิ่มต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับหนึ่งที่เกินขีดความสามารถที่ขึ้นส่วนของโครงสร้างจะรับได้ก็จะทำให้เกิดการวิบัติเกิดขึ้น ซึ่งขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ขึ้นส่วนของคานวิบัติ เรียกว่า ขีดจำกัดของการวิบัติเนื่องจากการดัด (Limit state of failure in flexure) การใช้การกระจายหน่วยแรงอัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สมมูล (Whitney equivalent rectangular stress block) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 แทนการกระจายหน่วยแรงอัดรูปพาราโบลา โดยกำหนดให้มีค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ  $0.85 \cdot f'_c$  กระจายสมำเสมอตามความลึกของคานเป็นระยะทาง  $a$  จุดศูนย์กลางของการกระจายหน่วยแรงอัดยังอยู่ที่ตำแหน่งเดิม และกำหนดให้  $a = \beta_1 \cdot c$  ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (d)

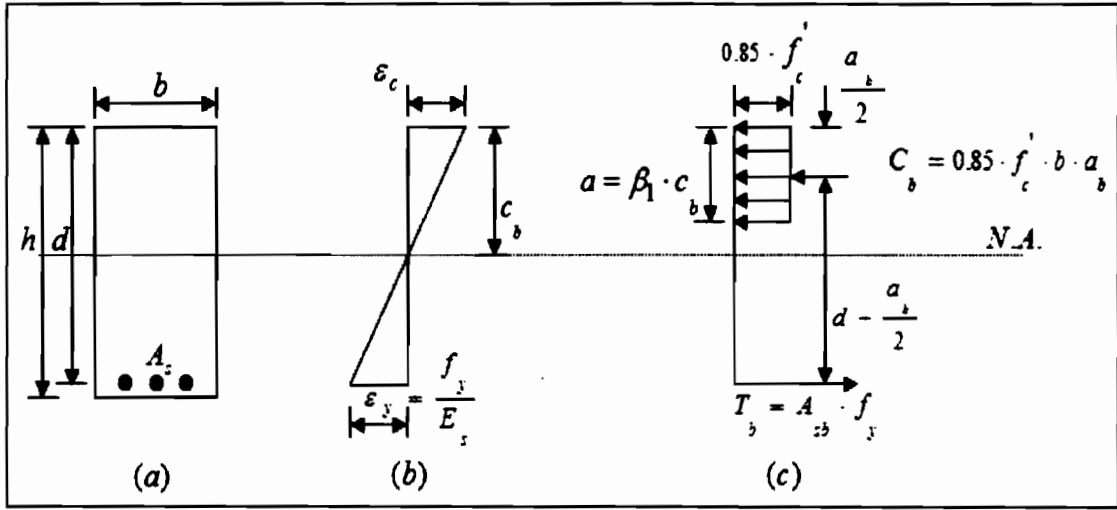


ภาพที่ 2.11 หน่วยแรงอัดสมมูลของ Whitney (a) หน้าตัดคาน, (b) ความเครียด, (c) รูปหน่วยแรงจริง, (d) รูปหน่วยแรงสมมูล  
ที่มา: วีระ หอสกุลไท (2544)

การวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง มาตรฐาน วสท. 1008-38 ข้อ 4302 ได้กำหนดความเครียดสูงสุดที่ขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.003 ซึ่งถือว่าหน้าตัดคานนั้นเกิดการวิบัติ โดยไม่คำนึงว่าเหล็กจะถึงกำลังครากหรือไม่ก็ตาม ดังนั้นการวิบัติของหน้าตัดคานจึงจำแนกตามความเครียดของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นจริง ณ สภาวะการวิบัติได้สามแบบ คือ (1) การวิบัติที่จุดสมดุล (Balanced section) (2) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (Under-reinforced section) และ (3) การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (Over-reinforced section)

2.7.1 การวิบัติที่จุดสมดุล (Balanced section)

การวิบัติของหน้าตัดคานที่จุดสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ( $\epsilon_c$ ) จะมีค่าเท่ากับ 0.003 และเหล็กเสริมจะมีหน่วยแรงถึงกำลังคราก ( $f_c$ ) พอดี ความเครียดของเหล็ก ณ จุดคราก ( $\epsilon_y$ ) มีค่าเท่ากับ  $f_y/E_s$  ดังแสดงในภาพที่ 2.12 สำหรับอัตราส่วนเหล็กเสริม ณ สภาวะสมดุล ( $\rho_b$ ) หาได้จากแผนภูมิการกระจายความเครียดขางความลึกของคาน ดังภาพที่ 2.12 (b)



ภาพที่ 2.12 หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ณ สภาวะสมดุล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง

ที่มา: วีระ หอสกุลโท (2544)

จากภาพที่ 2.12 (b) จากกฎสามเหลี่ยมคล้าย จะได้ว่า

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{E_s}} \tag{2.9}$$

ถ้า  $E_s = 2.04 \times 10^6$  ksc. จะได้

$$c_b = \left( \frac{6,120}{6,120 + f_y} \right) \cdot d \tag{2.10}$$

จาก  $a_b = \beta_1 \cdot c_b$  จะได้

$$a_b = \beta_1 \cdot \left( \frac{6,120}{6,120 + f_y} \right) \cdot d \quad (2.11)$$

จากภาพที่ 2.12 (c) ปริมาณเหล็กเสริมหาได้จากสมดุลของแรงตามแนวราบ  $C = T$  จะได้  
ว่า

$$0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b = A_{sb} \cdot f_y \quad (2.12)$$

หรือ

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{b \cdot d} = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot a_b}{f_y \cdot d} \quad (2.13)$$

นำสมการ (2.11) แทนลงในสมการ (2.13) จะได้

$$\rho_b = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \left( \frac{6,120}{6,120 + f_y} \right) \quad (2.14)$$

และสามารถหาค่าลึงโมเมนต์ดัดระบุ (Nominal moment strength) ได้จากโมเมนต์  
ของแรงคู่ควบ C-T โดยมีแขนของโมเมนต์ยาว  $d - \frac{a_b}{2}$  ดังนั้นจะได้

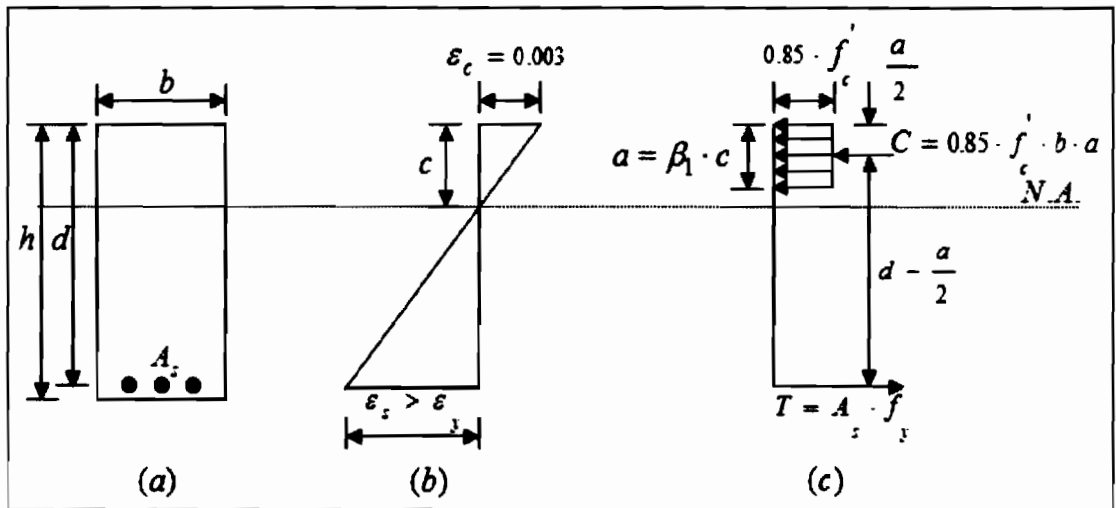
$$M_n = C \cdot \left( d - \frac{a_b}{2} \right) = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b \cdot \left( d - \frac{a_b}{2} \right) \quad (2.15)$$

หรือ

$$M_n = T \cdot \left( d - \frac{a_b}{2} \right) = A_{sb} \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a_b}{2} \right) \quad (2.16)$$

2.7.2 การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (Under-reinforced section)

การวิบัติของหน้าตัดคานเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ( $\epsilon_c$ ) มีค่าเท่ากับ 0.003 และก่อนการวิบัติความเครียดในเหล็กเสริมจะถึงความเครียดคราก แต่หน้าตัดคานยังไม่วิบัติสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีก ซึ่งจะทำให้เหล็กยึดตัวมากขึ้น คอนกรีตที่หุ้มเหล็กจะแตกร้าวที่ผิวนอกไปยังแกนสะเทินของคาน จนกระทั่งความเครียดของคอนกรีตถึงความเครียดประลัย ( $E_c = E_{cu} = 0.003$ ) หน้าตัดคานจึงจะวิบัติ ขณะวิบัติความเครียดในเหล็กจะมากกว่าความเครียดคราก ( $\epsilon_y$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ดังนั้นหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับกำลังคราก ( $f_y$ ) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักจะมีการเตือนก่อนการวิบัติ โดยจะสังเกตเห็นรอยร้าวของคอนกรีตด้านรับแรงดึง จะเกิดขึ้นในกรณีที่หน้าตัดคานเสริมเหล็กน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล ( $\rho < \rho_b$ )



ภาพที่ 2.13 หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง  
ที่มา: วีระ หอสกุลโท (2544)

จากสมดุลของแรง  $C = T$  จะได้ว่า

$$0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y \tag{2.17}$$

และ

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \tag{2.18}$$



ดังนั้น กำลังโมเมนต์ระบุ หาได้จาก

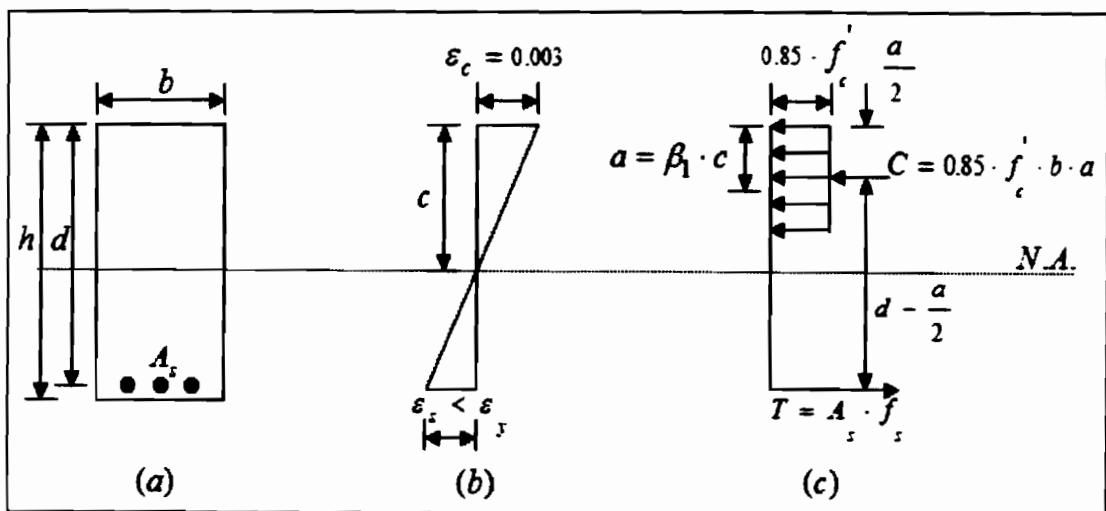
$$M_n = C \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.19)$$

หรือ

$$M_n = T \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = A_s \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.20)$$

### 2.7.3 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (Over-reinforced section)

การวิบัติของหน้าตัดคานเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ( $\epsilon_c$ ) มีค่าเท่ากับ 0.003 ขณะที่วิบัติความเครียดของเหล็กเสริมน้อยกว่าความเครียดคราก ดังนั้นหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม ( $f_s$ ) จะมิต้านน้อยกว่ากำลังคราก ( $f_y$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก ( $f_s = E_s \cdot \epsilon_s$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักจะไม่มีอาการเตือนก่อนการวิบัติ เนื่องจากการวิบัติเหล็กรับแรงดึงเกิดการยืดตัวน้อย ทำให้ไม่เกิดรอยร้าวของคอนกรีตด้านรับแรงดึงเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกหักด้านรับแรงอัดทำให้เกิดการวิบัติทันทีทันใด จะเกิดขึ้นในกรณีที่หน้าตัดคานเสริมเหล็กมากกว่าเกณฑ์สมดุล ( $\rho > \rho_b$ )



ภาพที่ 2.14 หน้าตัดคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กมากกว่าเกณฑ์สมดุล (a) หน้าตัดคาน (b) ความเครียด (c) หน่วยแรง  
ที่มา : วีระ หอสกุลโท (2544)

จากสมมูลของแรง  $C = T$  จะได้ว่า

$$0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y \quad (2.21)$$

จากภาพที่ 2.14 (b) อาศัยสามเหลี่ยมคล้ายจาก

$$\frac{\epsilon_s}{0.003} = \left( \frac{d-c}{c} \right) \quad (2.22)$$

จะได้ว่า

$$\epsilon_s = 0.003 \cdot \left( \frac{d-c}{c} \right) \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s = E_s \cdot \left[ 0.003 \cdot \left( \frac{d-c}{c} \right) \right] \quad (2.24)$$

แทนค่าสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.21) จะได้

$$0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = A_s \cdot E_s \cdot \left[ 0.003 \cdot \left( \frac{d-c}{c} \right) \right] \quad (2.25)$$

แก้สมการ (2.25) จะได้ค่า  $c$  นำค่า  $c$  แทนในสมการ (2.23) จะได้  $\epsilon_s$  และหาค่าลึงโมเมนต์ดัดระบุนหาได้จาก

$$M_n = C \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (2.26)$$

หรือ

$$M_n = T \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) = A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (2.27)$$

## 2.8 สรุป

สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านั้น ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยในเรื่องของความเค้น-ความเครียด และยังมีเอกสารอ้างอิงเป็นที่แน่ชัดเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ที่จะได้รับในการศึกษาในเรื่องนี้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ในแบบจำลองความเค้น-ความเครียดที่ได้ดัดแปลงมาจากแบบจำลองของคอนกรีตปกติ เพื่อนำไปพัฒนาใช้งานในงานโครงสร้างต่อไป

คุณสมบัติทางด้านความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่จะนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างใน rectangular stress block เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสำหรับการนำไปใช้งาน

สำหรับสมการทำนายพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า จะใช้สมการของ Hognestad ในการนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานกำลังสองที่ใช้สำหรับคอนกรีตทั่วไป

### บทที่ 3

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ อัตราส่วนผสม การคำนวณอัตราส่วนผสม การเตรียมตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ เพื่อทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดขนาด 2,000 กิโลนิวตัน และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้กล่าวถึงในลำดับต่อไป

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดสอบ

##### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

3.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

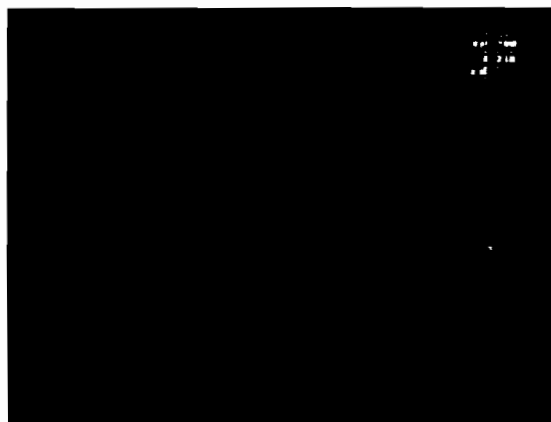
3.1.1.2 ทรายสะอาด ค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.28

3.1.1.3 น้ำสะอาด

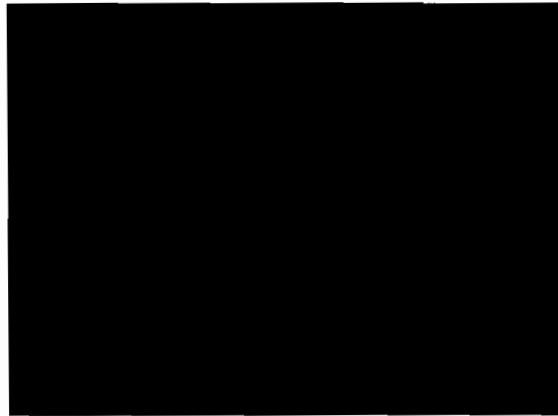
3.1.1.4 สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) ผลิตจากสารสังเคราะห์

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

3.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย โม่ผสมคอนกรีต แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก (cylinder) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และเครื่องผลิตโฟมเหลว (foam generator)



ภาพที่ 3.1 โม่ผสมคอนกรีต



ภาพที่ 3.2 เครื่องผลิตโฟมเหลว



ภาพที่ 3.3 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก

3.1.2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า ESH Testing Limited ดังภาพที่ 3.4 เป็นเครื่องทดสอบการกดแบบแรงกระทำ ต่อเนื่อง (quasi static compressive) พร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ผล มีความสามารถในการทำงานได้ถึง 2,000 กิโลนิวตัน และมีระยะกดมากที่สุด 200 มิลลิเมตร โดยมีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมผสมกับ ระบบไฮดรอลิก (hydraulic) สามารถบันทึกผลการทดสอบเป็นแรงกด (load) และระยะกด (displacement) ได้อย่างละเอียดทุก ๆ ระยะการกด 0.04 มิลลิเมตร โดยการทดสอบจะแสดงผลเป็น ตัวเลขและเขียนเป็นกราฟได้ทันทีผ่านระบบคอมพิวเตอร์



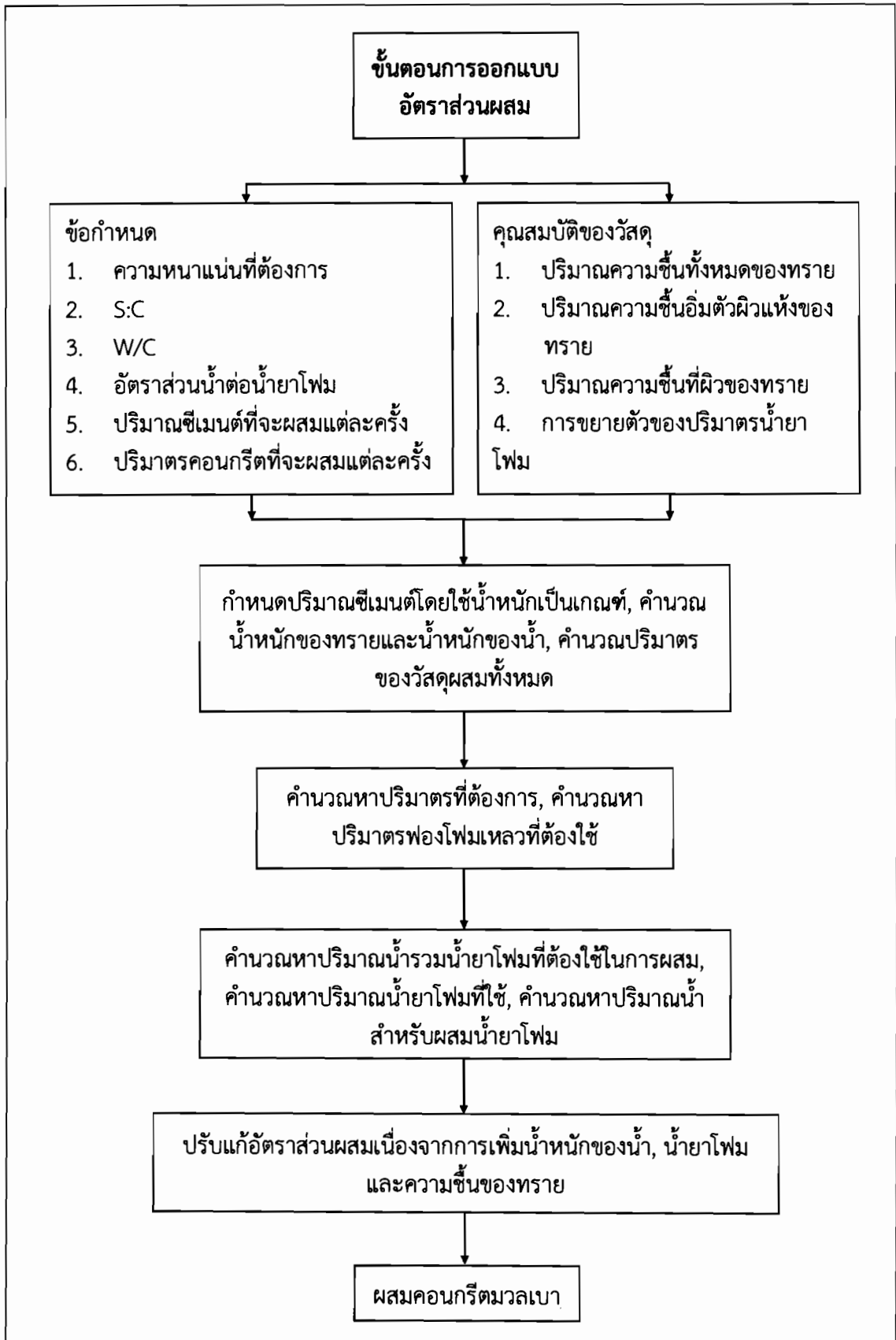
ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแบบ Quasi-Static compressive and tensile testing machine

### 3.2 อัตราส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งจะทำให้การทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้สูตรผสมจำนวนเก้าสูตรและเก็บตัวอย่างสูตรละ 60 ตัวอย่าง รวม 540 ตัวอย่าง (ตารางที่ 3.1) โดยที่ทำการทดสอบอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์ โดยการผสมตัวอย่างและทดสอบความสามารถในการไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักตัวของคอนกรีตเอง และเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คอนกรีตมีความชื้นเหลวพอดีคือเนื้อคอนกรีตไม่ชื้นเกินไปจนจับตัวเป็นก้อน และไม่เหลวเกินไปจนทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดการแยกชั้น เพื่อใช้เป็นค่ากลางและเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าและมากกว่าเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

### 3.3 การคำนวณอัตราส่วนผสม

การคำนวณอัตราส่วนผสมมีขั้นตอนการดำเนินงาน (ภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการออกแบบอัตราส่วนผสม

รายละเอียดของกระบวนการคำนวณออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.3.1 กำหนดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมต่อครั้ง (ใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์)
- 3.3.2 คำนวณน้ำหนักของทรายที่ต้องใช้จากอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่กำหนดไว้
- 3.3.3 คำนวณน้ำหนักของน้ำที่ต้องใช้จากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดไว้
- 3.3.4 คำนวณปริมาตรของวัสดุผสมทั้งหมด,  $V_T$

$$V_T = V_C + V_S + V_W \quad (3.1)$$

เมื่อ  $V_C$  คือ ปริมาตรเนื้อแท้ซีเมนต์ (ลูกบาศก์เมตร)

$V_S$  คือ ปริมาตรเนื้อแท้ทราย (ลูกบาศก์เมตร)

$V_W$  คือ ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

และ

$$V = \frac{M}{G \cdot \rho_w} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุ (ลูกบาศก์เมตร)

$M$  คือ น้ำหนักของวัสดุ (กิโลกรัม)

$G$  คือ ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของวัสดุ

$\rho_w$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

- 3.3.5 คำนวณปริมาตรที่ต้องการ,  $V_R$

$$V_R = \frac{M}{\rho_R} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $M_T$  คือ น้ำหนักของวัสดุทั้งหมด (กิโลกรัม)

$\rho_R$  คือ ความหนาแน่นที่ต้องการ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

- 3.3.6 คำนวณปริมาตรฟองโฟมเหลวที่ต้องใช้,  $V_F$

$$V_F = V_R - V_T \quad (3.4)$$



3.3.7 จำนวนปริมาณน้ำรวมน้ำยาโฟมที่ต้องใช้ในการผสม,  $M_{F+w}$

$$M_{F+w} = \frac{V_F \times 1,000}{Q_F} \quad (3.5)$$

3.3.8 จำนวนปริมาณน้ำยาโฟมที่ใช้,  $M_F$

$$M_F = \frac{M_{F+w}}{((W:F)+1)} \quad (3.6)$$

3.3.9 จำนวนปริมาณน้ำสำหรับผสมน้ำยาโฟม,  $M_{WF}$

$$M_{WF} = M_F \times (W:F) \quad (3.7)$$

3.3.10 ปรับแก้อัตราส่วนผสมเนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของน้ำและน้ำยาโฟม

3.3.11 ปรับแก้อัตราส่วนผสมเนื่องจากความชื้นของทราย

3.3.12 ผสมคอนกรีตมวลเบา

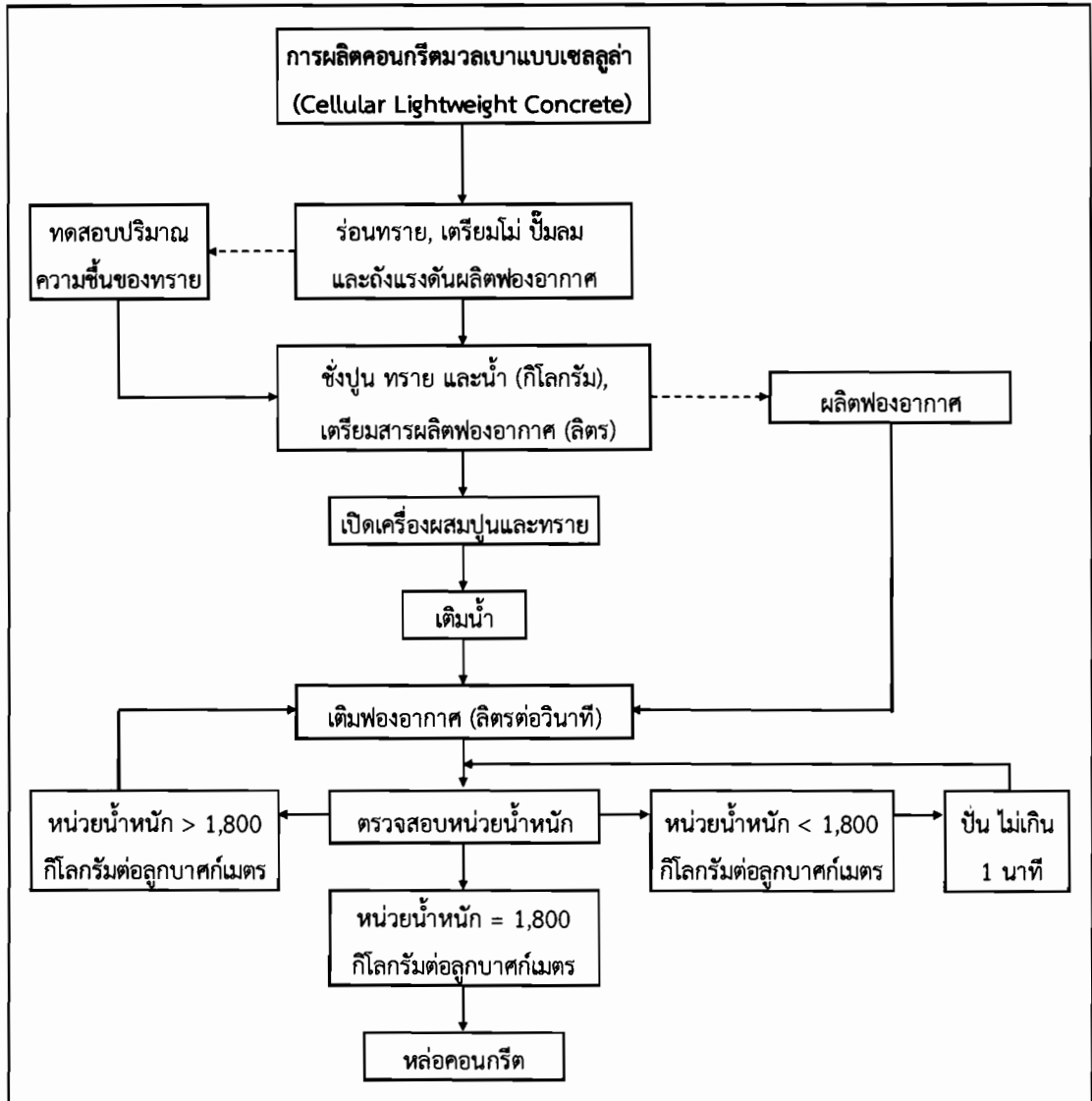
ตารางที่ 3.1 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

ความหนาแน่น กก/ม <sup>3</sup> .	อัตราส่วนผสม		จำนวนตัวอย่างทดสอบ		
	S:C	W/C	ทดสอบที่ 28 วัน	ทดสอบที่ 56 วัน	
1,800	1:1	0.40	30	30	
		0.45	30	30	
		0.50	30	30	
	2:1	0.45	30	30	
		0.50	30	30	
		0.55	30	30	
	3:1	0.55	30	30	
		0.60	30	30	
		0.65	30	30	
				รวม = 540	

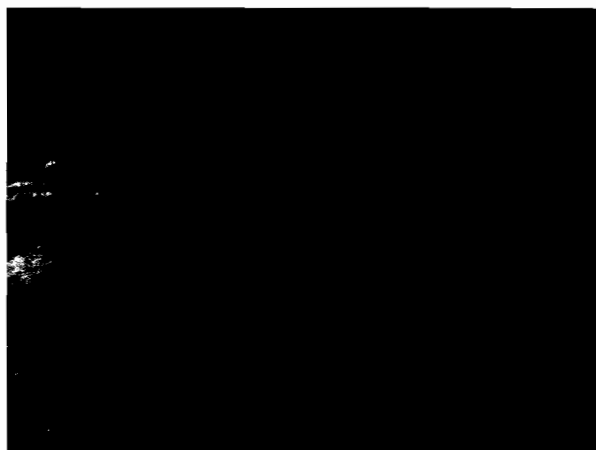
### 3.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสามารถสรุปเป็นขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นดังภาพที่ 3.6 โดยมีขั้นตอนเตรียมตัวอย่างดังนี้

3.4.1 เตรียมทรายโดยการร่อนทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการผึ่งทรายให้แห้ง หากทรายเปียกให้ขั้วทรายเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม (ภาพที่ 3.7)



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส



ภาพที่ 3.7 ทราวยที่ทำกรรอนแล้วผึ่งลมเพื่อเตรียมการผสม

3.4.2 เตรียมเครื่องมือสำหรับผสมคอนกรีต ได้แก่ โม่ผสมคอนกรีต ปั่นลม และถังแรงดันผลิตฟองโฟมเหลว โดยนำสารเพิ่มฟองโฟมเหลว (ซีก้าโพโร-40) ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:50 ใส่ลงในถังผลิตโฟมเหลวตามปริมาณที่ใช้ในการผสมแต่ละครั้ง (ภาพที่ 3.8)



ภาพที่ 3.8 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุพร้อมผสม

3.4.3 ใส่ทรายและซีเมนต์ลงในโม่ผสมคอนกรีตแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากันได้ดีสม่ำเสมอ (ภาพที่ 3.9)



ภาพที่ 3.9 ปูนซีเมนต์และทรายที่คลุกเคล้ากันได้ดีแล้ว

3.4.4 เมื่อทรายและซีเมนต์คลุกเคล้ากันสม่ำเสมอดี แล้วจึงค่อย ๆ เติมน้ำลงไปโดยไม่ผสมคอนกรีต โดยระหว่างเติมน้ำให้เปิดเครื่องผสมคอนกรีต เพื่อให้หน้าที่เติมน้ำไปผสมเข้ากันได้ดีกับทรายและซีเมนต์ (ภาพที่ 3.10)



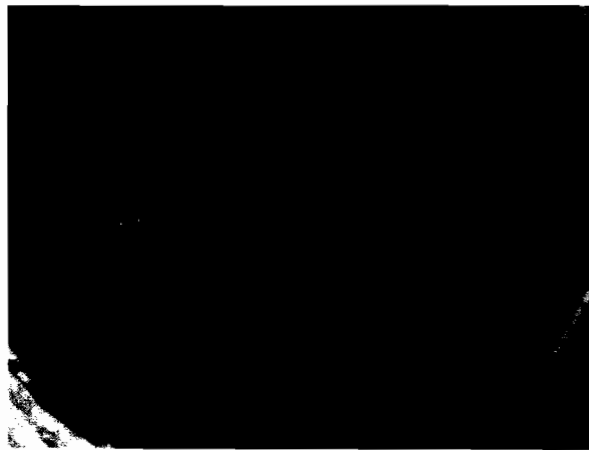
ภาพที่ 3.10 เติมน้ำในระหว่างที่เปิดเครื่องผสม

3.4.5 เมื่อน้ำผสมกับทรายและซีเมนต์จนเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอแล้ว (มอร์ตาร์) ทำการฉีดโฟมเหลวลงไป (ปรับแรงดันและอัตราการไหล) เพื่อปรับเวลาฉีดให้ใกล้เคียงปริมาณฟองโฟมที่ต้องใช้จริงให้มากที่สุด โดยระหว่างการฉีดโฟมเหลวต้องเปิดเครื่องผสมคอนกรีต (ภาพที่ 3.11)



ภาพที่ 3.11 ฉีดฟองโฟมเหลวเข้ากับมอร์ตาร์

3.4.6 เมื่อมอร์ตาร์กับโฟมเหลวคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงหยุดเครื่องผสม ในการผสม ในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที จากนั้นทำการตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต นำ คอนกรีตที่ได้ไปเทลงแบบหล่อและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบแล้วบ่มในอากาศเพื่อทำการ ทดสอบทั้งอายุ 28 วัน และ 56 วัน ดังภาพที่ 3.12 ถึง 3.13



ภาพที่ 3.12 คอนกรีตที่ผสมกันดีแล้ว



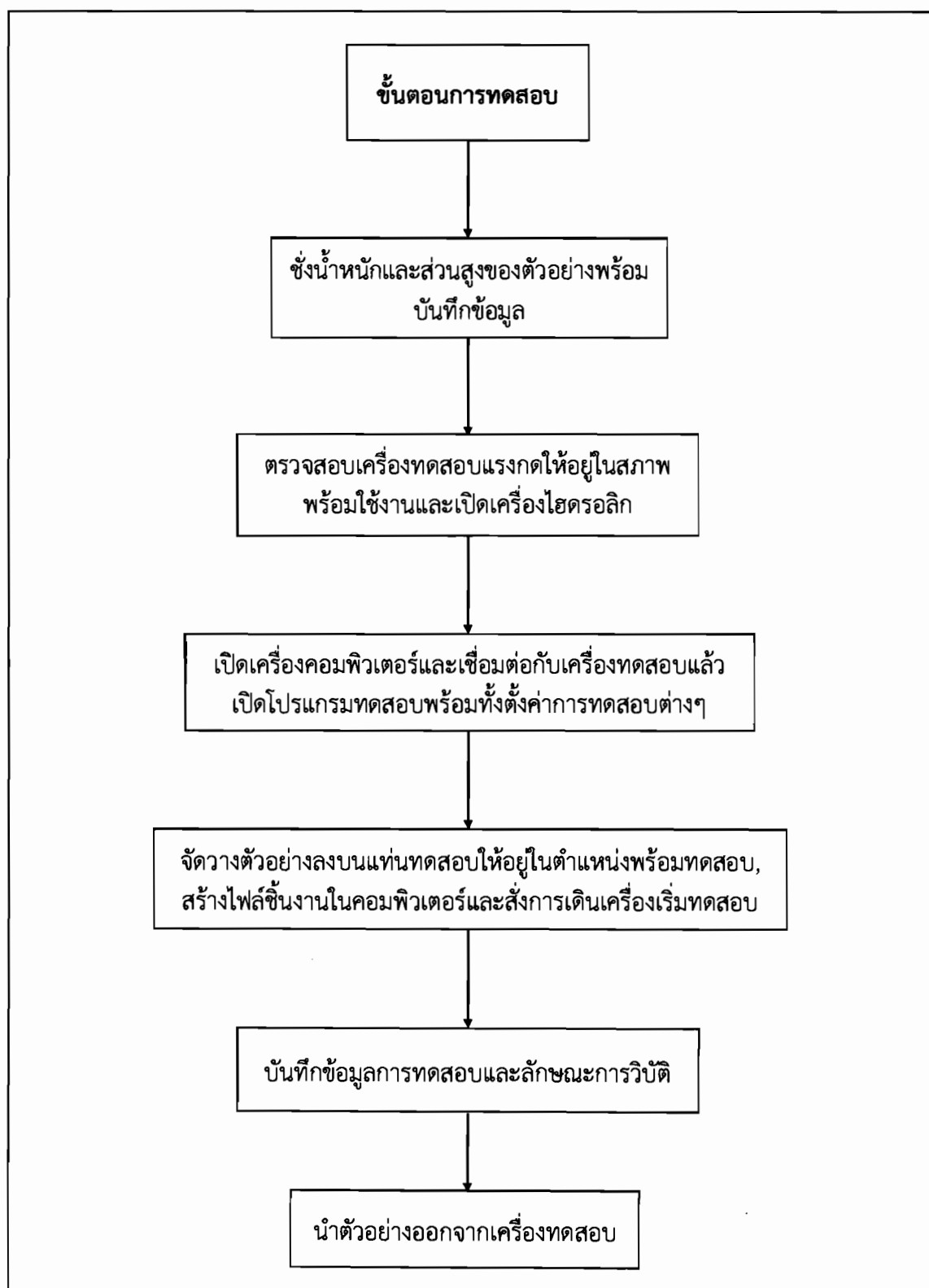
ภาพที่ 3.13 เทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและแกะแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง

### 3.5 ขั้นตอนทดสอบ

สำหรับการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า จะใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 39 การทดสอบในงานวิจัยนี้ จะการทดสอบตัวอย่างโดยการให้แรงกดจนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ การทำงานของเครื่องทดสอบจะใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวสั่งการให้เครื่องทดสอบไฮดรอลิกทำงาน โดยใช้แรงกดกดตัวอย่างจนวิบัติ ซึ่งเครื่องทดสอบจะรายงานผลของค่าแรงกดที่ค่าระยะการกดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ผ่านตัวเซ็นเซอร์ที่ติดไว้บนหัวกดสำหรับการวัดระยะการกดตัวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถวัดค่าที่มีความละเอียดสูงส่งต่อไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องคอมพิวเตอร์จะบันทึกผลเป็นตัวเลขที่ได้แสดงค่าของแรงกดและระยะการกดที่ตำแหน่งต่างๆ พร้อมทั้งแสดงกราฟเส้นความสัมพันธ์ของแรงกดและระยะการกด ซึ่งจะต้องนำไปแปลงเป็นกราฟเส้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดต่อไป

สำหรับการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เช่น Oztekin and et al. (2003) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Determination of rectangular stress block parameters for high performance concrete โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกในการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดเพื่อหาค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มีขั้นตอนและกระบวนการโดยสรุปดังภาพที่ 3.14 ซึ่งมีรายละเอียดในการทดสอบดังขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

3.5.1 เตรียมตัวอย่างโดยชั่งน้ำหนักและวัดสวนสูงตัวอย่าง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลไว้แล้วทำการแค็ปหัวตัวอย่าง (ภาพที่ 3.15)



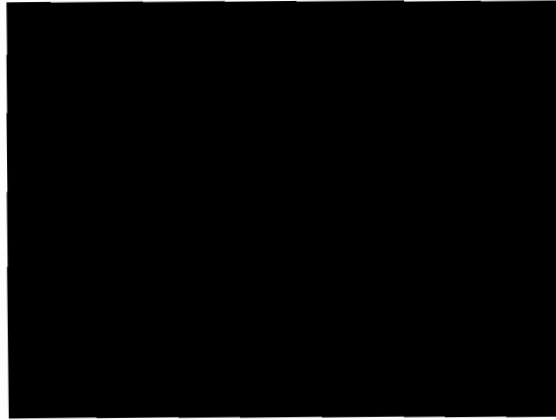
ภาพที่ 3.15 ชั่งน้ำหนักและวัดความสูงตัวอย่าง

- 3.5.2 ตรวจสอบเครื่องทดสอบให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน
- 3.5.3 เปิดเครื่องไฮดรอลิกส์
- 3.5.4 เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์โดยทำการเชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบ
- 3.5.5 เปิดโปรแกรมทดสอบแล้วตั้งค่าการทดสอบ โดยกำหนดการทดสอบแบบแรงกด ความเร็วที่ใช้ทดสอบ โหลดเริ่มต้น โหลดสูงสุด ระยะหดตัวสูงสุด ดังภาพที่ 3.16 และ 3.17



ภาพที่ 3.16 กำหนดค่าโหลดเริ่มต้น โหลดสูงสุดและระยะหดตัวสูงสุด





**ภาพที่ 3.17 กำหนดความเร็วทดสอบและขนาดหน้าตัดตัวอย่าง**

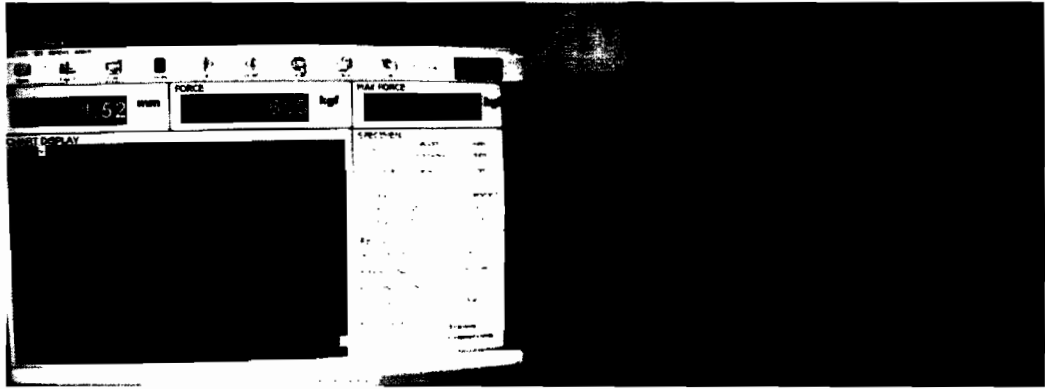
3.5.6 นำตัวอย่างไปวางตรงจุดกึ่งกลางบนแท่นเหล็กทดสอบตัวล่าง ติดตั้งสายเซ็นเซอร์เพื่อวัดระยะกุดตัวอย่าง แล้วเดินเครื่องให้แท่นเหล็กทดสอบตัวบนเลื่อนลงมาสัมผัสกับตัวอย่าง (ภาพที่ 3.18)



**ภาพที่ 3.18 จัดวางตัวอย่างในตำแหน่งที่พร้อมสำหรับการทดสอบ**

3.5.7 สร้างไฟล์ชิ้นงานแล้วทำการกดปุ่มเดินเครื่องเพื่อเริ่มทดสอบ

3.5.8 เมื่อตัวอย่างวิบัติจะได้ข้อมูลการทดสอบ ที่บันทึกโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นถ่ายภาพลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง (ภาพที่ 3.19) แล้วจึงทำการเดินเครื่องยกแท่นเหล็กตัวบนขึ้นแล้วยกตัวอย่างออก



ภาพที่ 3.19 เส้นความเค้น-ความเครียดและลักษณะการวิบัติ

### 3.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้อธิบายรายละเอียดในส่วนของ วัสดุอุปกรณ์ การออกแบบอัตราส่วนผสม การผสมตัวอย่าง การทดสอบ วัสดุอย่างละเอียด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาครั้งต่อไป สำหรับการทดสอบนั้นจะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดและจะได้นำเสนอผลในส่วนของการวิเคราะห์ผลต่อไป

การศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า จะทำการศึกษาโดยการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ทดสอบที่ 28 และ 56 วัน การทดสอบนี้จะได้เส้นความเค้น-ความเครียดแสดงพฤติกรรมของน้ำหนักกดทับ (กิโลกรัม) กับระยะการหดตัว (มิลลิเมตร) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งจะต้องทำการแปลงค่าไปเป็นกำลังรับแรงอัดหรือความเค้น (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กับความเครียดที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร) ซึ่งความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่านี้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ในสมการทำนายความเค้น-ความเครียดที่ประยุกต์มาจากสมการทำนายของคอนกรีตปกติ เพื่อวิเคราะห์ผลจากการทดสอบกับการวิเคราะห์ในสมการทำนายผล เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและวิเคราะห์ค่าความเค้น-ความเครียดที่จะนำไปพัฒนาใช้การในงานโครงสร้างต่อไป

## บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 4.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตภายใต้แรงอัด เพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นข้อมูลที่เป็นส่วนสำคัญ ในการนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมและพิจารณาออกแบบในงานโครงสร้าง หากต้องการนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าไปใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็ก ในส่วนที่เป็นงานโครงสร้างที่ต้องการการรับน้ำหนักบรรทุก เช่น คาน ซึ่งในบทนี้จะมีเนื้อหาที่ประกอบไปด้วย ค่าความเค้นและความเครียด พฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด และสมการจำลองความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

### 4.2 ผลการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่ง จะทำการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน ที่ค่าความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้สูตรผสมจำนวนแก้วสูตร เก็บ ตัวอย่างสูตรละ 60 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นสองช่วงทดสอบคือทดสอบที่อายุ 28 วัน 30 ตัวอย่าง และ ทดสอบที่อายุ 56 วัน 30 ตัวอย่าง โดยผลการทดสอบจาก 30 ตัวอย่าง จะเลือกผลการทดสอบที่มีเส้น โค้งที่ไม่สมบูรณ์และไม่ชัดเจนออกและนำเสนอ 24 ตัวอย่าง รวม 432 ตัวอย่าง เป็นการทดสอบเพื่อ วิเคราะห์พฤติกรรมของเส้นโค้งที่เกิดขึ้นภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและระยะการหด ตัวของคอนกรีต เพื่อต้องการทราบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่า ความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดวิบัติ เพื่อนำค่าทั้งสองที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ พฤติกรรมและประกอบการพิจารณาการออกแบบในงานโครงสร้างต่อไป ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แบ่ง ออกเป็นสองช่วงเวลาทดสอบดังต่อไปนี้

#### 4.2.1 ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

ผลการศึกษาความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ซึ่งทำการทดสอบ ตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 ใช้อัตราส่วนทรายต่อ ซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้สูตรผสมจำนวนแก้วสูตร โดยเก็บตัวอย่างสูตรละ 30 ตัวอย่าง และ นำเสนอ 24 ตัวอย่าง รวม 216 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากข้อมูลการทดสอบ ตัวอย่างที่ ใช้สูตรผสมที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ระหว่าง

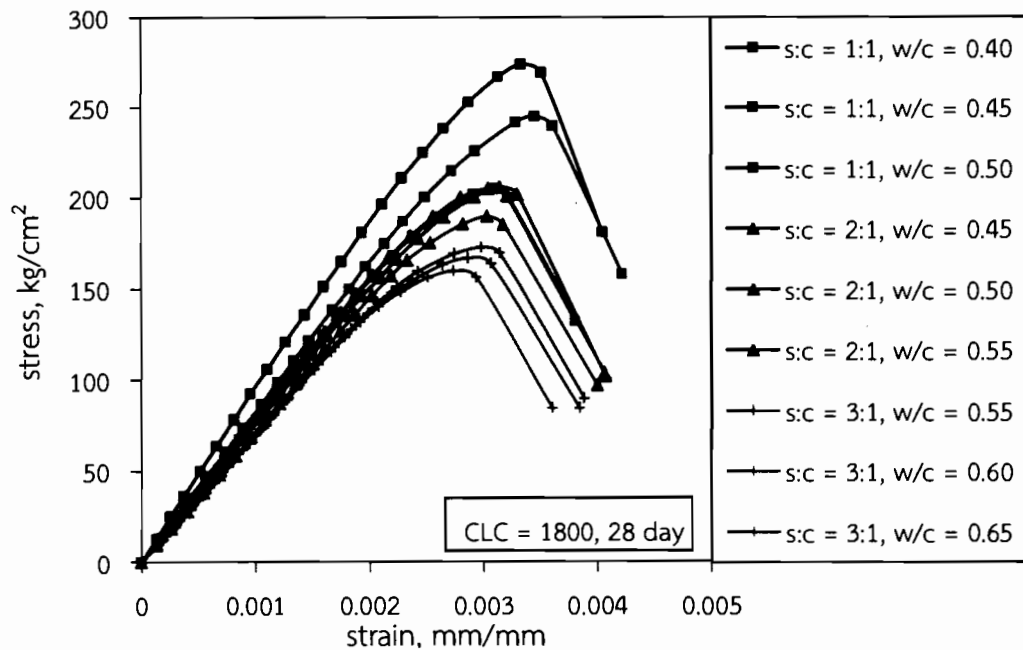
190-274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนตัวอย่างที่ใช้สูตรผสมที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้น้อยกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

**ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน**

Density (kg/m <sup>3</sup> )	S:C	W/C	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		Strain (mm/mm)	
			Maximum strength (ave.)	Failure strength (ave.)	At f <sub>c</sub> maximum strength (ave.)	At f <sub>c</sub> failure strength (ave.)
1,800	1:1	0.40	274	181	0.0033	0.0040
		0.45	245	158	0.0034	0.0042
		0.50	205	132	0.0031	0.0038
	2:1	0.45	205	104	0.0030	0.0041
		0.50	206	102	0.0031	0.0041
		0.55	190	97	0.0030	0.0040
	3:1	0.55	173	90	0.0030	0.0039
		0.60	167	84	0.0029	0.0038
		0.65	160	84	0.0027	0.0036

จากตารางที่ 4.1 ค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและที่จุดวิบัติได้จากการเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบทั้ง 24 ตัวอย่าง ในแต่ละสูตรทดสอบ ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและที่จุดวิบัติได้จากการเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Normalization) ของผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างทั้ง 24 ตัวอย่าง โดยใช้หลักการที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของการทดสอบมีค่าเท่ากับหนึ่ง โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ 4.3.2

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 4.1 ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่าความเค้นและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 มีแนวโน้มของค่าความเค้นและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 แต่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เทียบกับตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 ซึ่งมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนกว่า

จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในภาพที่ 4.1 สร้างขึ้นโดยใช้หลักการที่จะอธิบายในหัวข้อ 4.3 ซึ่งได้ยกตัวอย่างเพียงบางส่วน โดยผลการทดสอบทั้งหมดได้นำเสนอในภาคผนวก ข

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 56 วัน

การศึกษาความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ซึ่งได้ทำการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 56 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้สูตรผสมจำนวนเก้าสูตร โดยเก็บตัวอย่างสุตรละ 30 ตัวอย่าง และนำเสนอ 24 ตัวอย่าง รวม 216 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

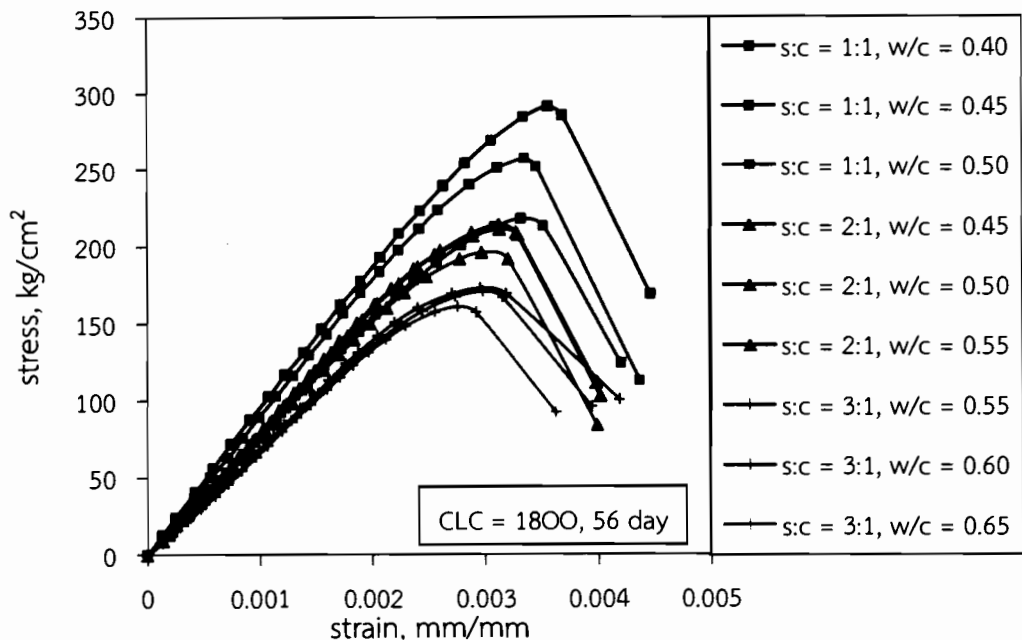
จากข้อมูลการทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้สูตรผสมที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดระหว่าง 196-291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนตัวอย่างที่ใช้สูตรผสมที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 สามารถพัฒนากำลังได้น้อยกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน

Density (kg/m <sup>3</sup> )	S:C	W/C	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		Strain (mm/mm)	
			Maximum strength (ave.)	Failure strength (ave.)	At f <sub>c</sub> maximum strength (ave.)	At f <sub>c</sub> failure strength (ave.)
1,800	1:1	0.40	291	169	0.0035	0.0044
		0.45	257	113	0.0034	0.0043
		0.50	218	124	0.0033	0.0042
	2:1	0.45	211	111	0.0031	0.0040
		0.50	214	103	0.0031	0.0040
		0.55	196	84	0.0030	0.0040
	3:1	0.55	173	100	0.0030	0.0042
		0.60	171	96	0.0030	0.0039
		0.65	161	92	0.0028	0.0036

จากตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและที่จุดวิบัติ ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและที่จุดวิบัติ ได้จากการใช้หลักการเดียวกันกับผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบที่อายุ 56 วัน สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 56 วัน

จากภาพที่ 4.2 ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่าความเค้นและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 มีแนวโน้มของค่าความเค้นและค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 แต่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เทียบกับตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 ซึ่งมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนกว่า

จากผลการทดสอบความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มที่สูงขึ้นแต่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน ในทุกๆ อัตราส่วนผสม และความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในภาพที่ 4.2 สร้างขึ้นโดยใช้หลักการเดียวกันกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดในภาพที่ 4.1 โดยผลการทดสอบทั้งหมดได้นำเสนอในภาคผนวก ข

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่แสดงในตารางที่ 4.1 ได้ยกตัวอย่างผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสตามที่ได้รายงานในหัวข้อ 4.2.1 ซึ่งทดสอบที่ค่าความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ

28 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยยกตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนสามสูตร ๆ ละ 24 ตัวอย่าง รวมเป็น 72 ตัวอย่าง และผลการทดสอบส่วนที่เหลือได้แสดงในภาคผนวก ข

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน

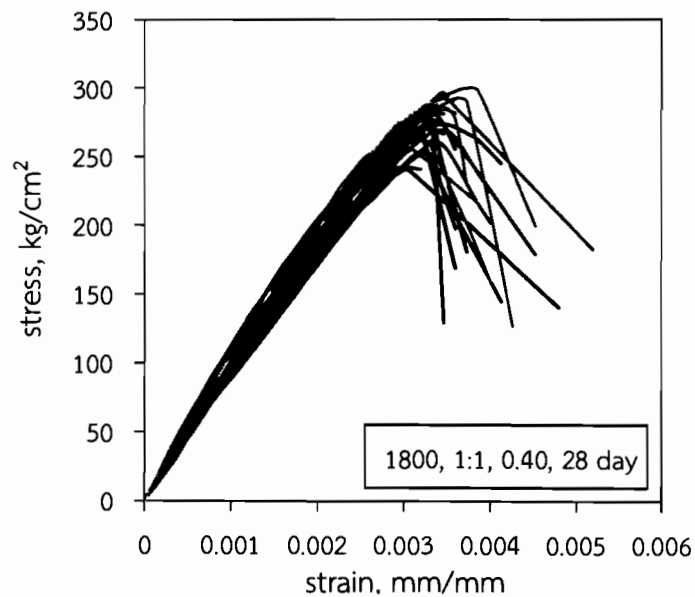
Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 1:1, 28 day												
Mix.	W/C = 0.40				W/C = 0.45				W/C = 0.50			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	239.6	140.3	0.0031	0.0048	214.2	129.7	0.0031	0.0043	223.0	145.1	0.0036	0.0044
2	264.7	144.6	0.0032	0.0041	248.8	165.0	0.0032	0.0040	201.3	197.8	0.0032	0.0033
3	268.8	169.1	0.0032	0.0036	273.1	175.2	0.0036	0.0039	188.7	149.0	0.0032	0.0033
4	261.8	201.9	0.0033	0.0040	261.8	225.3	0.0035	0.0036	203.8	160.7	0.0032	0.0036
5	270.3	266.6	0.0032	0.0035	242.5	146.0	0.0037	0.0044	200.5	186.2	0.0031	0.0032
6	251.9	222.2	0.0032	0.0035	280.9	178.3	0.0037	0.0053	183.3	115.8	0.0037	0.0040
7	281.1	281.0	0.0033	0.0035	229.4	137.4	0.0032	0.0041	204.1	166.6	0.0032	0.0035
8	275.2	180.7	0.0033	0.0037	261.6	148.5	0.0037	0.0051	215.9	173.6	0.0032	0.0041
9	276.4	178.8	0.0033	0.0045	245.6	181.5	0.0036	0.0039	223.7	116.7	0.0032	0.0037
10	272.6	129.0	0.0033	0.0035	218.9	87.1	0.0033	0.0041	215.0	135.7	0.0032	0.0036
11	273.5	245.0	0.0035	0.0041	248.2	195.3	0.0037	0.0048	220.6	107.4	0.0033	0.0043
12	281.7	255.3	0.0033	0.0036	225.6	208.4	0.0029	0.0032	180.0	105.6	0.0025	0.0035
13	263.6	159.9	0.0032	0.0040	255.2	129.0	0.0036	0.0047	210.0	117.0	0.0032	0.0040
14	241.9	240.5	0.0031	0.0032	242.0	93.8	0.0035	0.0044	188.2	133.7	0.0032	0.0039
15	286.5	285.3	0.0033	0.0035	265.7	240.7	0.0041	0.0045	226.4	167.3	0.0031	0.0036
16	284.4	281.5	0.0035	0.0036	250.6	140.1	0.0032	0.0036	205.7	118.5	0.0028	0.0036
17	268.7	224.3	0.0035	0.0040	270.9	137.8	0.0036	0.0047	195.8	184.7	0.0027	0.0031
18	296.3	182.5	0.0035	0.0052	263.5	175.7	0.0036	0.0051	217.3	122.3	0.0031	0.0036
19	291.9	291.0	0.0035	0.0036	226.0	71.1	0.0031	0.0040	217.1	158.5	0.0032	0.0036
20	299.8	199.5	0.0037	0.0045	239.0	76.5	0.0035	0.0048	210.0	127.8	0.0028	0.0037
21	292.2	126.6	0.0036	0.0043	185.5	40.6	0.0028	0.0037	213.0	148.0	0.0035	0.0045
22	285.9	229.1	0.0035	0.0037	253.2	104.6	0.0039	0.0045	190.9	144.2	0.0028	0.0035
23	255.9	221.8	0.0031	0.0038	238.8	191.2	0.0035	0.0043	185.0	132.5	0.0027	0.0032
24	289.2	285.0	0.0033	0.0035	241.8	145.6	0.0032	0.0041	204.0	188.0	0.0035	0.0039



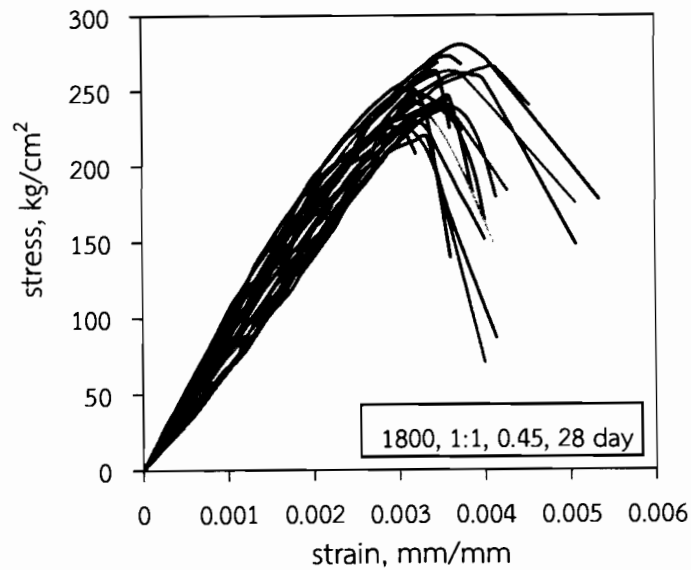
จากผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำการทดสอบผสมและเทคอนกรีตเข้าแบบแล้ว ทำให้คอนกรีตสามารถไหลเข้าแบบได้โดยน้ำหนักของตัวเองได้ดีและที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 และ 0.50 เป็นอัตราส่วนผสมที่ใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าและมากกว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 มีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50

#### 4.3.2 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน

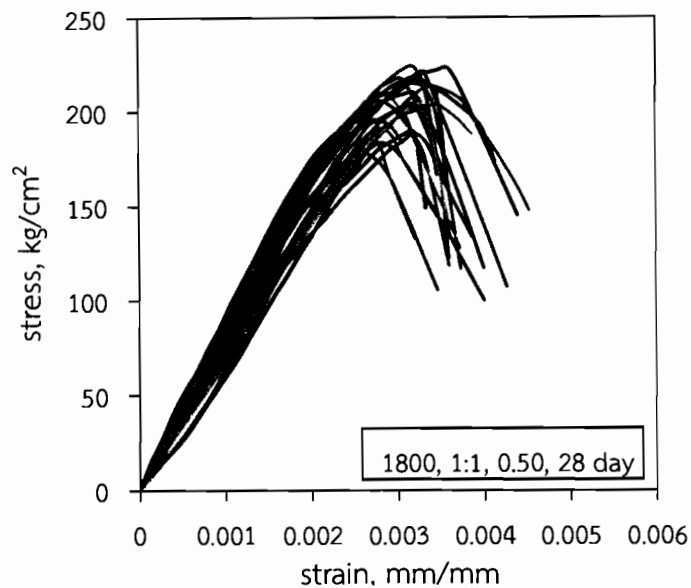
เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ได้จากการนำตัวอย่างทรงกระบอกไปทำการทดสอบโดยทดสอบแรงกดจนตัวอย่างวิบัติ ซึ่งผลการทดสอบจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดและระยะการหดตัวของตัวอย่าง เมื่อแปลงค่าเป็นหน่วยความเค้นและความเครียดจะสามารถทราบพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.3



ก. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.40



ข. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45



ค. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

ภาพที่ 4.3 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50

จากภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 พบว่าพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนั้น ในช่วงแรกความเค้น (กำลังรับแรงอัด) และความเครียดจะมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงและจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นมี

ค่าเข้าใกล้จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด หลังจากนั้นจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะมีค่าความลาดชันและเป็นเส้นตรง

ความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 จะมีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ก็มีแนวโน้มของค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่มีค่าความเค้นที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูงจะมีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงตามไปด้วย

ผลการทดสอบแต่ละสูตรทดสอบสูตรละ 24 ชุดข้อมูลทดสอบ จะนำมาเฉลี่ยโดยที่ทำการเฉลี่ยค่าโดยน้ำหนักของตัวเอง (Normalization) เป็นการทำให้เส้นโค้งของแต่ละเส้น (หนึ่งเส้นโค้งคือหนึ่งชุดข้อมูลหรือหนึ่งตัวอย่างทดสอบ) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับหนึ่ง โดยมีวิธีการดังนี้

(1) นำค่ากำลังรับแรงอัดของผลการทดสอบที่บันทึกค่าได้ทุก ๆ ระยะความเครียดเท่ากับ 0.00013 หารด้วยค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเส้นโค้งนั้น จะได้เส้นโค้งที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับหนึ่ง (หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรหารด้วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ทั้ง 24 เส้น ดังภาพที่ 4.4

(2) นำเส้นโค้งทั้งหมด 24 เส้น มาเขียนลงในกราฟเดียวกันแล้วแบ่งการพิจารณาเส้นโค้งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นช่วงที่ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 0.01 จนถึงค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

(3) ทำการเฉลี่ยค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่ง ทั้ง 24 เส้น จะได้ค่าความเครียดเฉลี่ยหนึ่งค่าและค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยหนึ่งค่าที่มีความสัมพันธ์กันเป็นจุดหนึ่งจุดบนกราฟ ซึ่งเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลทั้งหมด

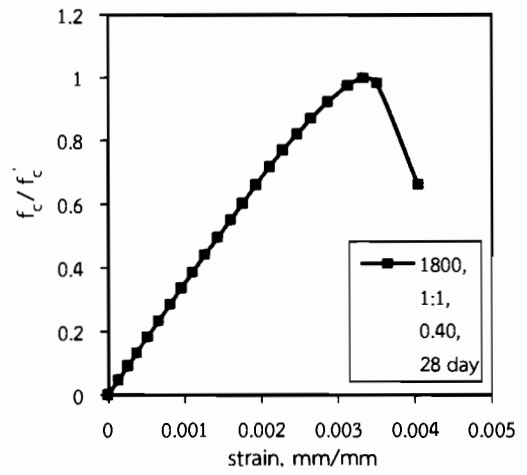
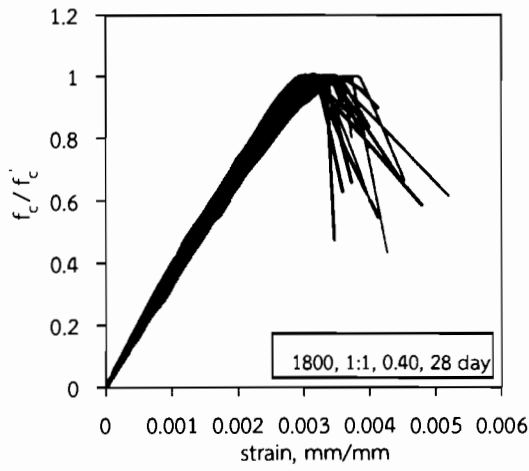
(4) ทำการเฉลี่ยค่าความเครียดและค่ากำลังรับแรงอัดทุก ๆ ช่วงของค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงที่มีค่าต่างกันประมาณ 0.05 จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยหนึ่งค่าและค่าความเครียดเฉลี่ยหนึ่งค่าที่มีความสัมพันธ์กันเป็นจุดหนึ่งจุดบนกราฟ ซึ่งเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลทั้งหมด ทำเช่นนี้จนถึงค่าความสัมพันธ์ของความเครียดและกำลังรับแรงอัดมีค่าอยู่ที่จุดศูนย์

(5) นำจุดต่าง ๆ ที่แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดและกำลังรับแรงอัดมาเรียงต่อกันในกราฟ แล้วลากเส้นผ่านจุดทุกจุด จะได้เส้นความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดหนึ่งเส้น

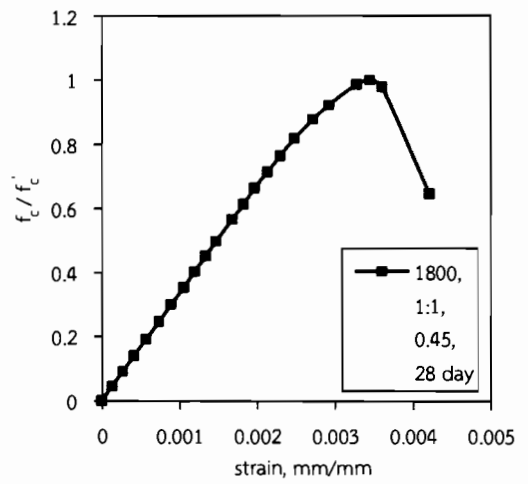
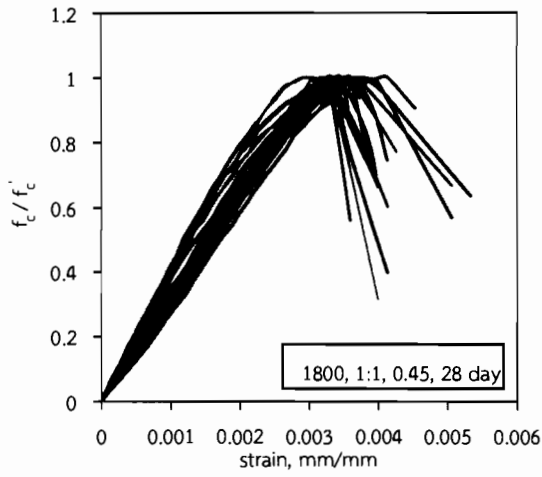
(6) ช่วงที่สอง เป็นช่วงของตัวอย่างที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจนถึงค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดวิบัติ แล้วทำเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 จะได้เส้นความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดหนึ่งเส้น

(7) นำจุดความสัมพันธ์ของความเครียดและกำลังรับแรงอัดของทั้งสองช่วงมาเรียงต่อกันในกราฟแล้วลากเส้นผ่านจุดทุกจุด จะได้เส้นความสัมพันธ์ขอเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่สมบูรณ์หนึ่งเส้น ดังภาพที่ 4.4

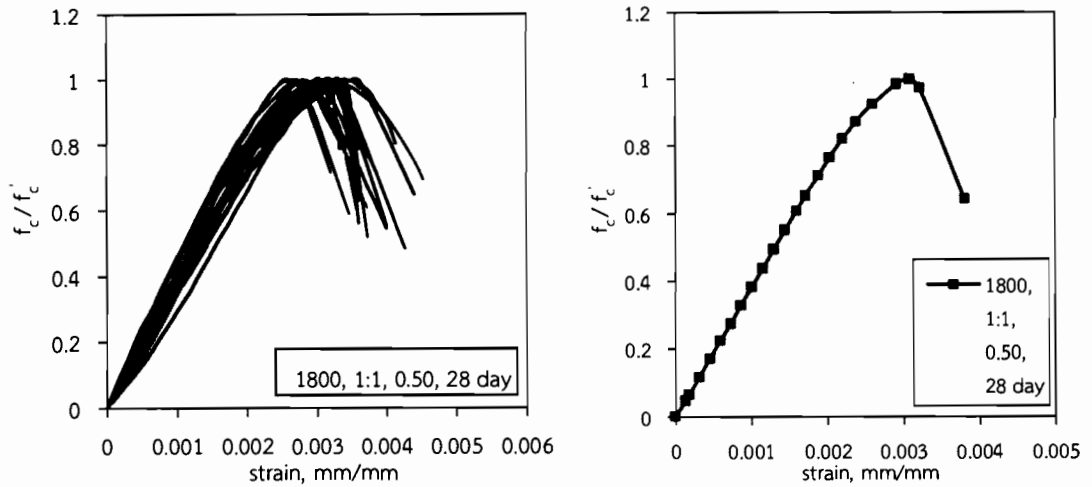
(8) หลักการเฉลี่ยค่าด้วยวิธีนี้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ สามารถเปรียบเทียบผลกับการหาเส้นแนวโน้มเฉลี่ยในโปรแกรม Excel ได้ ซึ่งเส้นโค้งที่ได้จากสองวิธีนี้เมื่อนำไปเขียนกราฟเปรียบเทียบเส้นโค้งมีความใกล้เคียงกันมากและเกือบเป็นเส้นเดียวกัน



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.40



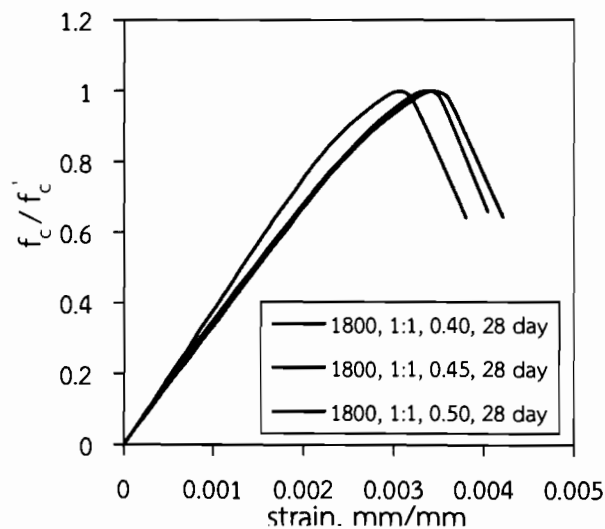
ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45



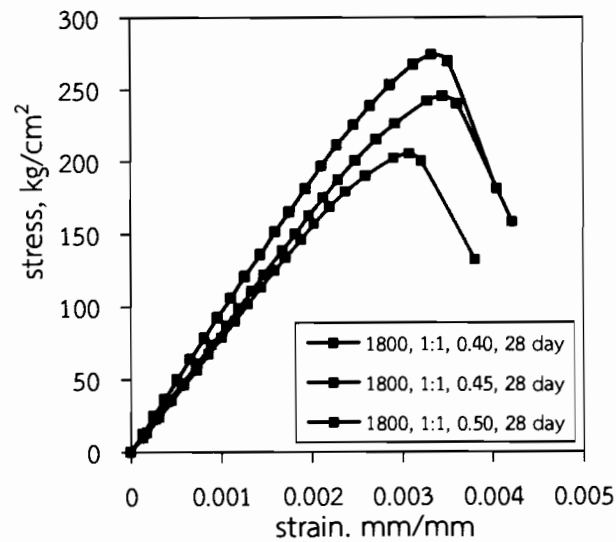
ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

ภาพที่ 4.4 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50

จากภาพที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนผสมทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, และ 0.50 มีค่าความเครียดเฉลี่ยที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 0.0033, 0.0034 และ 0.0031 ตามลำดับ มีค่าความเครียดเฉลี่ยที่จุดวิบัติเท่ากับ 0.0040, 0.0042 และ 0.0038 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเมื่อนำเส้นความสัมพันธ์ทั้งสามเส้นมาเขียนกราฟความสัมพันธ์จะได้ดังภาพที่ 4.5ก เมื่อแทนค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ทำการเฉลี่ยแล้วในแต่ละอัตราส่วนผสมของน้ำที่แตกต่างกัน สามารถเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดได้ดังภาพที่ 4.5ข



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1



ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1

ภาพที่ 4.5 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 4.5ก พิจารณาที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 จะมีค่าความเครียดเฉลี่ยสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ตามลำดับและที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ก็มีค่าความเครียดเฉลี่ยที่สูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50

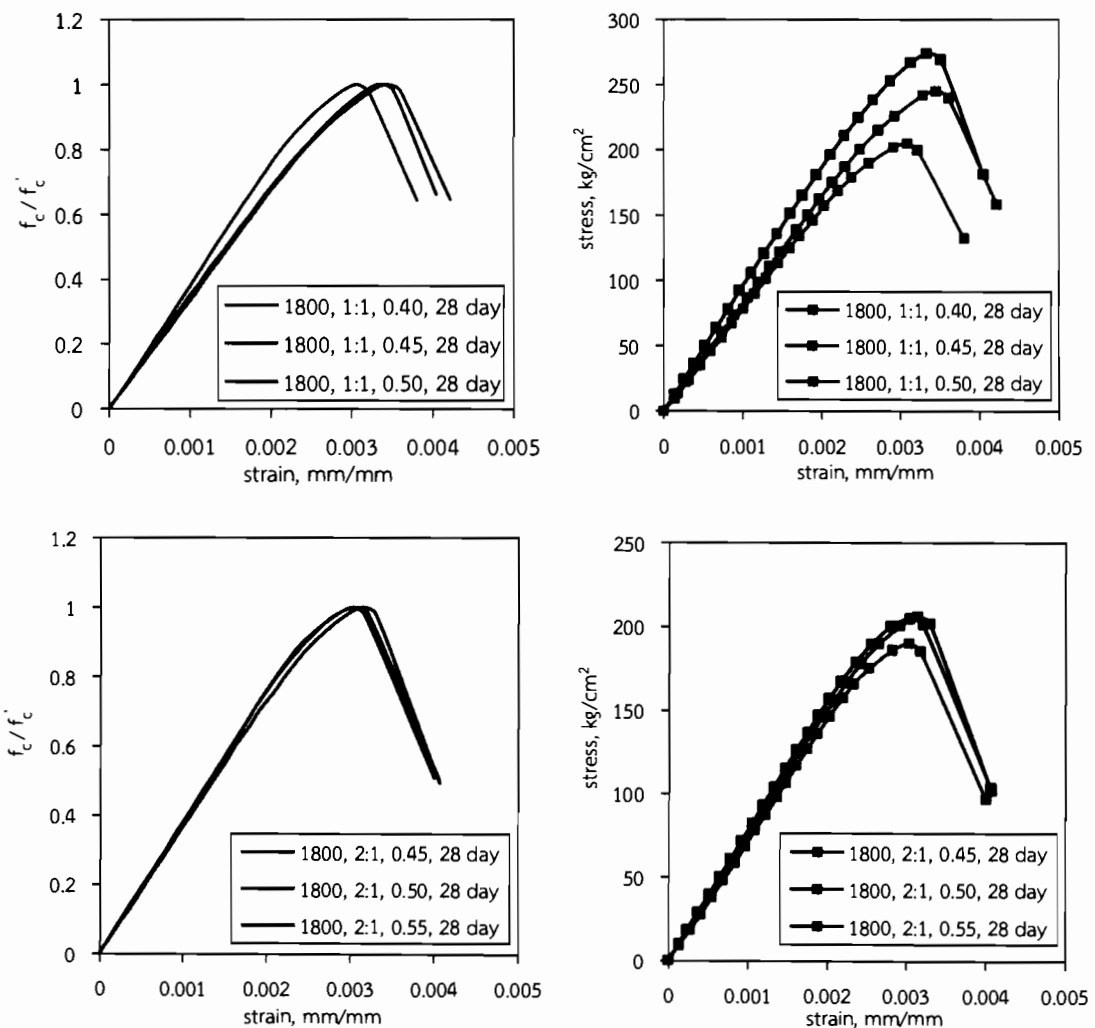
จากภาพที่ 4.5ข เมื่อแทนค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลทดสอบทั้งสามชุดในภาพที่ 4.5ก พบว่าพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 มีความเค้นที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ ขณะที่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ก็มีความเค้นสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 เช่นกัน โดยพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อธิบายถึงความสามารถต้านทานกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีความเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนน้ำที่ใช้ผสม ซึ่งจะมีความแตกต่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 เทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

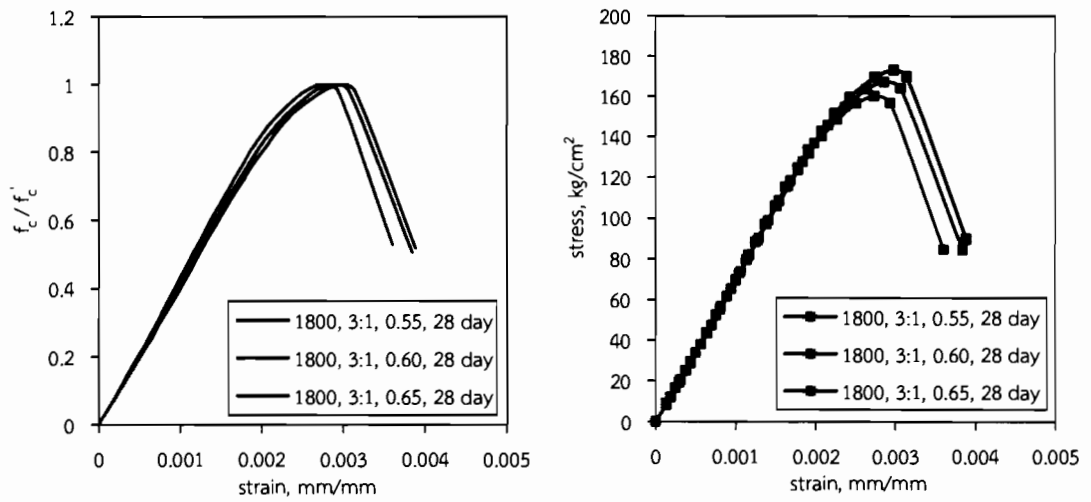
#### 4.3.3 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน

การสร้างสมการเพื่อจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส จะทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์โดยใช้สมการกำลังสอง ที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นจากสมการจำลองพฤติกรรมคอนกรีตปกติของ Hognestad ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้เป็นสมการจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตปกติโดยทั่วไป เพื่อใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้ง

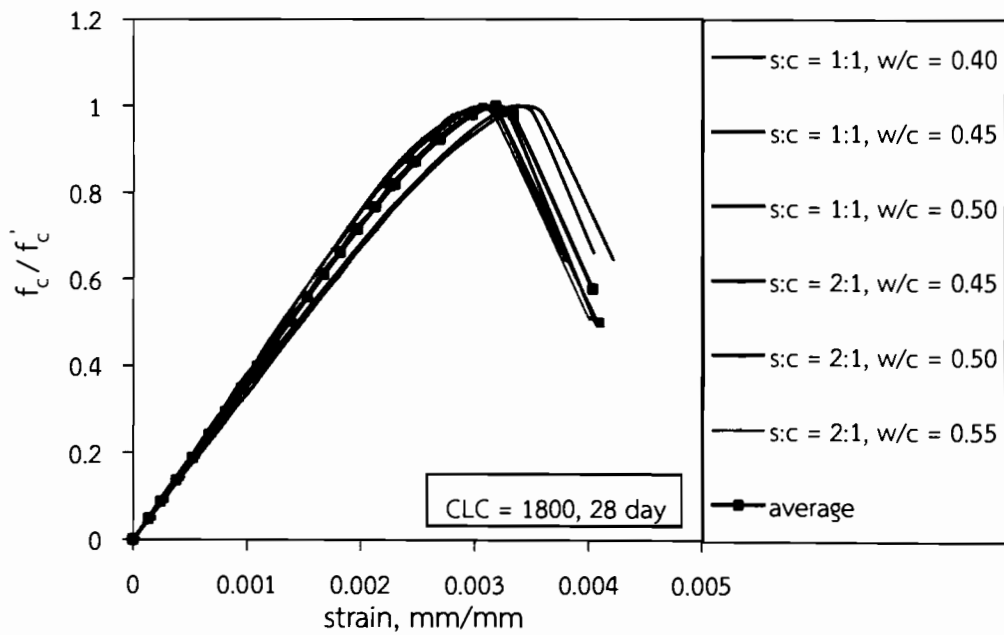
ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ซึ่งต้องมีการสร้างเส้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบ

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 จะแสดงดังภาพที่ 4.6 ชุดข้อมูลที่จะนำมาใช้สร้างเส้นความสัมพันธ์นี้ เป็นข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ทำกรทดสอบที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 เนื่องจากสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 จะไม่นำมาพิจารณาด้วยเนื่องจากมีผลการทดสอบที่ได้กำลังไม่สูงพอในการนำมาพิจารณาเพื่อเป็นตัวแทนในการสร้างสมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด การเฉลี่ยของชุดข้อมูลได้แสดงดังภาพที่ 4.7



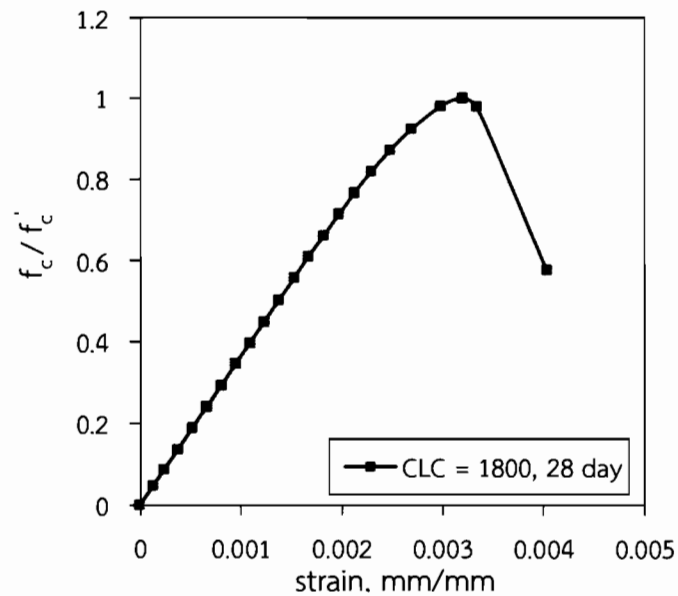


ภาพที่ 4.6 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อายุ 28 วัน



ก. การเฉลี่ยความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ 2:1



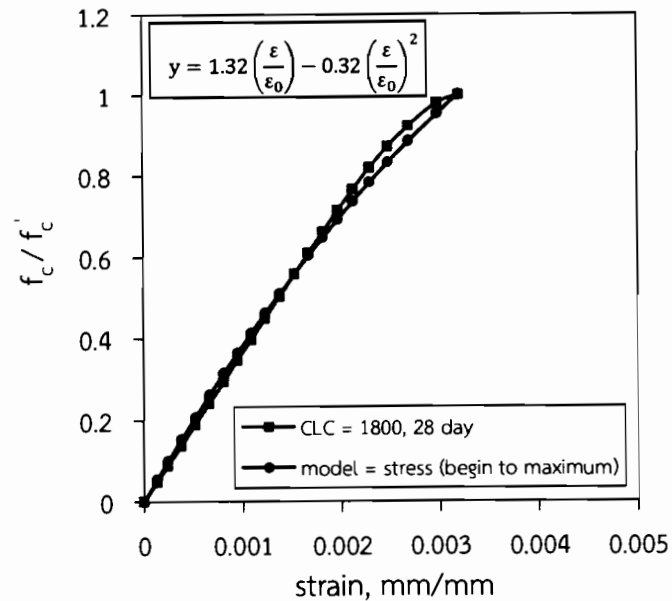


ข. เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเฉลี่ย

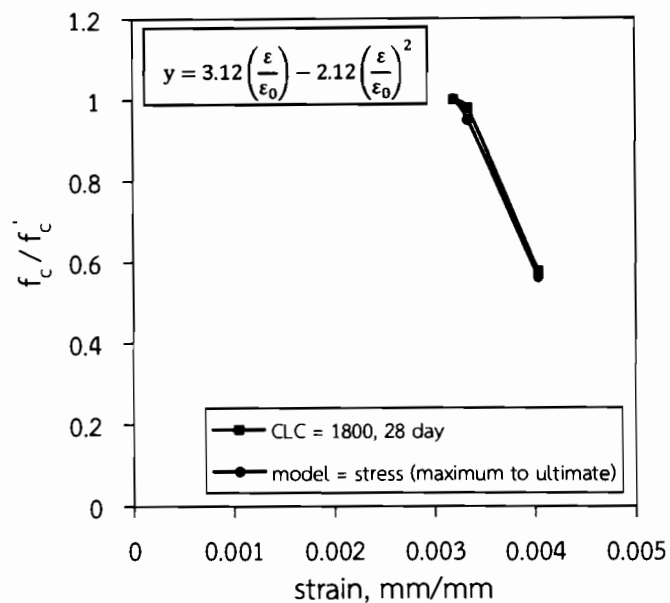
ภาพที่ 4.7 ความเครียดเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาความเครียดเฉลี่ยที่ได้จากการเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ทำกรทดสอบที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน มีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.0032 และที่จุดวิบัติประมาณ 0.0040

การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด สามารถเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 4.8



ก. จำลองความเครียดที่จุดศูนย์ถึงจุดสูงสุด



ข. จำลองความเครียดที่จุดสูงสุดถึงจุดวิบัติ

ภาพที่ 4.8 จำลองความสัมพันธ์เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 4.8 พบว่าไม่สามารถสร้างสมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าให้เป็นช่วงเดียวได้ เนื่องจากการพิจารณาเส้นโค้งเป็นช่วงเดียว ทำให้เส้นโค้งที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ต่ำกว่าความเป็นจริง

ซึ่งต้องแยกพิจารณาเป็นสองช่วงคือช่วงตั้งแต่จุดเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และช่วงตั้งแต่จุดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งสมการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าสามารถเขียนได้ดังนี้

สมการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดตั้งแต่จุดเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด แสดงในสมการที่ 4.1

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 1.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

สมการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดตั้งแต่จุดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ แสดงในสมการที่ 4.2

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

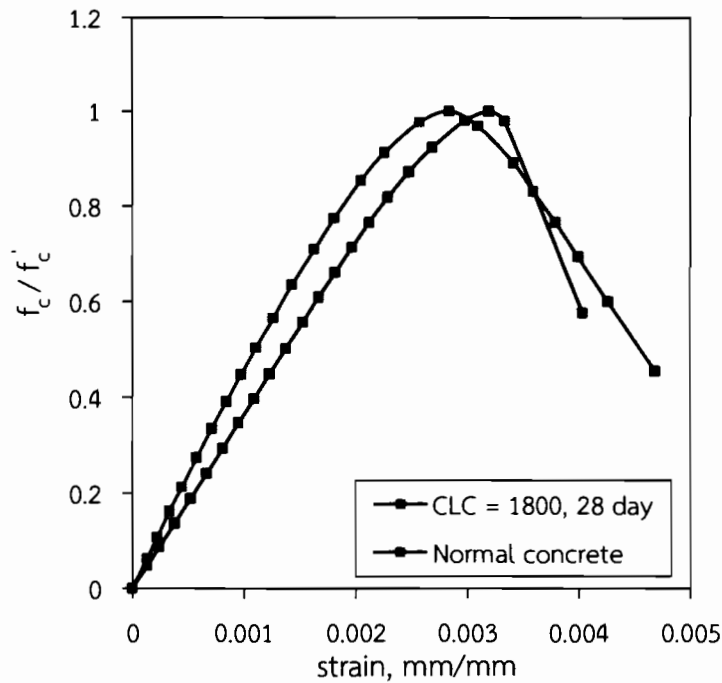
เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

จากสมการที่เป็นตัวแทนของการทำนายพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถให้ผลทำนายที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในระดับหนึ่ง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งเป็นสมการกำลังสอง ซึ่งลักษณะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบจะเป็นแบบพาราโบลา ผลการเปรียบเทียบความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลากับคอนกรีตปกติ ที่ได้จากการทดสอบ สามารถแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติ

จากภาพที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ากับคอนกรีตปกติที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 360 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดสูงกว่าคอนกรีตปกติ หลังจากนั้นจะเกิดการวิบัติโดยฉับพลัน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีส่วนประกอบเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดและโพรงอากาศขนาดเล็ก ที่เกิดจากการเติมฟองอากาศที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่คอนกรีตรับกำลังจะเกิดการยุบตัวหรือหดตัว และส่วนที่เป็นโพรงอากาศขนาดเล็กบางส่วนยุบตัวลงไปทำให้เกิดเพียงรอยร้าวเล็กมาก ๆ ทำให้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ายังสามารถรับกำลังต่อไปและยุบตัวต่อไปได้อีก จนถึงจุด ๆ หนึ่งที่ไม่สามารถรับกำลังต่อไปได้อีกจึงเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจึงมีความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สูงกว่าคอนกรีตปกติ เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติแล้วในขณะที่รับกำลัง มวลรวมหยาบจะมีความแกร่งและด้วยคุณสมบัตินี้จะเกิดการต้านกำลังรวมถึงเกิดรอยร้าวบริเวณส่วนสัมผัสกับมอร์ตาร์ที่เคลือบและยึดเกาะมวลรวมที่เป็นหินเอาไว้ รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า รอยร่ววนั้นจะขยายใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้คอนกรีตปกติไม่สามารถพัฒนากำลังต่อไปได้ แต่จะยังสามารถต้านทานกำลังรับแรงอัดต่อไปได้อีกหลังจากผ่านจุดที่เกิดกำลังรับแรงอัดสูงสุดไปแล้ว แต่กำลังรับแรงอัดจะลดลงในขณะที่ความเครียดยังคงเพิ่มขึ้นแล้วค่อยเกิดการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมของความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตปกติเป็นเส้นโค้งและมีความชันน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส่ามีความเครียดที่จุดวิบัติต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งอาจเกิดจากขนาดของมวลรวมและการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าร์มีผลต่อการต้านทานกำลังรับแรงอัดก่อนเกิดการวิบัติของคอนกรีต

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส่าที่อายุ 56 วัน

จากผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส่าที่แสดงในตารางที่ 4.2 ได้ยกตัวอย่างผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส่าซึ่งทดสอบที่ค่าความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 56 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยยกตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนสามสูตรๆละ 24 ตัวอย่าง รวมเป็น 72 ตัวอย่าง ซึ่งได้นำเสนอในตารางที่ 4.4 เพื่อแสดงค่าความเค้นและความเครียดและเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 และ 56 วัน ส่วนรายละเอียดส่วนที่เหลือได้แสดงผลในภาคผนวก ข

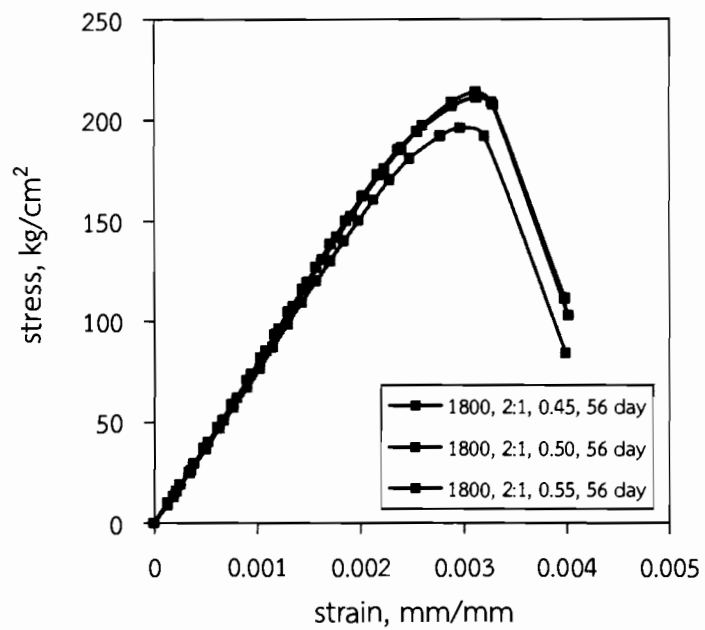
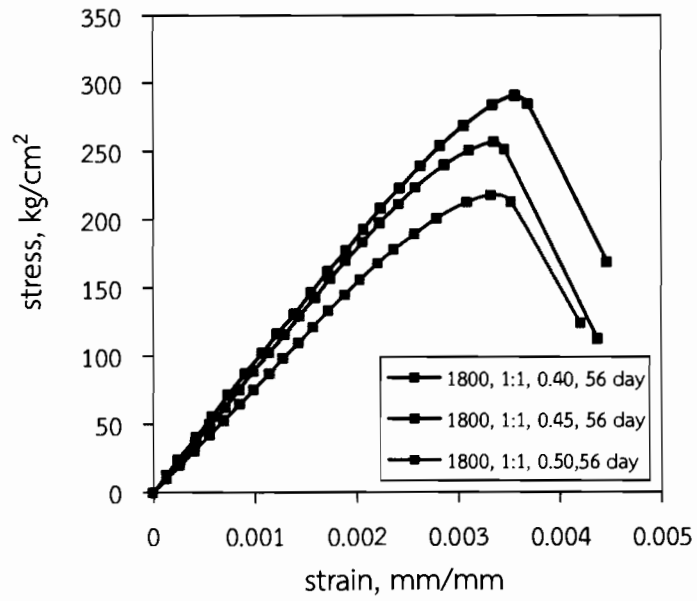
##### 4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน

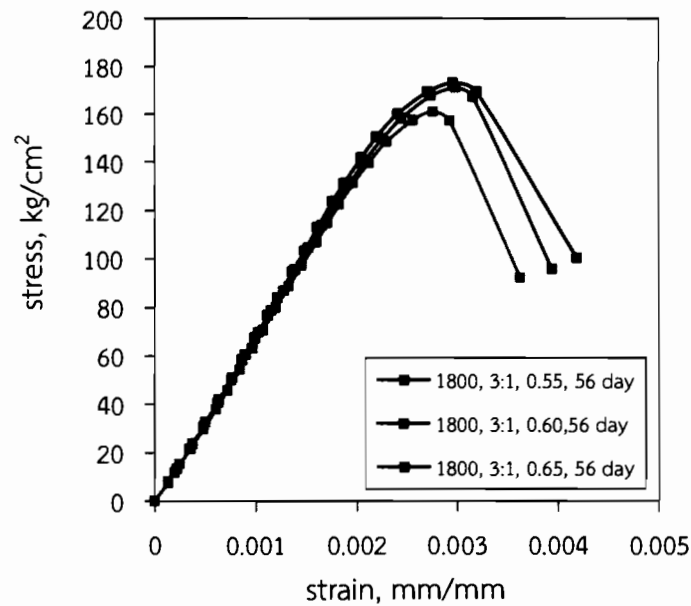
จากผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน ที่แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้เห็นว่าหลังจาก 28 วันคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส่าสามารถพัฒนากำลังได้มากขึ้นแต่ก็ไม่มากนัก

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน

Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 1:1, 56 day												
Mix.	W/C = 0.40				W/C = 0.45				W/C = 0.50			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	317.6	219.4	0.0036	0.0039	263.8	178.8	0.0035	0.0036	231.9	226.0	0.0033	0.0036
2	281.0	256.6	0.0036	0.0039	254.1	229.2	0.0033	0.0040	237.3	81.9	0.0035	0.0051
3	300.4	191.8	0.0037	0.0049	256.3	150.0	0.0032	0.0039	225.7	217.1	0.0032	0.0036
4	294.2	147.5	0.0034	0.0044	278.6	96.3	0.0035	0.0048	241.0	196.8	0.0035	0.0037
5	304.1	111.3	0.0036	0.0047	244.4	84.0	0.0031	0.0040	236.5	158.6	0.0036	0.0043
6	289.7	195.8	0.0037	0.0041	248.0	165.6	0.0032	0.0035	195.8	94.7	0.0032	0.0040
7	296.4	181.3	0.0033	0.0048	282.5	210.0	0.0033	0.0044	218.7	100.0	0.0035	0.0043
8	279.8	144.4	0.0032	0.0051	278.4	96.7	0.0037	0.0048	233.5	102.5	0.0035	0.0047
9	283.4	197.6	0.0036	0.0042	248.0	155.0	0.0029	0.0035	211.4	147.6	0.0031	0.0036
10	275.8	140.7	0.0033	0.0044	262.0	81.3	0.0033	0.0052	226.1	153.9	0.0033	0.0036
11	283.7	168.9	0.0036	0.0046	251.9	94.1	0.0033	0.0047	237.6	87.8	0.0036	0.0049
12	279.5	207.5	0.0035	0.0039	254.0	176.1	0.0033	0.0040	209.7	98.5	0.0032	0.0051
13	288.5	101.8	0.0035	0.0054	267.6	237.3	0.0037	0.0043	245.0	140.5	0.0035	0.0040
14	294.0	228.1	0.0035	0.0040	272.4	134.6	0.0035	0.0043	229.0	114.7	0.0032	0.0041
15	265.0	193.9	0.0035	0.0044	227.8	107.8	0.0031	0.0037	224.6	180.0	0.0031	0.0039
16	284.0	119.2	0.0035	0.0040	263.3	263.3	0.0033	0.0033	226.0	204.0	0.0034	0.0041
17	294.1	134.5	0.0036	0.0048	249.0	115.0	0.0035	0.0044	233.8	127.2	0.0033	0.0048
18	279.0	139.9	0.0038	0.0044	255.6	80.0	0.0037	0.0052	231.7	123.1	0.0035	0.0044
19	299.1	176.0	0.0037	0.0057	252.2	240.7	0.0029	0.0032	197.1	124.8	0.0032	0.0035
20	293.2	278.8	0.0038	0.0039	268.9	193.5	0.0039	0.0043	203.0	132.5	0.0035	0.0039
21	306.5	218.1	0.0039	0.0043	228.9	124.2	0.0029	0.0037	190.4	188.2	0.0033	0.0035
22	290.5	192.2	0.0033	0.0039	276.5	112.1	0.0037	0.0049	207.0	125.0	0.0033	0.0041
23	302.4	193.9	0.0037	0.0039	257.0	125.2	0.0032	0.0037	192.6	110.0	0.0028	0.0036
24	310.3	151.7	0.0036	0.0044	228.0	114.9	0.0032	0.0041	189.5	86.3	0.0033	0.0036

#### 4.4.2 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อายุ 56 วัน





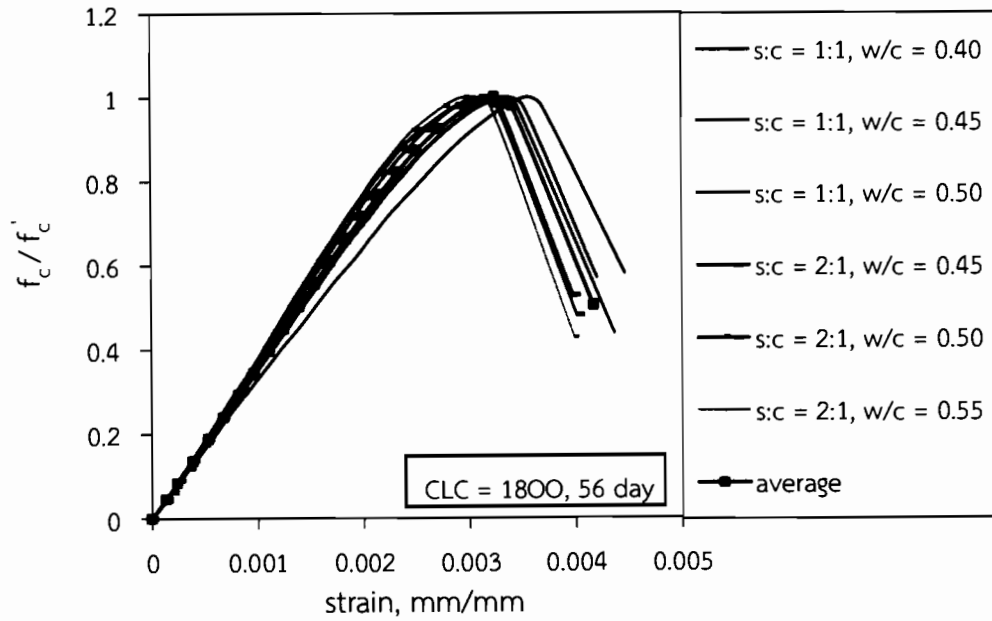
ภาพที่ 4.10 ความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยที่อัตราส่วน S:C = 1:1, 2:1 และ 3:1 ที่อายุ 56 วัน

จากภาพที่ 4.10 พบว่าพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีค่าความเค้นที่สูงกว่าตัวอย่างที่ผลิตที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความเค้นและความเครียดอย่างชัดเจน ส่วนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลน้อยมาก กำลังที่ได้แทบจะไม่แตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาคผนวก ข

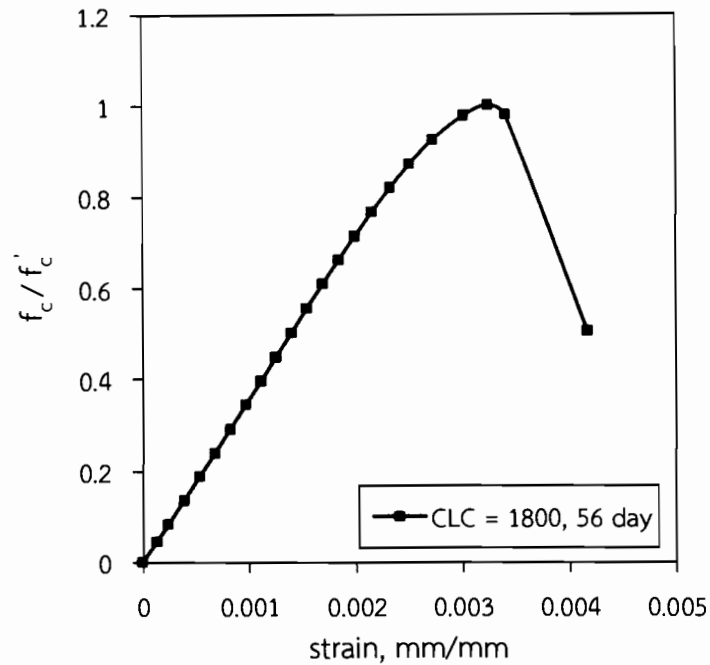
#### 4.4.3 การสร้างกราฟความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน

จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ดังภาพที่ 4.10 ชุดข้อมูลที่จะนำมาใช้สร้างเส้นความสัมพันธ์นี้ เป็นข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ทำกรทดสอบที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 เนื่องจากสามารถพัฒนากำลังได้มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3:1 จะไม่นำมาพิจารณาด้วยเนื่องจากมีผลการทดสอบที่ได้กำลังไม่สูงพอ ในการนำมาพิจารณาเพื่อเป็นตัวแทนในการสร้างสมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด การเฉลี่ยของชุดข้อมูลได้แสดงดังภาพที่ 4.11





ก. การเฉลี่ยความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ 2:1



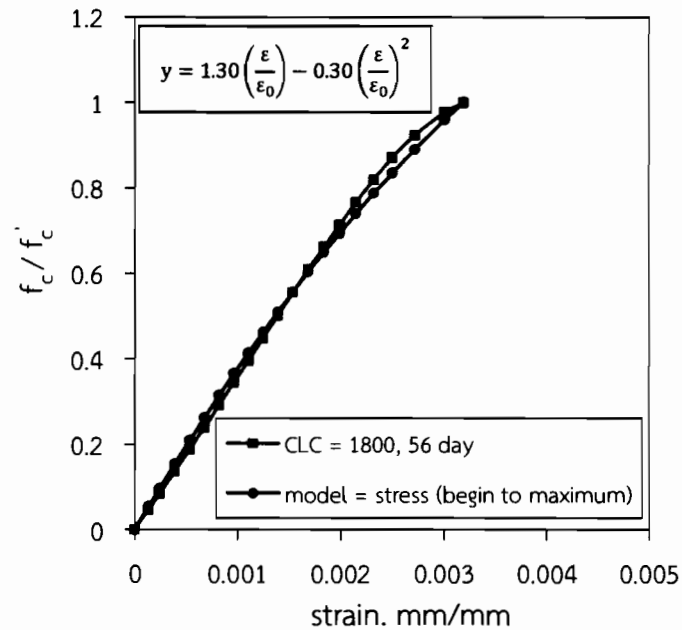
ข. เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเฉลี่ย

ภาพที่ 4.11 ความเครียดเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน

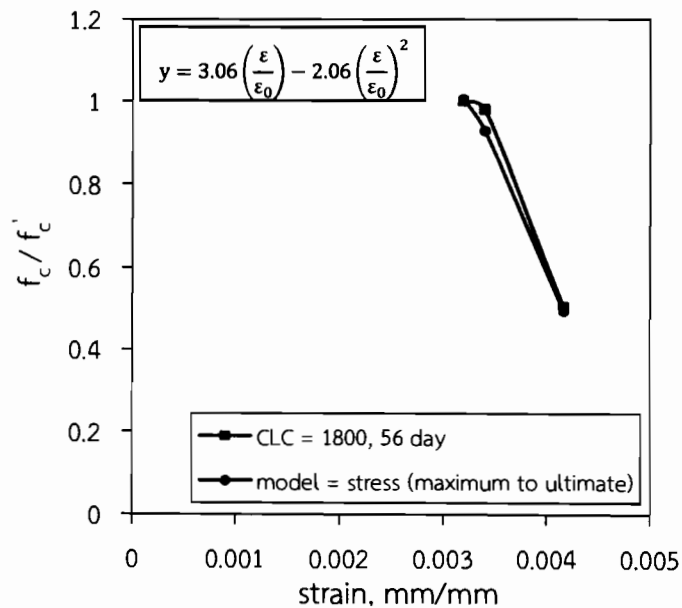
จากภาพที่ 4.11 เมื่อพิจารณาความเครียดเฉลี่ยที่ได้จากการเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ทำการศึกษาทดสอบที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ

56 วัน มีค่าความเครียดเฉลี่ยที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.0032 และที่จุดวิบัติประมาณ 0.0042

การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด สามารถเขียนกราฟได้ ดังภาพที่ 4.12



ก. จำลองความเครียดที่จุดศูนย์ถึงจุดสูงสุด



ข. จำลองความเครียดที่จุดสูงสุดถึงจุดวิบัติ

ภาพที่ 4.12 จำลองความสัมพันธ์เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่อายุ 56 วัน

จากภาพที่ 4.12 สมการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่รับกำลังอัดสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 1.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

สมการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดตั้งแต่จุดที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ แสดงในสมการที่ 4.4

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

เมื่อ  $f_c$  คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$f_c'$  คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

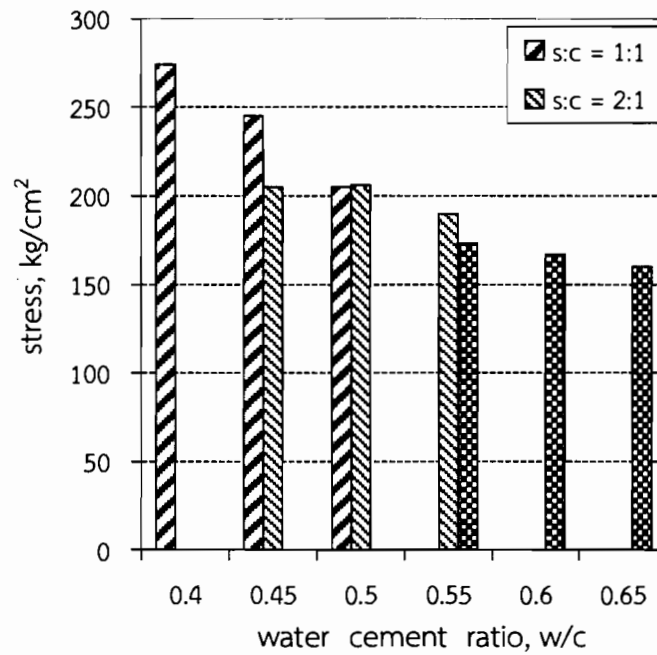
$\epsilon$  คือ ความเครียดของคอนกรีต

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด

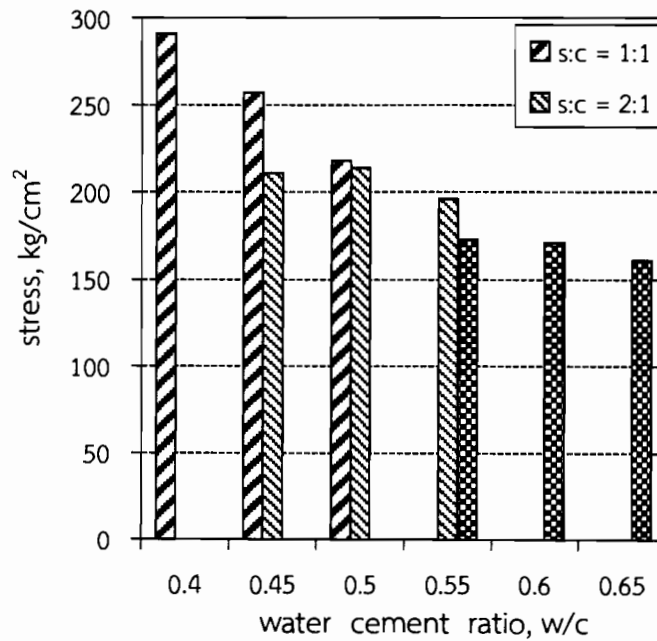
จากสมการที่เป็นตัวแทนของการทำนายพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า พบว่าสมการที่ได้แทบจะไม่แตกต่างจากสมการที่จำลองพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน ลักษณะของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบจะเป็นแบบพาราโบลา สมการที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมเส้นโค้งเป็นสมการกำลังสอง ผลการเปรียบเทียบความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งมีผลเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ทดสอบที่อายุ 28 วัน

#### 4.5 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์

##### 4.5.1 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด



ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4.14 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน

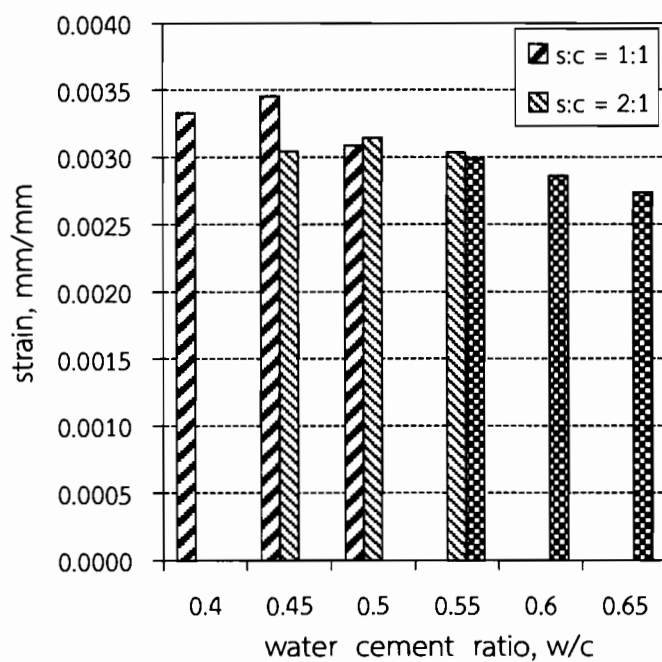
จากผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.13 ถึง 4.14 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มากกว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ต่ำกว่า ซึ่งตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.13 ถึง 4.14 เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกัน ซึ่งเป็นผลการทดสอบที่ 28 และ 56 วัน พบว่าผลของอัตราส่วนทรายต่อกำลังรับแรงอัดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า กรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 2:1 และ 3:1 พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าแต่แตกต่างกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45

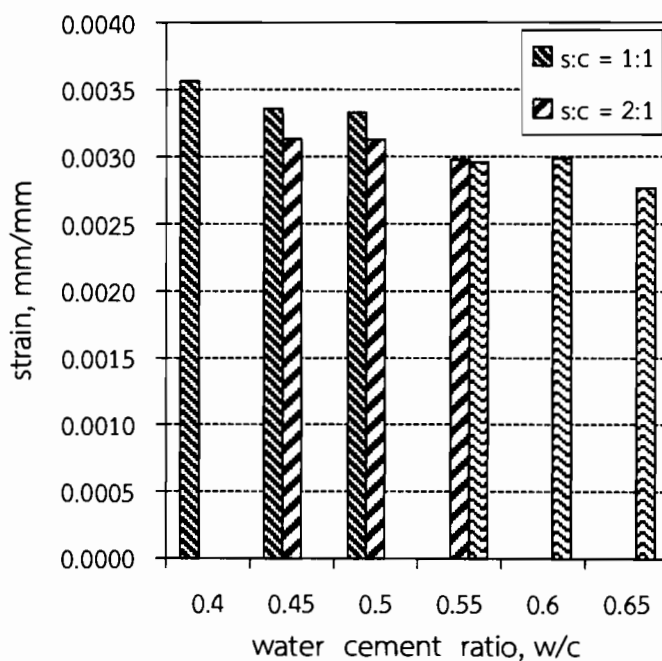
ปัจจัยที่ส่งผลให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มากกว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ต่ำกว่า อาจเป็นเพราะความแข็งแรงของซีเมนต์เกิดจากการยึดเกาะตัวของซีเมนต์เพสต์ การเพิ่มทรายเข้าไปผสมซึ่งเรียกว่ามอร์ตาร์ทำให้การยึดเกาะตัวมีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงหรือกำลังลดลง นอกจากนี้ อิทธิพล รัตนมงคลทิพย์ (2553) ได้ให้เหตุผลว่าปริมาณทรายที่มากทำให้การเคลือบของมอร์ตาร์ไม่เพียงพอต่อการยึดเกาะ ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างช่องว่างของฟองอากาศทำให้ก้อนตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ

สรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มีผลต่อกำลังรับแรงอัดหรือความเค้นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดจะแปรผกผันกับปริมาณทราย กรณีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของทรายที่สูงกว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าซึ่งสอดคล้องกับ Hamidah and et al. (2005) โดยให้เหตุผลว่าปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง นอกจากนี้ขนาดคละหรือความละเอียดของทรายก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน ตัวอย่างที่มีขนาดคละของทรายที่ดีเม็ดทรายมีหลายขนาด ก็ส่งผลให้มีความสามารถรับกำลังได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีขนาดคละไม่ดีซึ่งเม็ดทรายมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งทรายที่มีขนาดคละที่ดีเมื่อทำการผสมมอร์ตาร์ เม็ดทรายจะสามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างของมวลรวมในมอร์ตาร์ได้ดี ทำให้ช่องว่างมีขนาดเล็กส่งผลให้สามารถต้านทานกำลังได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับ Kunhanandan Nambiar and et al. (2006) โดยให้เหตุผลว่าความละเอียดของทรายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

#### 4.5.2 ผลของอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่อความเครียด



ภาพที่ 4.15 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4.16 ผลของอัตราส่วน S:C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน

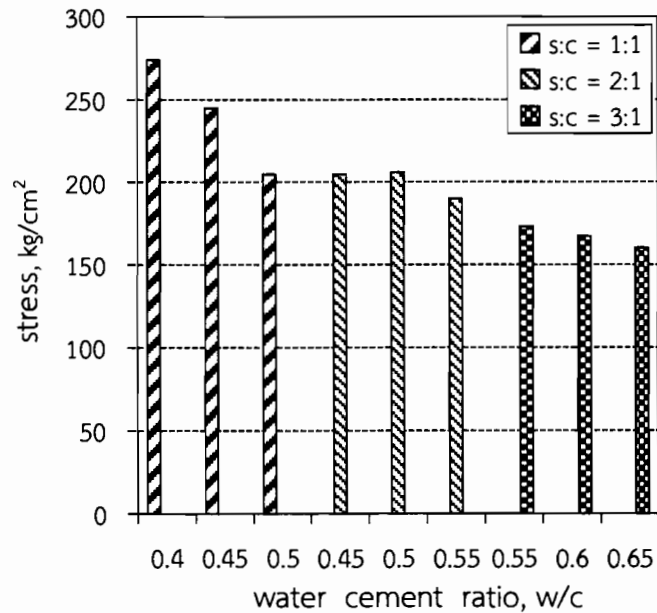
จากผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.15 ถึง 4.16 พบว่าอัตราส่วนผสมทรายต่อซีเมนต์มีผลต่อความเครียดของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าจะมีความเครียดสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่สูงกว่า ซึ่งตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ให้ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 เป็นผลการทดสอบที่ 28 วัน พบว่าผลของอัตราส่วนทรายต่อความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีแนวโน้มของค่าความเครียดที่สูงกว่า กรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 พบว่าค่าความเครียดมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.55 มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 2:1 และ 3:1 พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่าความเครียดที่มีแนวโน้มที่สูงกว่าแต่แตกต่างกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ซึ่งความเครียดจะมีความสอดคล้องกับความเค้น (กำลังรับแรงอัด) นั่นคือค่าความเค้นสูงจะทำให้ค่าความเครียดสูงตามไปด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคือความเครียดจะแปรผันโดยตรงกับความเค้น ซึ่งผลการทดสอบที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มส่วนมากที่มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.16

สรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มีผลต่อความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า กรณีที่อัตราส่วนผสมของน้ำที่เท่ากัน เนื่องจากความเครียดจะแปรผันโดยตรงกับความเค้น ดังนั้นตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของทรายที่สูงกว่าจะมีความเค้นที่ต่ำกว่าและทำให้ค่าความเครียดต่ำไปด้วย นั่นคือปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเครียดลดลง

## 4.6 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

### 4.6.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด

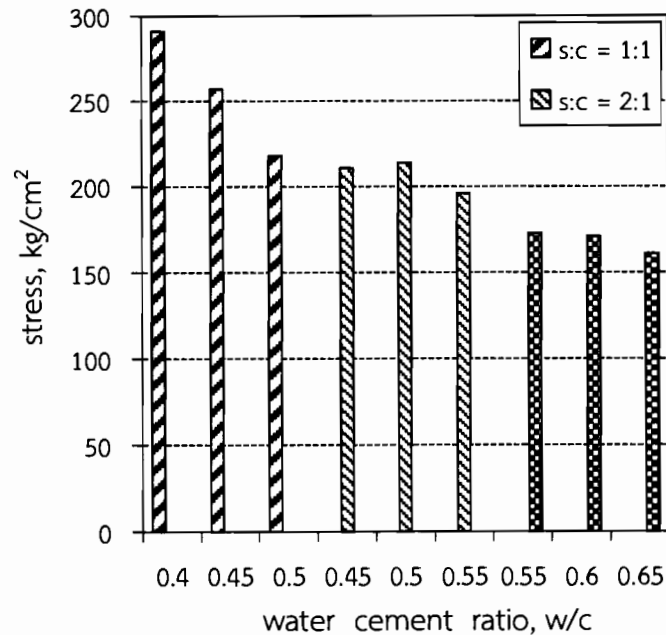


ภาพที่ 4.17 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.17 ถึง 4.18 พบว่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อกำลังรับแรงอัดหรือความเค้นของคอนกรีต คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่าจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน พบว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อกำลังรับแรงอัดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุด จะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกันคือเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 และ 3:1 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันแต่จะแตกต่างกันไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึง 4.18 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของตัวอย่างที่อายุ 28 และ 56 วัน



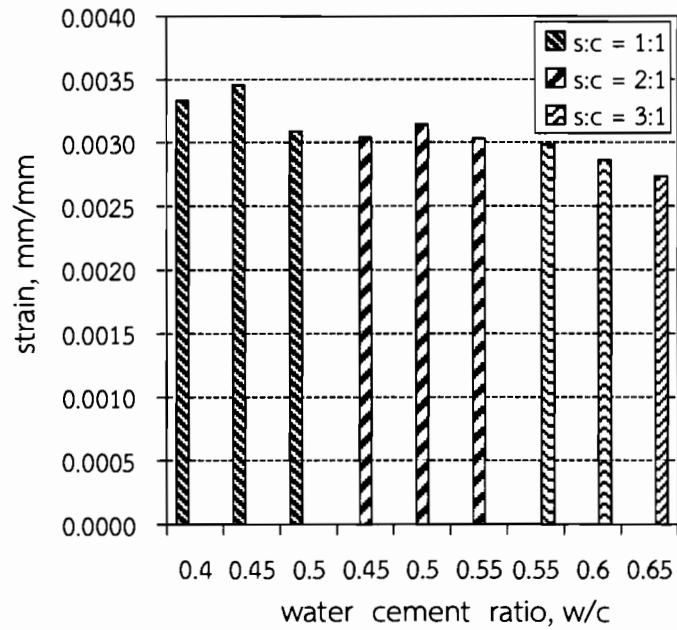


ภาพที่ 4.18 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน

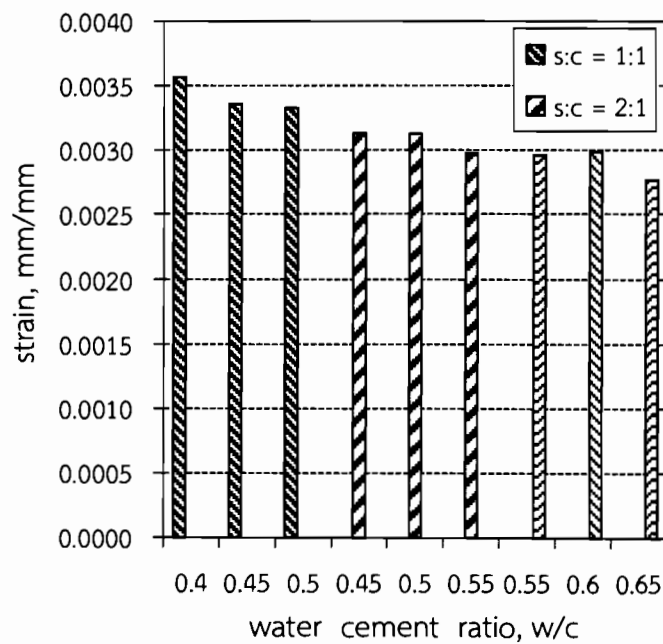
ในกรณีที่ตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 แต่ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.50 มีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 อาจเกิดจากการใช้ปริมาณน้ำน้อยเกินไปทำให้โฟมเหลวและมอร์ตาร์ผสมกันได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งการผสมคอนกรีตที่ค่อนข้างข้นอาจทำให้ฟองอากาศสลายตัวหรือแตกตัวไปหรือมอร์ตาร์ไม่สามารถยึดเกาะกับฟองอากาศทำให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อคอนกรีตซึ่งจุดบกพร่องเป็นปัจจัยที่ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

สรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส กรณีที่อัตราส่วนผสมของทรายที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำที่สูงกว่าจะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่า ซึ่งผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งกรณีทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน นั่นคือปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ปัจจัยของน้ำที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตชนิดนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamidah and et al. (2005) และนอกจากนี้ Kearsley and Mostert (2005) ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตชนิดนี้ อย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.6.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อความเครียด



ภาพที่ 4.19 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 4.20 ผลของอัตราส่วน W/C ต่อความเครียดของคอนกรีตที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 56 วัน

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 4.19 ถึง 4.20 พบว่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความเครียดของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยกว่าจะมีค่าความเครียดที่มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากกว่า โดยที่มีอัตราส่วนทรายเท่ากัน

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ผลิตโดยใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากันแต่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน พบว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีความชัดเจนที่สุดในกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 3:1 เมื่อพิจารณาที่ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดกับปริมาณน้ำที่มากที่สุด ส่วนกรณีของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ให้ค่าความเครียดที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดแตกต่างกันไม่มาก ดังแสดงในภาพที่ 4.19

จากภาพที่ 4.19 กรณีที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 กับกรณีที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 มีความเครียดที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับระหว่างตัวอย่างที่ใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่ากับปริมาณน้ำที่น้อยกว่า อาจเป็นเพราะการใช้ค่าเฉลี่ยซึ่งแต่ละสูตรทดสอบจะเฉลี่ยผลทดสอบทั้ง 24 ตัวอย่างเพื่อให้ได้ตัวแทนของค่าเฉลี่ยมาหนึ่งค่า ซึ่งบางตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำที่สูงกว่ามีค่าความเครียดสูงกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำที่ต่ำกว่า ซึ่งจะต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบความเครียด แต่เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มโดยรวมโดยพิจารณาที่การใช้ปริมาณน้ำที่มากที่สุดกับปริมาณน้ำที่น้อยสุดที่อัตราส่วนทรายที่เท่ากัน

สรุปได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า กรณีที่อัตราส่วนผสมของทรายที่เท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำที่สูงกว่าจะมีความเครียดที่มีแนวโน้มโดยรวมที่ต่ำกว่า นั่นคือความเครียดจะแปรผกผันกับปริมาณน้ำ ดังนั้นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเครียดลดลง

#### 4.5 สรุปผล

ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ค่าความหนาแน่น 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 และ 0.65 ทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ 28 วัน มีค่าประมาณ 190-274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความเครียดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ 28 วัน ที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.0032 และ 0.0040 ตามลำดับและมีสมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อายุ 28 วัน คือ

กรณีเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่รับกำลังอัดสูงสุด

$$f_c = f_c \cdot \left[ 1.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

กรณีหลังจากจุดที่รับกำลังอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

ค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ 56 วัน มีค่าประมาณ 196-291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความเครียดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ 56 วัน ที่จุดกำลังอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.0032 และ 0.0042 ตามลำดับ มีสมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อายุ 56 วัน คือ

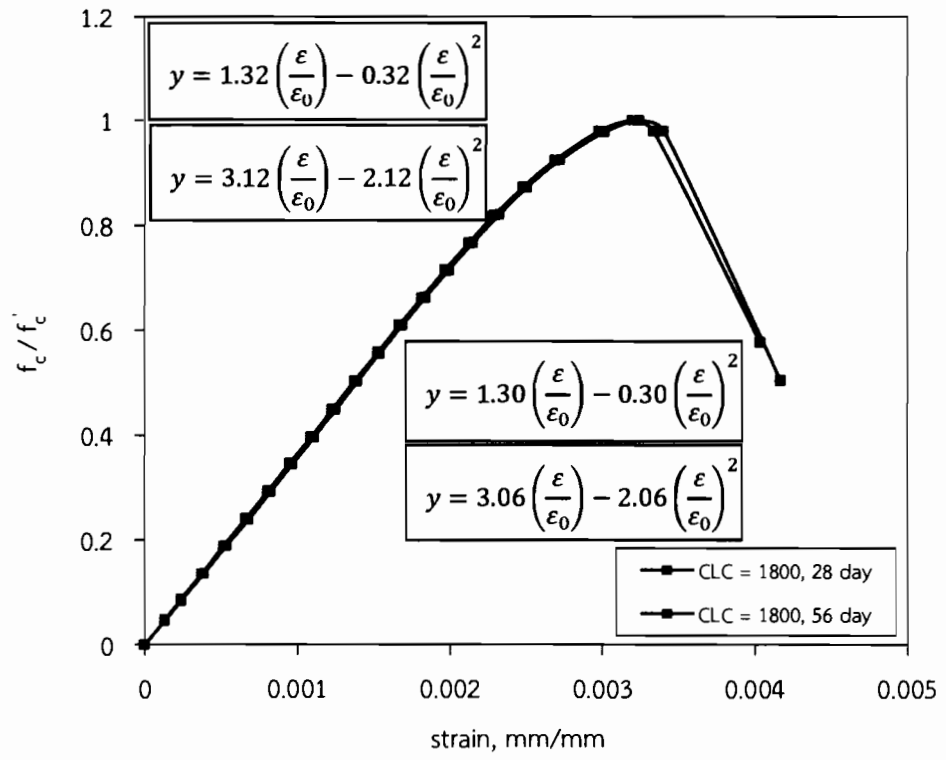
กรณีเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่รับกำลังอัดสูงสุด

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 1.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

กรณีหลังจากจุดที่รับกำลังอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

สมการจำลองและพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แสดงดังกราฟต่อไปนี้



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากกระบวนการทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษาและทำการทดสอบในหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของเส้นโค้ง โดยทดสอบที่ความหนาแน่นเปียก 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 และ 56 วัน รวม 540 ตัวอย่าง ในบทนี้จึงทำการสรุปผลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดดังนี้

#### 5.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถอธิบายและสรุปเกี่ยวกับเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า มีลักษณะของความสัมพันธ์กันเชิงพาราโบลา

5.1.2 ค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน มีค่าประมาณ 190-274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ 56 วัน มีค่าประมาณ 196-291 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.1.3 ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.0032 และ 0.0040 ตามลำดับ และความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่จุดกำลังรับแรงอัดสูงสุดและจุดวิบัติมีค่าประมาณ 0.0032 และ 0.0042 ตามลำดับ

5.1.4 สมการที่ใช้จำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน คือ

กรณีเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่รับกำลังอัดสูงสุด

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 1.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.32 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

กรณีหลังจากจุดที่รับกำลังอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.12 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

5.1.5 สมการที่ใช้จำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่อายุ 56 วัน คือ

กรณีเริ่มต้นรับกำลังอัดจนถึงจุดที่รับกำลังอัดสูงสุด

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 1.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 0.30 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

กรณีหลังจากจุดที่รับกำลังอัดสูงสุดจนถึงจุดวิบัติ

$$f_c = f_c' \cdot \left[ 3.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 2.06 \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

5.1.6 คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีค่าความเครียดสูงกว่าคอนกรีตปกติ

## 5.2 ข้อเสนอการออกแบบงานโครงสร้างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปเกี่ยวกับข้อเสนอการออกแบบในงานโครงสร้างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าได้ดังนี้

5.2.1 อัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเพื่อใช้ในงานโครงสร้าง ผลิตด้วยอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1

5.2.2 ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า สำหรับใช้ประกอบการพิจารณาออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างมีค่าประมาณ 0.003-0.004

## 5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จากข้อมูลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ดังนี้

5.3.1 ความเครียดจะแปรผันตรงกับความเค้น ซึ่งถ้าคอนกรีตมีค่าความเค้นที่จุดสูงสุดที่สูงก็จะมีค่าความเครียดที่จุดสูงสุดที่สูงตามไปด้วย

5.3.2 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเค้นลดลง ซึ่งจะทำให้ความเครียดมีค่าลดลงตามไปด้วย

5.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเค้นลดลงซึ่งจะทำให้ความเครียดลดลงตามไปด้วย

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเป็นเพียงการศึกษาในเบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของความเค้น-ความเครียดซึ่งไม่ครอบคลุมเงื่อนไขอื่น ๆ นอกเหนือจากขอบเขตการศึกษาจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.4.1 ควบคุมตรวจสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เท่ากันให้มากที่สุด ในการผสมตัวอย่างในแต่ละครั้ง เพื่อลดข้อผิดพลาดของผลการทดสอบ เนื่องจากหน่วยน้ำหนักที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อค่าความเค้นและความเครียด

5.4.2 เนื่องจากการทดสอบในครั้งนี้แม้มีการเก็บตัวอย่างและทดสอบตัวอย่างในแต่ละสูตรผสมมากพอสมควร แต่ก็ยังเป็นเพียงผลการทดสอบแค่ส่วนหนึ่งซึ่งต้องมีการศึกษาตัวอย่างทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการทดสอบ

5.4.3 ศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ผลิตภัณฑ์น้ำยาผลิตฟองอากาศตัวอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อย เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างที่เป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าต่อไป

5.4.4 ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนการประยุกต์ใช้สมการจำลองพฤติกรรมของเส้นโค้งที่สามารถทำนายผลได้แม่นยำมากขึ้น ให้เหมาะสมกับการพิจารณาออกแบบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า



เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- แก้วตา ตี๋ยิง และคณะ. “กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า”, ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4. น.109-114. อุบลราชธานี: โรงแรมลายทอง, 2551.
- กิตติธัช หมูทอง และคณะ. “การทดสอบประเมินกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเสริมเหล็ก”, ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16. น.STR0112. ชลบุรี: โรงแรมเดอะชาयน์, 2554.
- ชยันต์ เจริญพร และสุเชษฐ์ เอี่ยมเขย. การศึกษาคุณสมบัติของ Cellular Concrete เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลเบา. ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง: กระทรวงคมนาคม, 2542.
- ธนากร ทวีวุฒิ และคณะ. “กำลังรับแรงดึงแยกและโมดูลัสการแตกร้าวของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า”, ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. น.1673-1678. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ. “กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า”, ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4. น.144-149. อุบลราชธานี: โรงแรมลายทอง, 2551.
- \_\_\_\_\_. “การทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเสริมเหล็ก”, ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 5. น.STR02. นครราชสีมา: โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท, 2552.
- \_\_\_\_\_. “การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า”, ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 6. น.MAT42. เพชรบุรี: โรงแรมแกรนด์ แอซิฟิค ซอฟเฟอริน รีสอร์ท แอนด์สปา, 2553.
- นระ คมนามูล. วัสดุและการทดสอบแบบไม่ทำลายในงานวิศวกรรมโยธา. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2547.
- ปภาวิน สินรัมย์. กำลังรับแรงอัดและคุณสมบัติสำหรับใช้งานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- ไพฑูรย์ ประสมศรี. วัสดุศาสตร์. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม: สถาบันราชภัฏเพชรบุรี, 2543.
- วินิต ช่อวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- วีระ หอสกุลไทย. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544.
- สถาพร โภคา. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (วิธีกำลัง). กรุงเทพฯ: ไลบรารี นาย, 2546.
- อทธิเชษฐ์ อุดะธีวิชญ์. คุณสมบัติสำหรับการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553.

### เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- อิทธิพล รัตนมงคลทิพย์. โมดูลสียืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวของของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2553.
- Hamidah, M.S. and et al. "Optimisation of foamed concrete mix of different sand-cement ratio and curing conditions", in **Use of Foamed Concrete in Construction**. P.37-44. Scotland: University of Dundee, 2005.
- Kearsley, E.P. and Mostert, H.F. "Designing mix composition of foamed concrete with high fly ash contents", in **Use of Foamed Concrete in Construction**. University of Dundee: Scotland, 2005.
- Kunhanandan Nambiar, E.K. and Ramamurthy, K. "Influence of filler type on the properties of foam concrete", **Cement & Concrete Composites**. 28: 475-480; January, 2006.
- Ramamurthy, K. and et al. "A classicfication of studies on properties of foam concrete", **Cement&Concrete Composites: Elsevie**. 31: 388-396; April, 2009.
- Narayanan, N. and Ramamurthy, K. "Structure and properties of aerated concrete: Review", **Cement&Concrete Composites: Elsevie**. 22: 321-329; April, 2000.
- Wight, J.K. and Macgregor, J.G. **Reinforced Concrete**. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey: Pearson Education, 2012.
- Oztekın, E. and et al. M. "Determınation of rectangular stress block parameters for high performance concrete", **Engineering Structure**. 25: 371-376, 2003
- Neville, A.M. **Properties of Concrete**. 4<sup>th</sup> ed. Harlow: Pearson Education, 1998.
- Park, R. and Paulay, T. **Reinforced Concrete Structure**. Christchurch, New Zealand: Department of Civil Engineering, University of Canterbury, 1974
- Wee, T.H. and et al. "Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression", **Journal of Materials in Civil Engineering**. 8: 70-76; May, 1996.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การออกแบบอัตราส่วนผสมและคุณสมบัติของวัสดุ

### 1. การออกแบบอัตราส่วนผสม

การออกแบบอัตราส่วนผสมเพื่อต้องการให้ได้หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีรายละเอียดปริมาณของวัสดุในการผลิตตัวอย่างดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

วันที่	ความหนาแน่น กก/ม <sup>3</sup> .	S:C	W/C	ผสมครั้งที่	ปริมาณส่วนผสม				ปริมาณคอนกรีต ม <sup>3</sup> .	จำนวนตัวอย่างทดสอบ		
					ซีเมนต์ กก.	ทราย กก.	น้ำ ลิตร	น้ำยาโฟม ลิตร		น้ำผสมน้ำยาโฟม ลิตร	ทดสอบที่ 28 วัน	ทดสอบที่ 56 วัน
15 ธ.ค. 56	1,800	1:1	0.45	1	80	80	36	0.009	0.427	0.093	8	7
				2	80	80	36	0.009	0.427	0.093	7	8
				3	80	80	36	0.009	0.427	0.093	8	7
				4	80	80	36	0.009	0.427	0.093	7	8
				รวม	320	320	144	0.034	1.708	0.372		
28 ธ.ค. 56	1,800	1:1	0.40	1	84	84	33.6	0.010	0.495	0.093	8	7
				2	84	84	33.6	0.010	0.495	0.093	7	8
				3	84	84	33.6	0.010	0.495	0.093	8	7
				4	84	84	33.6	0.010	0.495	0.093	7	8
				รวม	336	336	134.4	0.040	1.980	0.372		
11 ม.ค. 57	1,800	1:1	0.50	1	77	77	38.5	0.007	0.369	0.093	8	7
				2	77	77	38.5	0.007	0.369	0.093	7	8
				3	77	77	38.5	0.007	0.369	0.093	8	7
				4	77	77	38.5	0.007	0.369	0.093	7	8
				รวม	308	308	154	0.028	1.476	0.372		

ตารางที่ ก.1 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ต่อ)

วันที่	ความหนาแน่น กก./ม. <sup>3</sup>	S:C	W/C	ผสมครั้งที่	ปริมาณส่วนผสม					ปริมาณคอนกรีต ม. <sup>3</sup>	จำนวนตัวอย่างทดสอบ	
					ซีเมนต์ กก.	ทราย กก.	น้ำ ลิตร	น้ำยาโฟม ลิตร	น้ำผสมน้ำยาโฟม ลิตร		ทดสอบที่ 28 วัน	ทดสอบที่ 56 วัน
18 ม.ค. 57	1,800	2:1	0.50	1	58	116	29	0.011	0.532	0.093	8	7
					58	116	29	0.011	0.532	0.093	7	8
					58	116	29	0.011	0.532	0.093	8	7
					58	116	29	0.011	0.532	0.093	7	8
					รวม	232	464	116	0.044	2.128	0.372	
26 ม.ค. 57	1,800	2:1	0.45	1	60	120	27.0	0.012	0.584	0.093	8	7
					60	120	27.0	0.012	0.584	0.093	7	8
					60	120	27.0	0.012	0.584	0.093	8	7
					60	120	27.0	0.012	0.584	0.093	7	8
					รวม	240	480	108.0	0.048	2.336	0.372	
1 ก.พ. 57	1,800	2:1	0.55	1	56	112	30.8	0.010	0.483	0.092	8	7
					56	112	30.8	0.01	0.483	0.092	7	8
					56	112	30.8	0.01	0.483	0.092	8	7
					56	112	30.8	0.01	0.483	0.092	7	8
					รวม	224	448	123	0.040	1.932	0.368	

ตารางที่ ก.1 สูตรผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (ต่อ)

วันที่	ความหนาแน่น ก/ม. <sup>3</sup>	S:C	W/C	ผลครั้งที่	ปริมาณส่วนผสม					ปริมาณคอนกรีต ม. <sup>3</sup>	จำนวนตัวอย่างทดสอบ	
					ซีเมนต์ กก.	ทราย กก.	น้ำ ลิตร	น้ำยาโฟม ลิตร	น้ำผสมน้ำยาโฟม ลิตร		ทดสอบที่ 28 วัน	ทดสอบที่ 56 วัน
9 ก.พ. 57	1,800	3:1	0.60	1	45	135	27	0.011	0.561	0.094	8	7
					45	135	27	0.011	0.561	0.094	7	8
					45	135	27	0.011	0.561	0.094	8	7
					45	135	27	0.011	0.561	0.094	7	8
					รวม	180	540	108	0.044	2.244	0.376	
14 ก.พ. 57	1,800	3:1	0.55	1	46	138	25.3	0.012	0.599	0.094	8	7
					46	138	25.3	0.012	0.599	0.094	7	8
					46	138	25.3	0.012	0.599	0.094	8	7
					46	138	25.3	0.012	0.599	0.094	7	8
					รวม	184	552	101.2	0.048	2.396	0.376	
16 ก.พ. 57	1,800	3:1	0.65	1	44	132	28.6	0.010	0.524	0.094	8	7
					44	132	28.6	0.01	0.524	0.094	7	8
					44	132	28.6	0.01	0.524	0.094	8	7
					44	132	28.6	0.01	0.524	0.094	8	8
					รวม	176	528	114	0.040	2.096	0.376	



## 2. คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส มีรายละเอียดดังตารางที่ ก.2 ถึง ก.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ ก.2 การทดสอบขนาดผลของทรายและค่าโมดูลัสความละเอียด

ตัวอย่าง.1 ทราย 500 กรัม							
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง(ก.)	น้ำหนักทราย + ตะแกรง(ก.)	น้ำหนักทราย (ก.)	เปอร์เซ็นต์ ค้าง	เปอร์เซ็นต์ ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ ผ่านสะสม	ข้อกำหนด
# 4	750.63	750.63	0.00	0	0.00	100.00	95 - 100
# 8	699.78	731.71	31.93	6.39	6.39	93.61	80 - 100
# 16	629.66	676.41	46.75	9.35	15.74	84.26	50 - 85
# 30	600.88	678.15	77.27	15.46	31.20	68.80	25 - 60
# 50	544.07	747.04	202.97	40.61	71.80	28.20	10 - 30
# 100	520.29	651.01	130.72	26.15	97.96	2.04	2 - 10
# 200	507.53	515.61	8.08	1.62	99.57	0.43	
ถาดรอง	471.50	473.64	2.14	0.43	100.00	0.00	
		รวม	499.86	F.M. =	2.231		
ตัวอย่าง.2 ทราย 500 กรัม							
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง(ก.)	น้ำหนักทราย + ตะแกรง(ก.)	น้ำหนักทราย (ก.)	เปอร์เซ็นต์ ค้าง	เปอร์เซ็นต์ ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ ผ่านสะสม	ข้อกำหนด
# 4	750.58	751.15	0.57	0.11	0.11	99.89	95 - 100
# 8	699.70	737.97	38.27	7.65	7.77	92.23	80 - 100
# 16	629.57	678.90	49.33	9.86	17.63	82.37	50 - 85
# 30	600.72	682.49	81.77	16.35	33.98	66.02	25 - 60
# 50	543.95	746.30	202.35	40.46	74.44	25.56	10 - 30
# 100	520.20	641.25	121.05	24.20	98.64	1.36	2 - 10
# 200	507.44	512.90	5.46	1.09	99.73	0.27	
ถาดรอง	471.42	472.75	1.33	0.27	100.00	0.00	
		รวม	500.13	F.M. =	2.326		

ตารางที่ ก.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของมวลรวมละเอียด

วันที่ทดลอง 24/11/1956		ลักษณะของทรายตัวอย่าง ทรายแม่น้ำขนาดหยาบ	
อุณหภูมิที่ทดสอบ 24.85 องศาเซลเซียส			
การกำหนดค่าต่างๆ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	
น้ำหนักของถาด (ก.)	1024.5	898.44	
น้ำหนักของถาดกับทรายอบแห้ง (ก.)	1523.03	1396.67	
ปริมาตรของขวดแก้วพิคมิโนเตอร์ (มล.)	1000	1000	
น้ำหนักของขวดแก้วพิคมิโนเตอร์ (ก.)	309.31	224.78	
น้ำหนักน้ำที่เติมทั้งหมด (ก.)	808.6	808.19	
A: น้ำหนักของทรายหลังจากอบแห้ง (ก.)	498.53	498.23	
B: น้ำหนักของขวดแก้วพิคมิโนเตอร์ ที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)	1308.24	1222.84	
C: น้ำหนักของขวดแก้วพิคมิโนเตอร์ ที่ใส่ทรายและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)	1617.91	1532.99	
S: น้ำหนักของทรายที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (ก.)	500	500.02	
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)	2.62	2.62	
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity-SSD)	2.63	2.63	
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Aparent specific gravity)	2.64	2.65	
ร้อยละการดูดน้ำของทราย (Absorption, %)	0.29	0.36	
ความถ่วงจำเพาะรวมเฉลี่ย (Average Bulk specific gravity)	2.62		
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้งเฉลี่ย (Average Bulk specific gravity-SSD)	2.63		
ความถ่วงจำเพาะปรากฏเฉลี่ย (Average Aparent specific gravity)	2.64		
ร้อยละการดูดน้ำของทรายเฉลี่ย (Average Absorption, %)	0.33		

ตารางที่ ก.4 การทดสอบปริมาณดินและฝุ่นผงในทรายโดยวิธีตกตะกอน

วันที่ทดลอง 16/11/1956									
ตัวอย่าง ที่	ความสูงของทรายและดินเหนียว (ซม.)				ความสูงของทราย (ซม.)				ค่าทราย สมบูรณ์ (%)
	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย	วัดครั้งที่1	วัดครั้งที่2	วัดครั้งที่3	เฉลี่ย	
1	9.590	9.340	9.422	9.451	9.242	9.182	9.324	9.249	97.87
2	10.500	9.910	9.906	10.105	9.920	9.800	9.708	9.809	97.07

ตารางที่ ก.5 การทดสอบสารอินทรีย์ที่เจือปนในทราย

วันที่ทดลอง 16/11/1956			
ตัวอย่างที่	สีของน้ำยาเมื่อเทียบกับแผ่นเทียบสี	มีผลต่อคอนกรีตหรือไม่	หมายเหตุ
1	ระดับที่1	ไม่มีผล	
2	ระดับที่1	ไม่มีผล	

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า**

1. การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า  
ผลการทดสอบความเค้น-ความเครียดที่จุดสูงสุดและจุดวิบัติสามารถสรุปดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 2:1 และ  
W/C = 0.45, 0.05 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน

Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 2:1, 28 day												
Mix.	W/C = 0.45				W/C = 0.50				W/C = 0.55			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	203.7	80.1	0.0031	0.0043	198.8	127.2	0.0032	0.0040	185.5	93.4	0.0029	0.0041
2	216.2	104.7	0.0028	0.0037	188.3	90.0	0.0029	0.0041	190.0	114.4	0.0031	0.0041
3	205.5	80.2	0.0031	0.0041	193.1	106.5	0.0031	0.0045	180.0	167.7	0.0029	0.0032
4	216.3	110.0	0.0031	0.0043	203.6	202.1	0.0032	0.0033	185.0	80.6	0.0031	0.0045
5	186.3	91.3	0.0028	0.0040	208.1	106.3	0.0029	0.0039	193.7	42.5	0.0033	0.0041
6	193.8	107.0	0.0028	0.0040	224.2	202.2	0.0035	0.0037	185.8	100.0	0.0029	0.0044
7	206.0	88.0	0.0031	0.0043	214.1	85.8	0.0031	0.0040	180.0	74.0	0.0028	0.0044
8	120.0	98.0	0.0032	0.0051	203.2	134.8	0.0032	0.0035	180.0	116.4	0.0031	0.0036
9	183.9	132.6	0.0032	0.0040	201.0	60.0	0.0032	0.0045	210.2	139.2	0.0035	0.0040
10	192.7	83.7	0.0029	0.0041	183.0	102.9	0.0031	0.0044	204.1	128.0	0.0033	0.0040
11	205.3	205.3	0.0028	0.0028	217.2	103.0	0.0032	0.0037	192.9	70.0	0.0029	0.0044
12	224.0	219.5	0.0032	0.0033	223.3	74.1	0.0033	0.0039	202.7	32.7	0.0031	0.0040
13	220.1	93.99	0.0031	0.004	191.6	69.0	0.0031	0.0043	182.0	34.4	0.0029	0.0037
14	229.2	89.0	0.0032	0.0039	191.5	131.9	0.0029	0.0040	180.0	87.0	0.0029	0.0040
15	179.2	136.7	0.0031	0.0035	224.0	151.2	0.0033	0.0036	192.9	116.9	0.0031	0.0040
16	193.5	49.4	0.0028	0.0040	219.7	94.8	0.0031	0.0039	180.0	114.5	0.0029	0.0041
17	190.0	94.0	0.0028	0.0037	180.0	79.0	0.0031	0.0037	189.0	117.6	0.0029	0.0037
18	180.0	99.1	0.0031	0.0039	215.6	210.2	0.0035	0.0036	186.6	95.2	0.0029	0.0037
19	200.9	169.6	0.0029	0.0035	219.7	88.7	0.0032	0.0040	193.6	102.6	0.0031	0.0043
20	205.6	138.8	0.0029	0.0037	209.4	80.4	0.0032	0.0037	198.8	163.3	0.0031	0.0036
21	230.1	96.0	0.0032	0.0048	204.0	142.2	0.0031	0.0037	187.7	113.1	0.0031	0.0036
22	231.0	99.8	0.0031	0.0043	205.3	109.1	0.0029	0.0047	209.9	107.5	0.0032	0.0035
23	206.3	62.7	0.0031	0.0044	221.9	145.9	0.0032	0.0036	182.0	101.0	0.0031	0.0037
24	211.2	98.0	0.0035	0.0040	198.6	150.0	0.0031	0.0032	192.7	159.9	0.0028	0.0032

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 2:1 และ  
W/C = 0.45, 0.05 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน

Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 2:1, 56 day												
Mix.	W/C = 0.45				W/C = 0.50				W/C = 0.55			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	227.8	165.6	0.0032	0.0035	212.7	202.0	0.0029	0.0033	182.2	150.6	0.0027	0.0031
2	233.6	148.8	0.0032	0.0036	211.4	120.0	0.0031	0.0041	197.7	80.4	0.0031	0.0037
3	223.2	98.6	0.0031	0.0036	238.9	129.2	0.0032	0.0044	189.0	153.4	0.0028	0.0029
4	230.1	155.3	0.0031	0.0040	230.5	90.0	0.0032	0.0040	210.1	133.8	0.0032	0.0040
5	217.0	187.5	0.0033	0.0036	202.3	112.6	0.0029	0.0037	190.0	65.7	0.0029	0.0040
6	185.6	100.4	0.0035	0.0044	207.3	139.0	0.0029	0.0037	195.0	36.8	0.0033	0.0043
7	226.6	147.4	0.0031	0.0035	223.2	85.4	0.0031	0.0047	200.3	192.9	0.0029	0.0031
8	205.3	139.8	0.0032	0.0040	198.1	194.0	0.0032	0.0035	195.7	177.9	0.0028	0.0031
9	187.8	81.4	0.0033	0.0043	214.1	69.6	0.0033	0.0040	204.5	148.5	0.0029	0.0035
10	218.7	120.5	0.0033	0.0046	206.3	175.8	0.0031	0.0036	191.4	41.3	0.0029	0.0047
11	209.9	116.3	0.0029	0.0041	203.4	58.5	0.0031	0.0044	202.7	71.0	0.0031	0.0044
12	207.3	129.4	0.0029	0.0035	219.1	81.9	0.0032	0.0041	217.3	151.4	0.0033	0.0036
13	197.3	134.7	0.0033	0.0036	205.5	107.6	0.0032	0.0040	187.6	89.5	0.0029	0.0040
1	211.2	88.4	0.0033	0.0039	206.1	119.8	0.0032	0.0041	193.1	85.6	0.0031	0.0040
15	193.8	80.0	0.0031	0.0050	197.4	67.6	0.0029	0.0040	192.1	122.2	0.0028	0.0031
16	197.3	153.1	0.0028	0.0029	192.7	97.3	0.0029	0.0040	183.1	134.2	0.0028	0.0035
17	229.8	140.0	0.0033	0.0040	188.5	76.0	0.0031	0.0037	197.6	39.4	0.0031	0.0040
18	211.6	196.3	0.0030	0.0031	200.1	80.6	0.0032	0.0044	189.2	135.4	0.0031	0.0035
19	210.4	142.4	0.0029	0.0043	239.8	228.0	0.0032	0.0036	208.0	67.7	0.0031	0.0046
20	224.0	145.8	0.0033	0.0041	232.5	181.0	0.0034	0.0038	208.2	64.2	0.0029	0.0044
21	210.4	76.4	0.0031	0.0040	217.7	46.3	0.0029	0.0039	200.1	82.0	0.0028	0.0040
22	198.5	83.6	0.0028	0.0033	239.1	131.3	0.0033	0.0040	208.1	43.1	0.0028	0.0043
23	193.1	88.6	0.0028	0.0038	233.3	144.9	0.0031	0.0036	190.0	96.1	0.0031	0.0040
24	207.4	107.8	0.0031	0.0041	226.7	150.0	0.0034	0.0040	180.0	35.9	0.0029	0.0040

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 3:1 และ  
W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 28 วัน

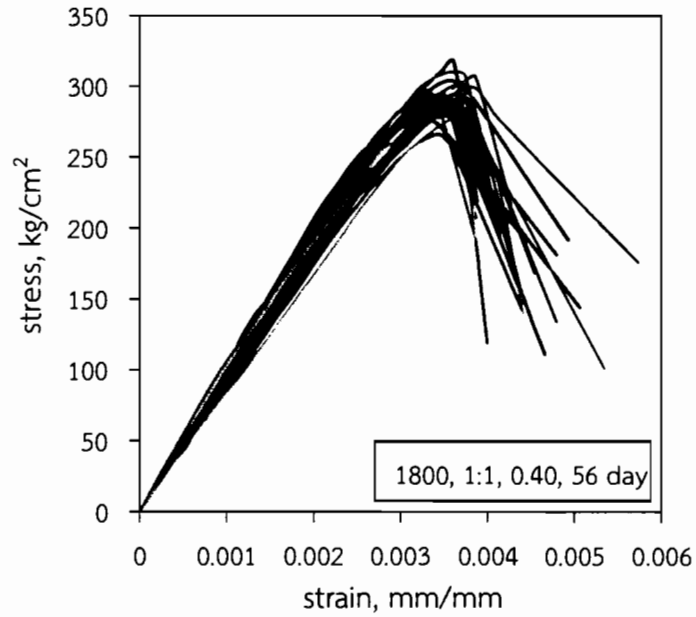
Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 3:1, 28 day												
Mix.	W/C = 0.55				W/C = 0.60				W/C = 0.65			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	163.0	72.5	0.0029	0.0036	147.0	80.3	0.0031	0.0041	176.0	107.5	0.0031	0.0039
2	202.3	82.6	0.0033	0.0040	138.1	75.9	0.0027	0.0035	174.5	77.4	0.0029	0.0036
3	169.4	118.5	0.0029	0.0040	165.8	93.0	0.0027	0.0035	176.0	59.1	0.0029	0.0035
4	182.3	92.6	0.0032	0.0045	162.7	147.6	0.0025	0.0031	169.0	87.4	0.0032	0.0039
5	180.0	155.6	0.0028	0.0030	177.8	140.9	0.0027	0.0031	157.0	97.8	0.0027	0.0033
6	180.7	119.6	0.0028	0.0033	163.0	121.1	0.0028	0.0031	164.9	85.0	0.0031	0.0041
7	185.7	54.7	0.0032	0.0040	160.1	61.2	0.0028	0.0039	171.9	91.8	0.0028	0.0033
8	190.5	143.3	0.0029	0.0032	157.4	89.2	0.0027	0.0040	173.7	84.9	0.0028	0.0037
9	178.5	89.8	0.0033	0.0048	168.2	82.0	0.0028	0.0041	171.7	126.0	0.0028	0.0036
10	184.9	117.8	0.0028	0.0032	166.6	129.6	0.0025	0.0029	169.2	60.5	0.0029	0.0040
11	181.7	128.7	0.0028	0.0032	170.4	113.2	0.0029	0.0032	163.5	80.7	0.0028	0.0039
12	198.4	33.8	0.0033	0.0040	156.4	60.6	0.0028	0.0035	157.5	92.1	0.0029	0.0039
13	191.4	185.0	0.0031	0.0032	156.0	112.0	0.0027	0.0029	168.2	127.9	0.0029	0.0032
14	182.6	51.8	0.0029	0.0040	142.5	52.7	0.0026	0.0033	159.4	88.1	0.0029	0.0040
15	173.1	162.7	0.0032	0.0036	145.0	90.0	0.0027	0.0036	158.1	107.6	0.0029	0.0036
16	161.0	84.2	0.0029	0.0040	151.2	83.8	0.0027	0.0033	155.7	75.6	0.0027	0.0041
17	160.8	59.6	0.0033	0.0042	147.3	77.6	0.0027	0.0036	169.2	71.9	0.0028	0.0037
18	158.3	117.2	0.0028	0.0035	157.7	80.0	0.0029	0.0041	162.0	106.6	0.0027	0.0039
19	167.0	104.2	0.0029	0.0035	154.8	94.0	0.0028	0.0040	163.8	79.8	0.0027	0.0043
20	155.0	105.3	0.0032	0.0043	150.0	48.4	0.0028	0.0036	174.5	78.2	0.0029	0.0040
21	164.0	61.9	0.0029	0.0037	142.9	69.9	0.0027	0.0035	173.1	77.2	0.0029	0.0043
22	154.0	92.0	0.0027	0.0040	144.7	96.2	0.0029	0.0037	170.9	102.4	0.0028	0.0036
23	143.0	111.7	0.0027	0.0033	166.3	94.7	0.0027	0.0033	179.0	102.1	0.0028	0.0035
24	150.0	51.1	0.0028	0.0041	151.9	56.3	0.0028	0.0036	157.5	54.4	0.0028	0.0037

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วนผสม S:C = 3:1 และ  
W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 56 วัน

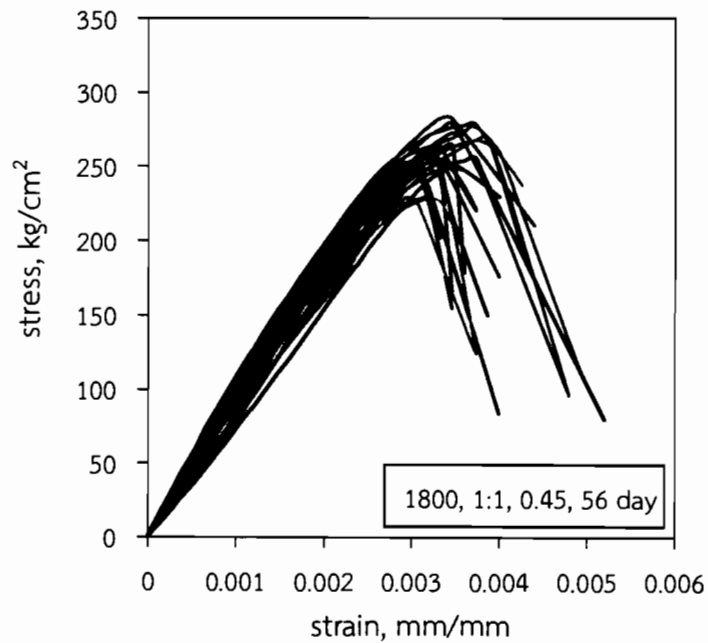
Wet density = 1,800 kg/m <sup>3</sup> , S:C = 3:1, 56 day												
Mix.	W/C = 0.55				W/C = 0.60				W/C = 0.65			
	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)		f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		strain (mm/mm)	
no.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.	max.	ult.
1	184.4	94.6	0.0032	0.0043	157.0	90.4	0.0025	0.0033	180.0	93.6	0.0029	0.0036
2	180.0	102.1	0.0029	0.0045	147.0	72.3	0.0027	0.0040	172.6	106.9	0.0031	0.0040
3	163.8	99.5	0.0029	0.0047	145.3	116.0	0.0027	0.0029	170.5	92.8	0.0032	0.0040
4	174.7	105.5	0.0029	0.0043	149.8	130.2	0.0025	0.0029	172.0	60.7	0.0031	0.0044
5	185.0	88.3	0.0029	0.0045	150.2	97.2	0.0027	0.0035	159.0	72.0	0.0028	0.0043
6	187.0	138.1	0.0029	0.0032	165.9	56.6	0.0027	0.0033	174.5	83.0	0.0029	0.0041
7	170.6	95.2	0.0032	0.0047	171.7	95.2	0.0028	0.0035	176.2	92.1	0.0031	0.0039
8	200.4	120.3	0.0032	0.0037	170.8	131.6	0.0028	0.0033	175.5	69.4	0.0029	0.0041
9	195.7	179.4	0.0028	0.0032	160.5	98.2	0.0029	0.0040	181.0	69.3	0.0031	0.0037
10	187.6	122.1	0.0031	0.0035	174.0	116.9	0.0028	0.0033	167.7	77.5	0.0031	0.0039
11	179.0	102.4	0.0031	0.0048	168.9	83.9	0.0028	0.0037	170.0	100.7	0.0028	0.0036
12	190.1	181.9	0.0028	0.0029	159.0	88.1	0.0027	0.0036	169.6	93.1	0.0029	0.0039
13	183.9	172.0	0.0030	0.0034	157.0	84.9	0.0029	0.0045	172.1	81.6	0.0030	0.0038
14	181.1	60.2	0.0028	0.0044	173.0	73.2	0.0029	0.0039	162.2	90.3	0.0028	0.0040
15	165.0	109.4	0.0029	0.0037	159.3	99.5	0.0028	0.0032	168.4	108.1	0.0029	0.0036
16	163.3	97.8	0.0028	0.0037	169.9	102.1	0.0031	0.0035	173.9	96.0	0.0031	0.0041
17	154.4	95.0	0.0029	0.0045	156.4	88.6	0.0025	0.0032	173.1	69.9	0.0029	0.0041
18	166.4	76.0	0.0029	0.0040	167.5	167.5	0.0029	0.0029	160.6	94.0	0.0029	0.0040
19	157.4	55.5	0.0028	0.0042	164.6	83.0	0.0029	0.0043	169.1	88.0	0.0029	0.0042
20	162.0	121.9	0.0031	0.0039	163.0	119.3	0.0028	0.0035	161.4	90.0	0.0031	0.0043
21	154.1	148.8	0.0029	0.0031	168.9	123.4	0.0029	0.0036	172.4	135.4	0.0031	0.0036
22	160.0	141.2	0.0028	0.0032	168.8	58.9	0.0027	0.0037	174.2	85.4	0.0029	0.0039
23	161.0	96.8	0.0029	0.0035	150.9	125.7	0.0025	0.0029	162.5	80.0	0.0029	0.0044
24	157.0	150.0	0.0031	0.0033	154.8	94.6	0.0027	0.0033	178.5	93.3	0.0031	0.0037

## 2. พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากผลการทดสอบพฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

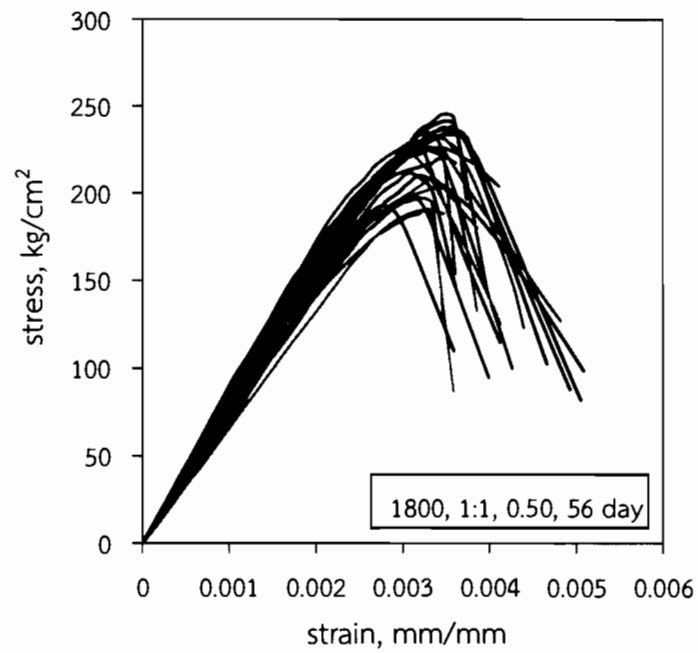


ก. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.40



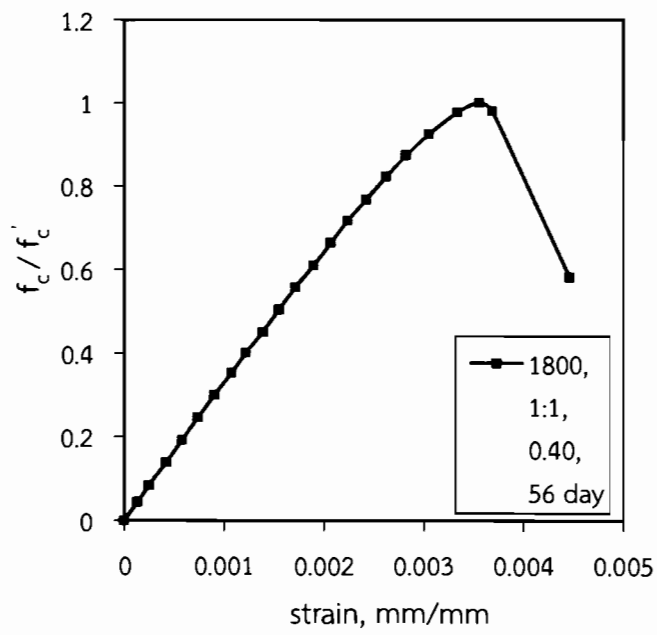
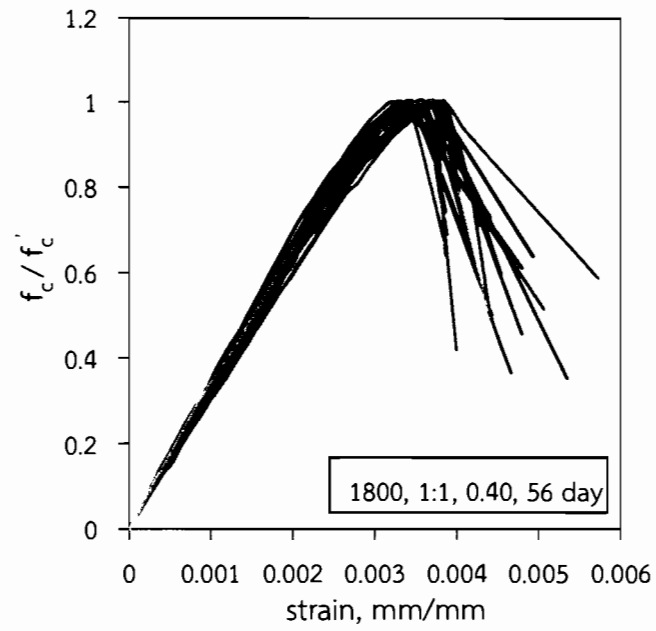
ข. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45



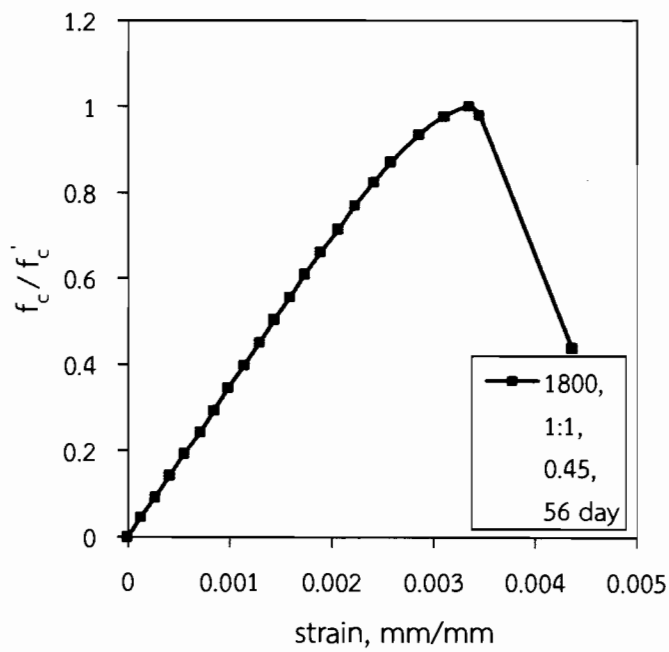
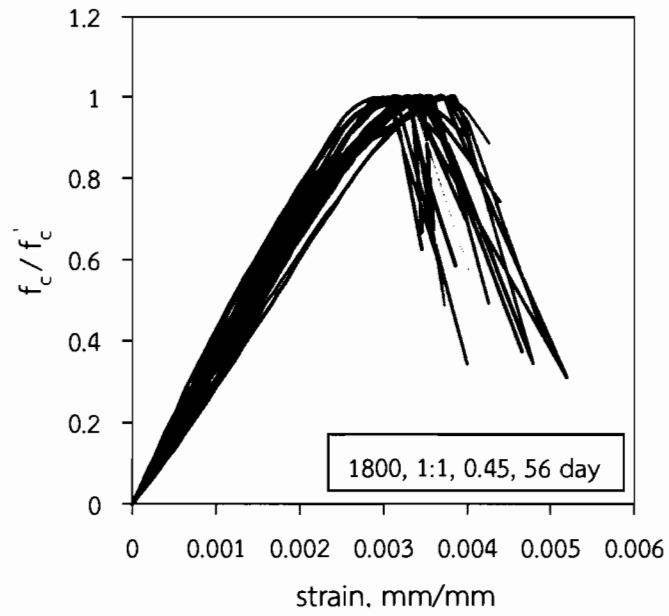


ค. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

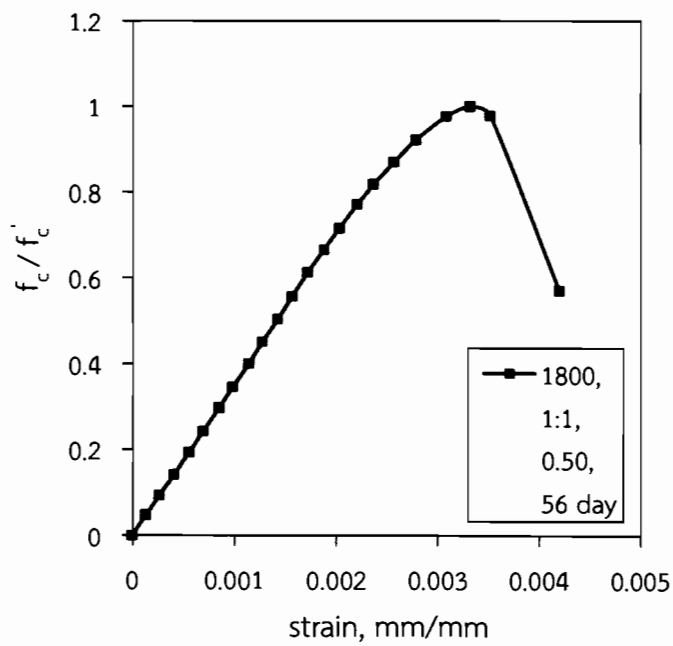
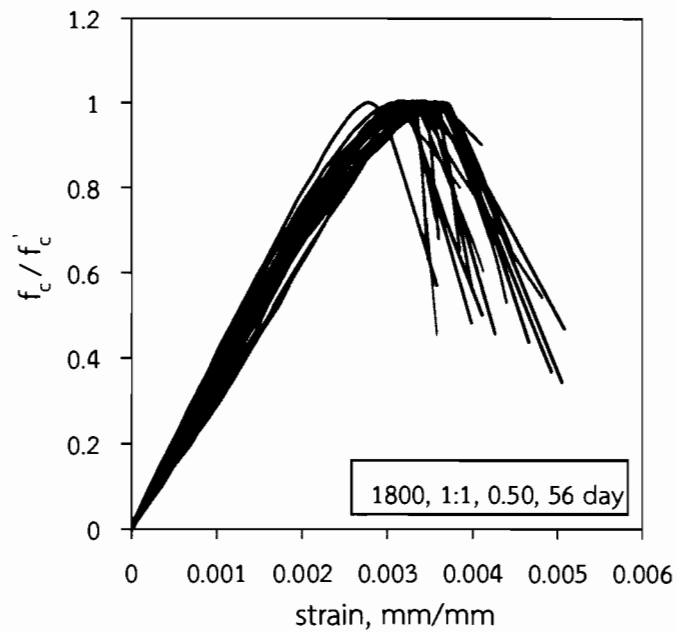
ภาพที่ ข.1 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.40

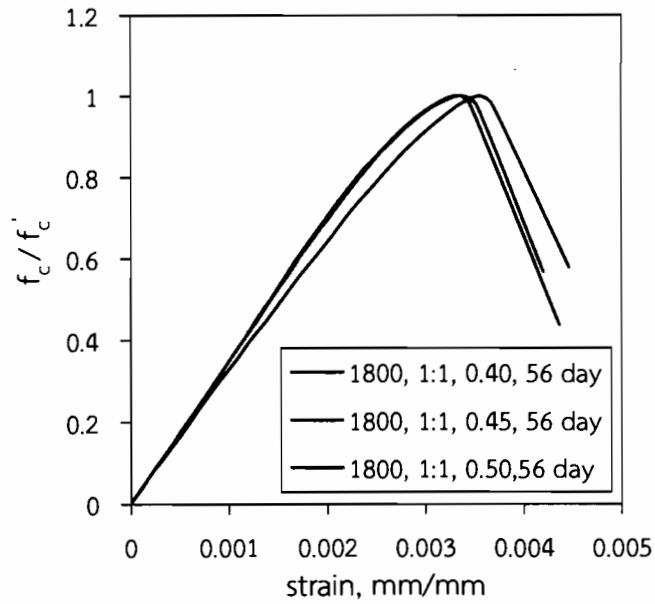


ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45

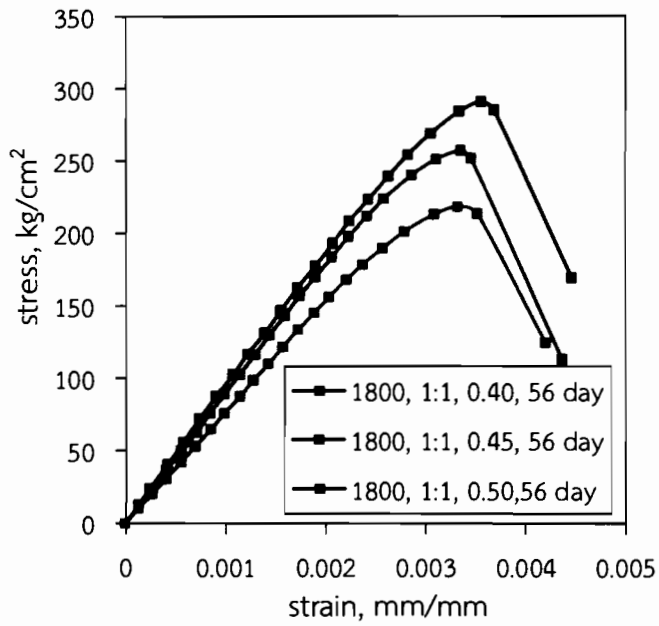


ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

ภาพที่ ข.2 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50

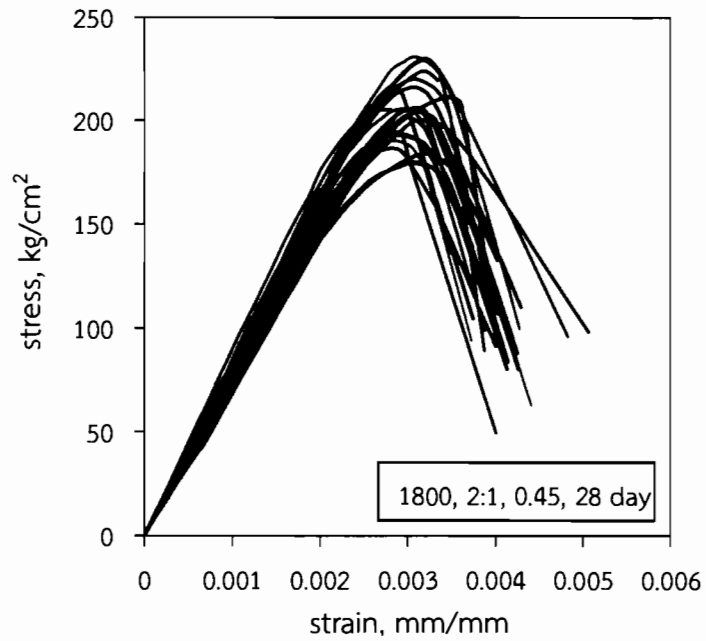


ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1

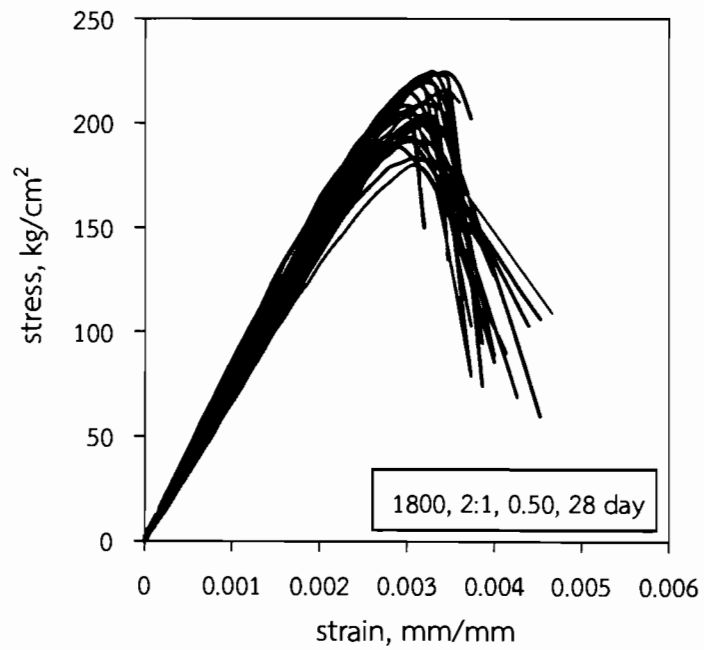


ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 1:1

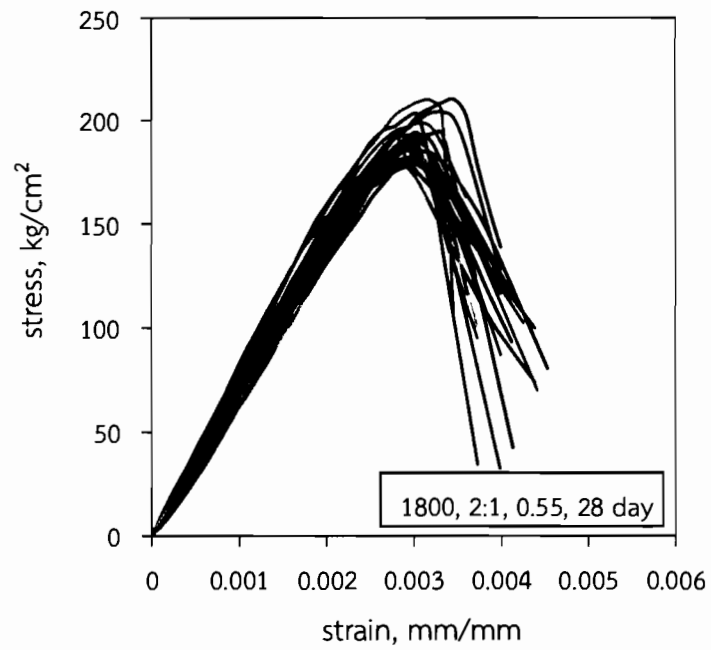
ภาพที่ ข.3 ความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 1:1 และ W/C = 0.40, 0.45 และ 0.50 ที่อายุ 56 วัน



ก. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45

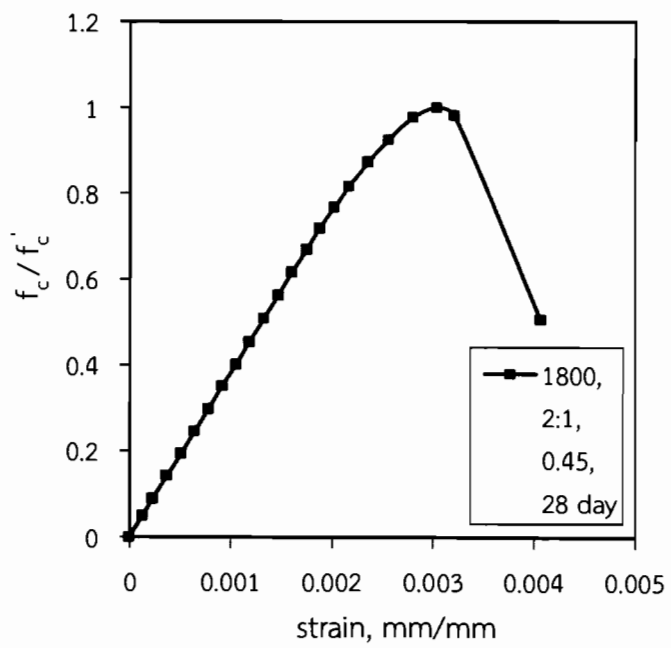
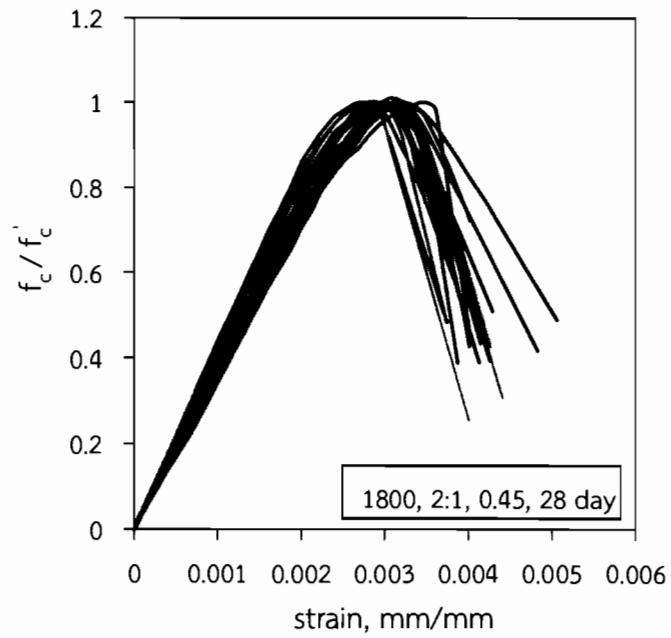


ข. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50



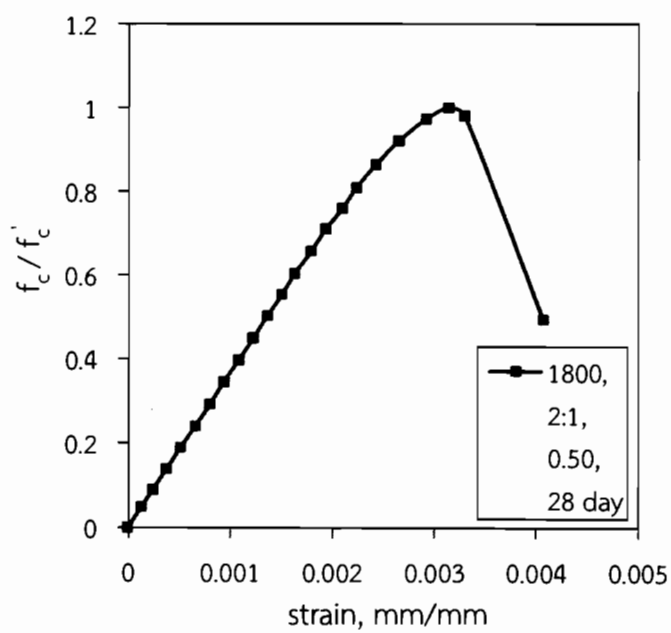
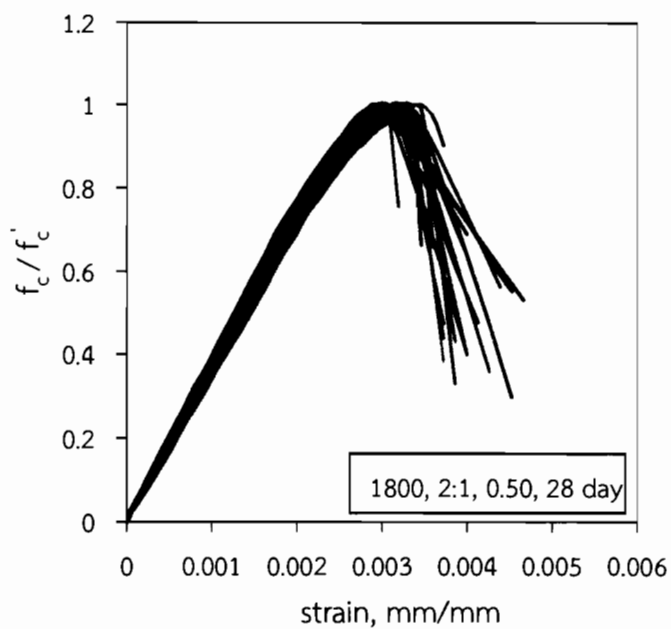
ค. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

ภาพที่ ข.4 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55

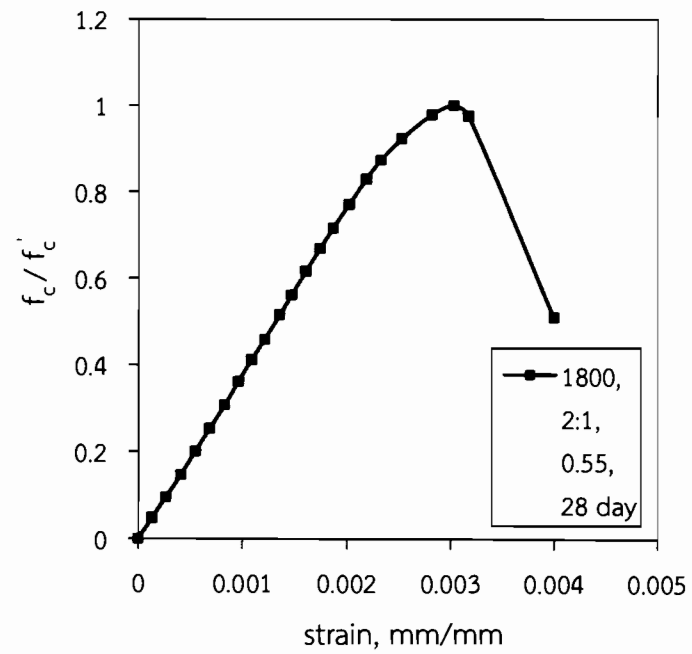
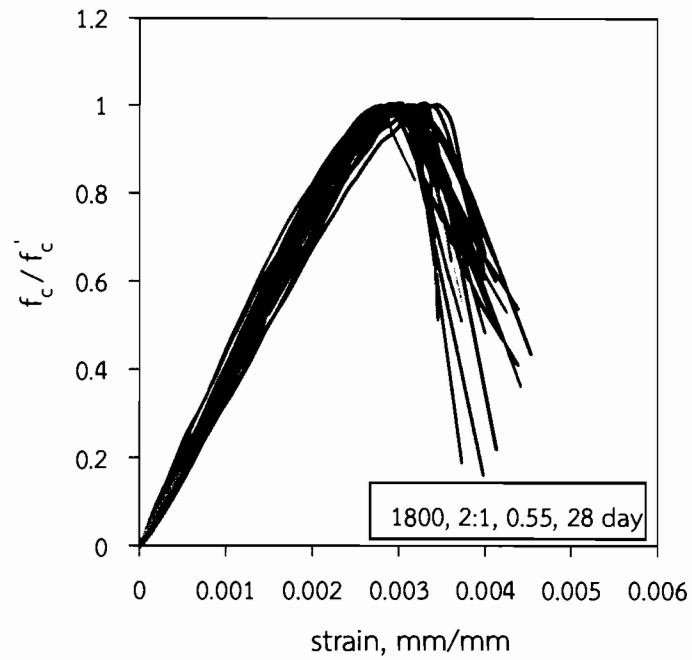


ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45



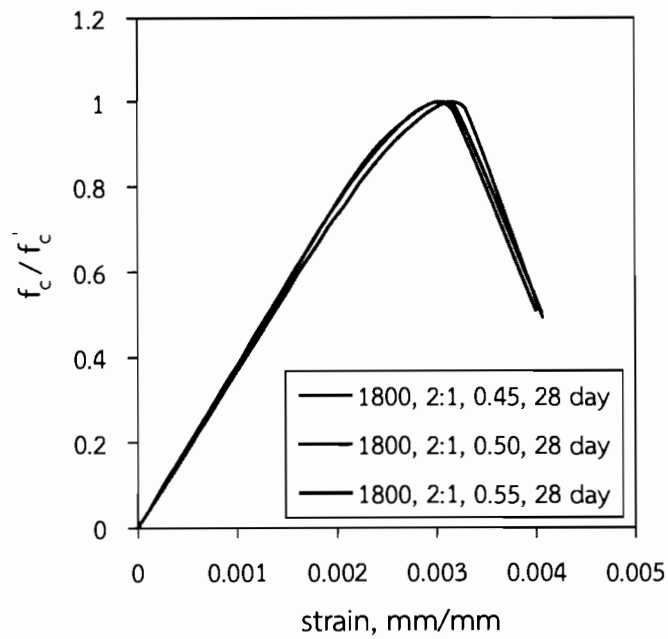


ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

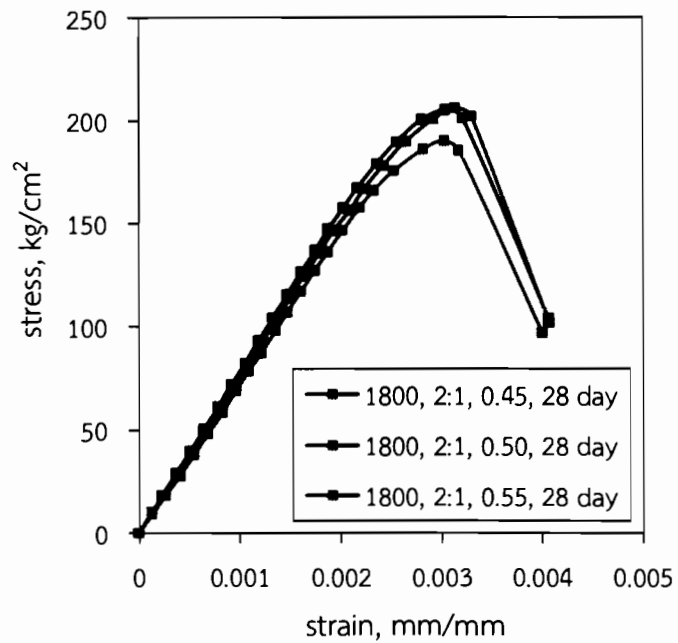


ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

ภาพที่ ข.5 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55

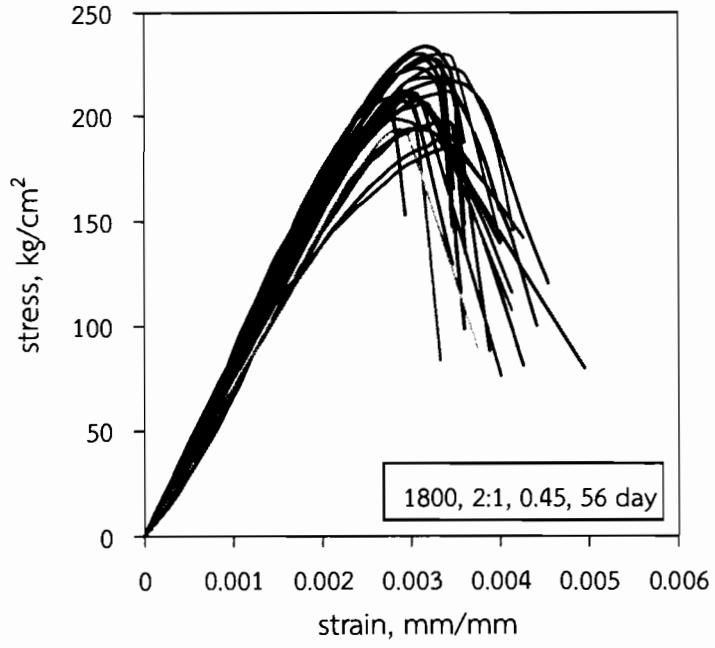


ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1

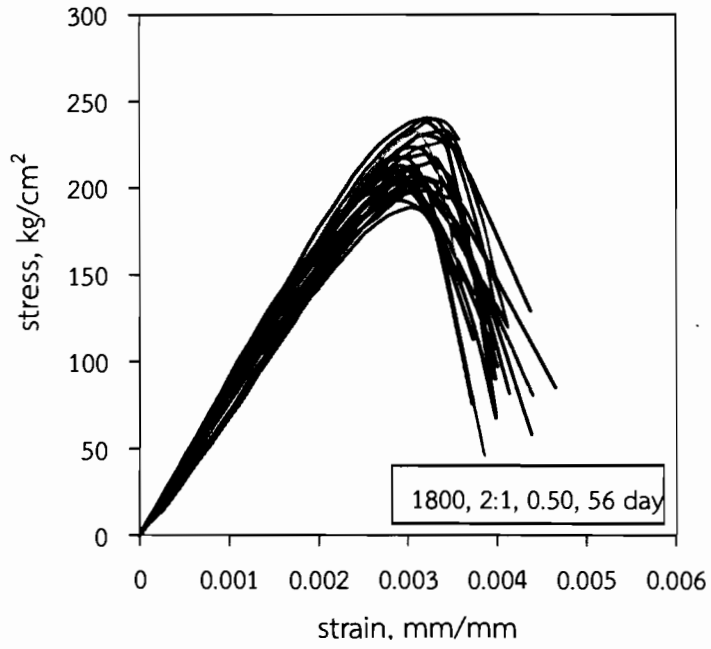


ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1

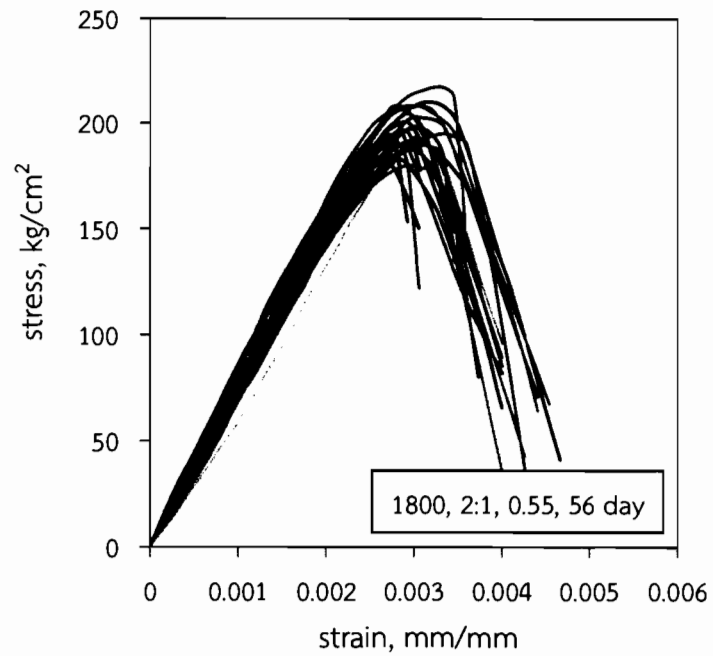
ภาพที่ ข.6 ความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55 ที่อายุ 28 วัน



ก. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45

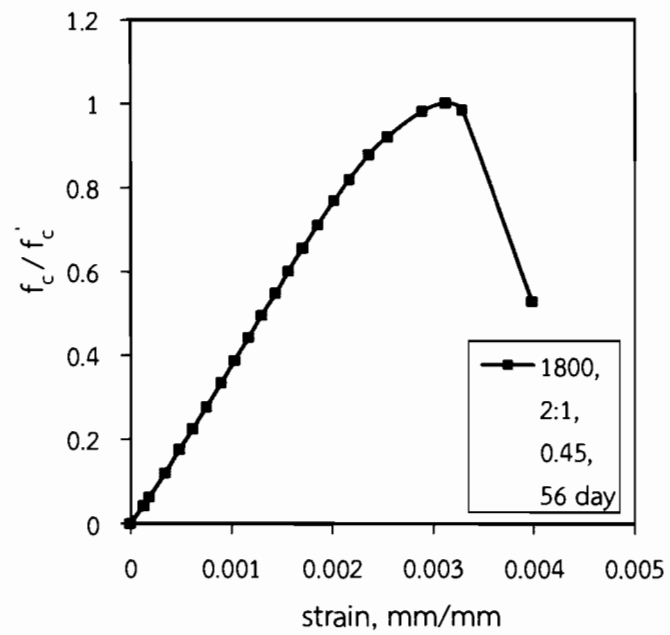
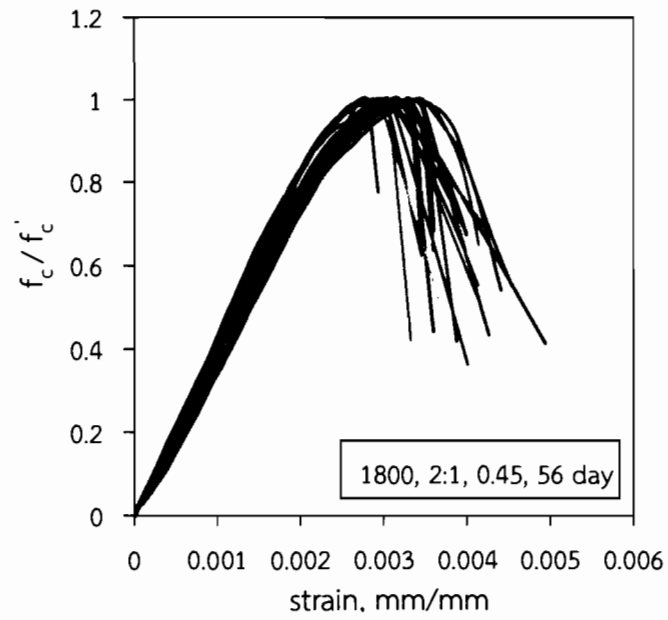


ข. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50

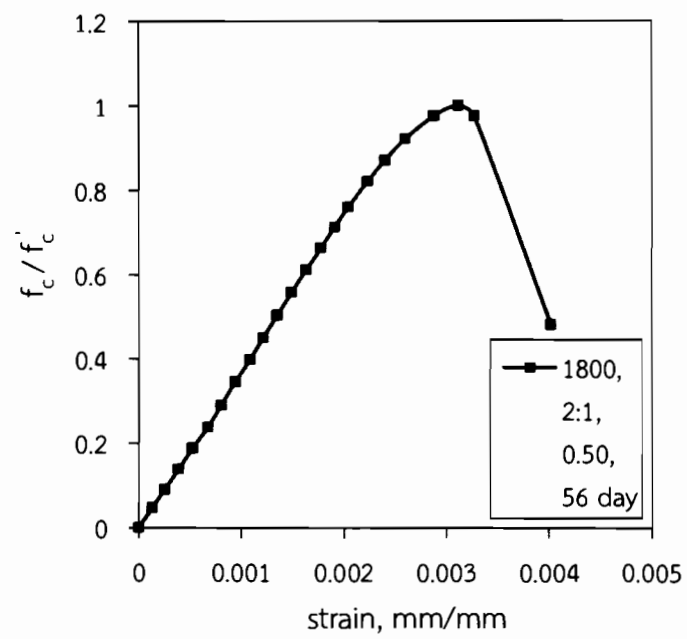
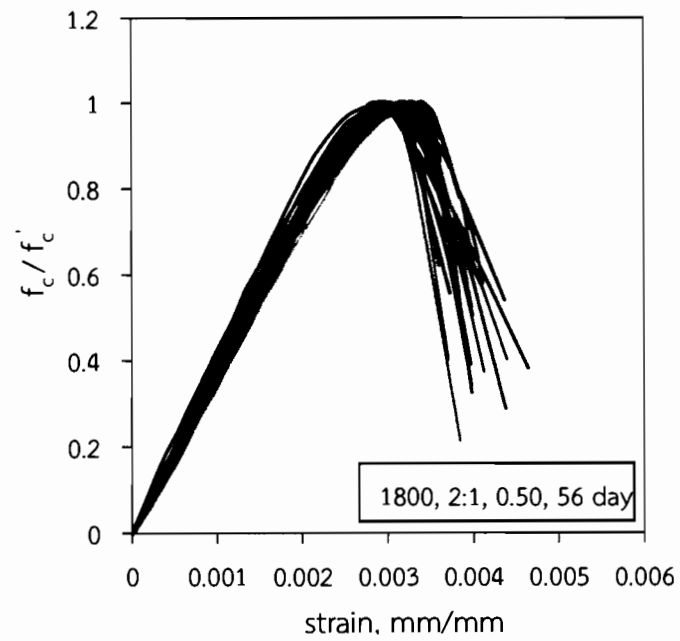


ค. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

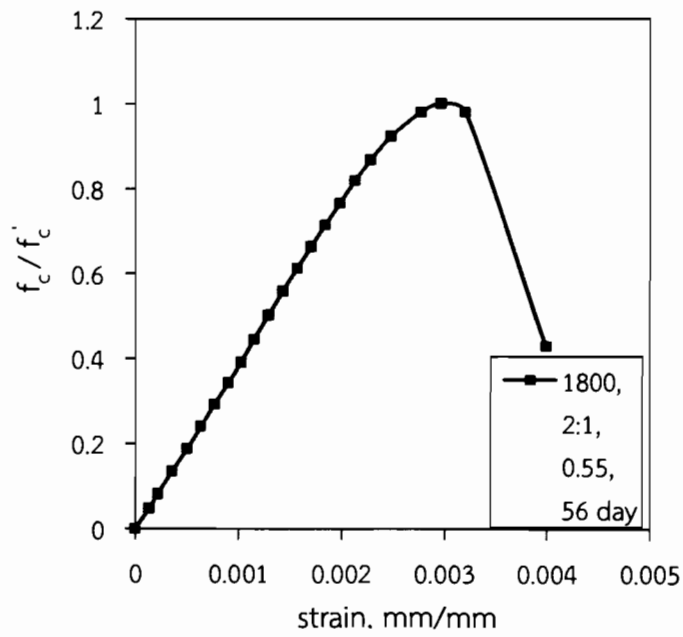
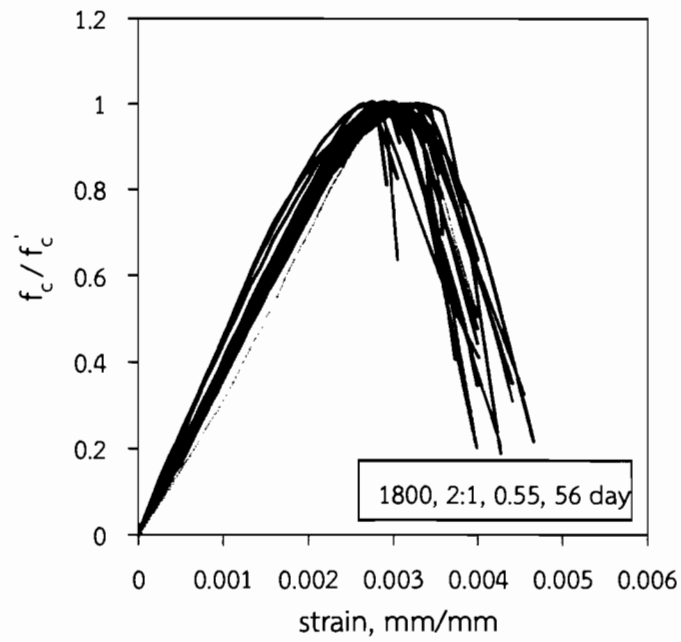
ภาพที่ ข.7 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.45



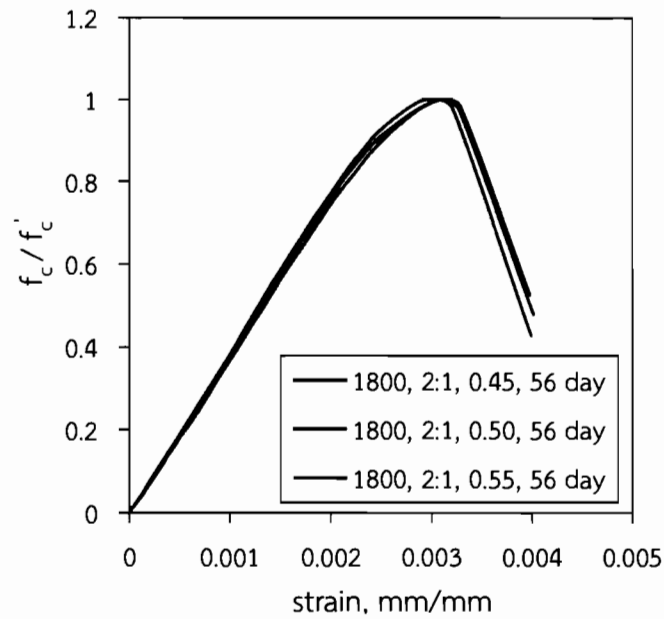
ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.50



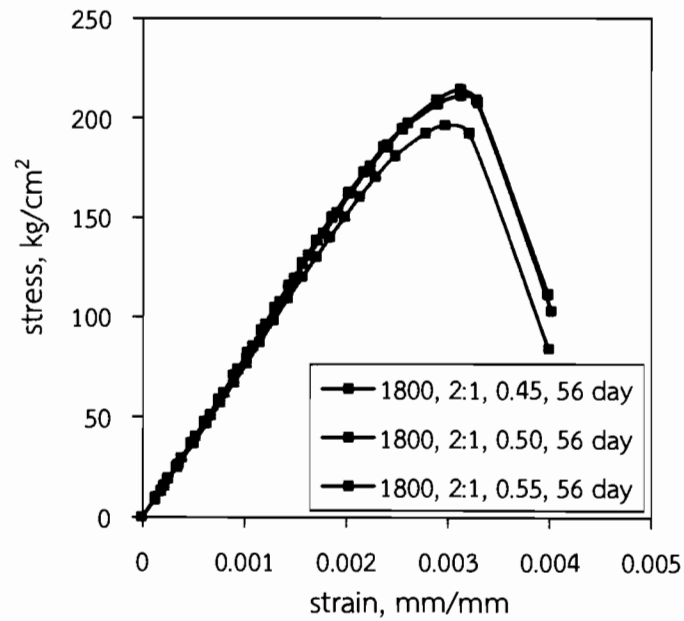
ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

ภาพที่ ข.8 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55



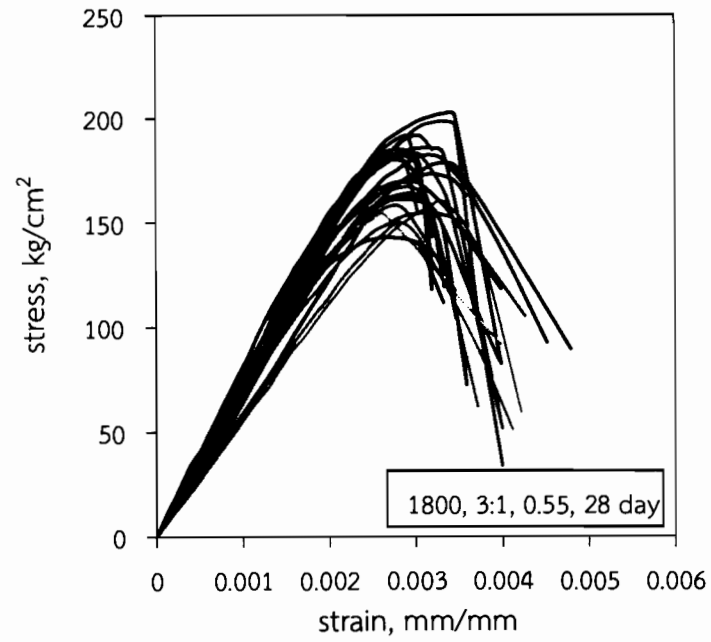


ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1

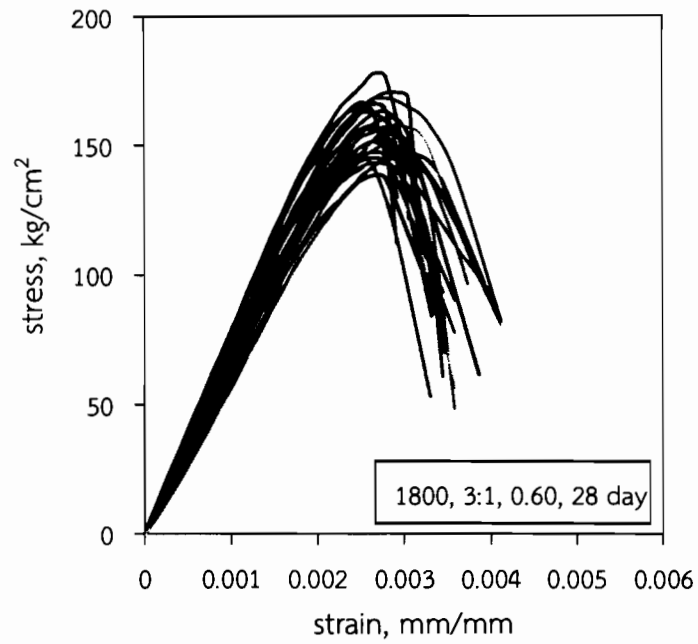


ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 2:1

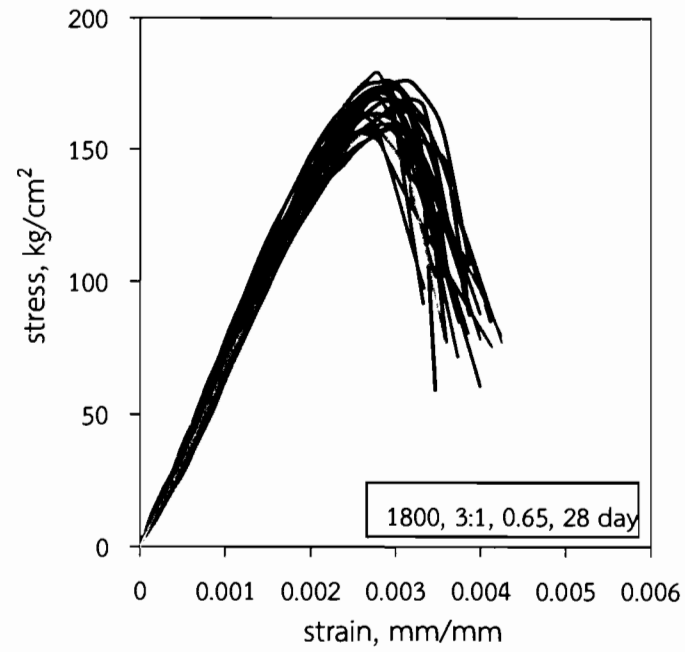
ภาพที่ ข.9 ความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 2:1 และ W/C = 0.45, 0.50 และ 0.55 ที่อายุ 56 วัน



ก. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

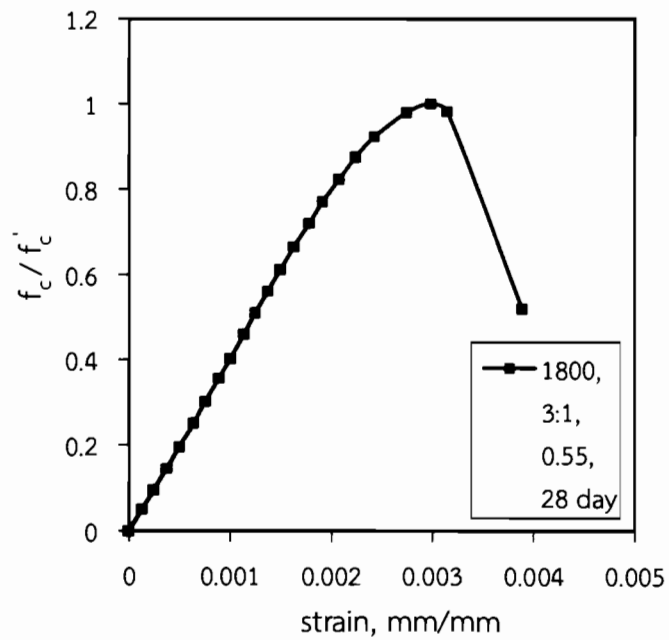
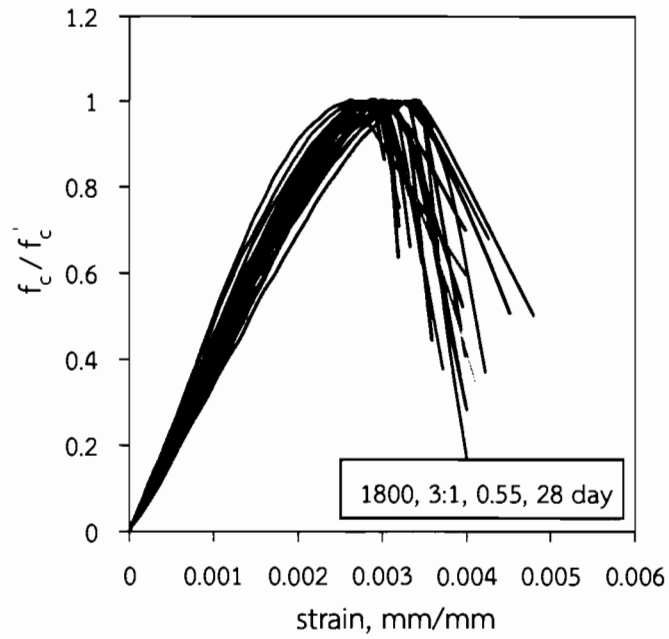


ข. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.60

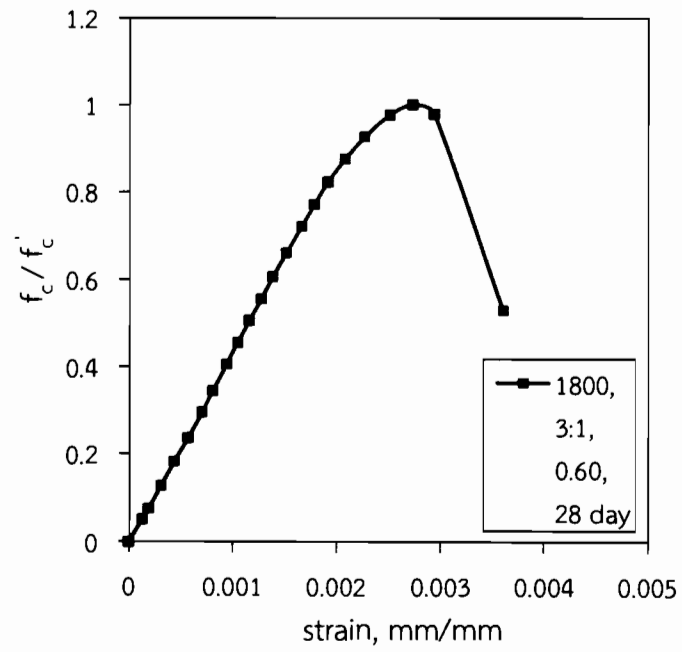
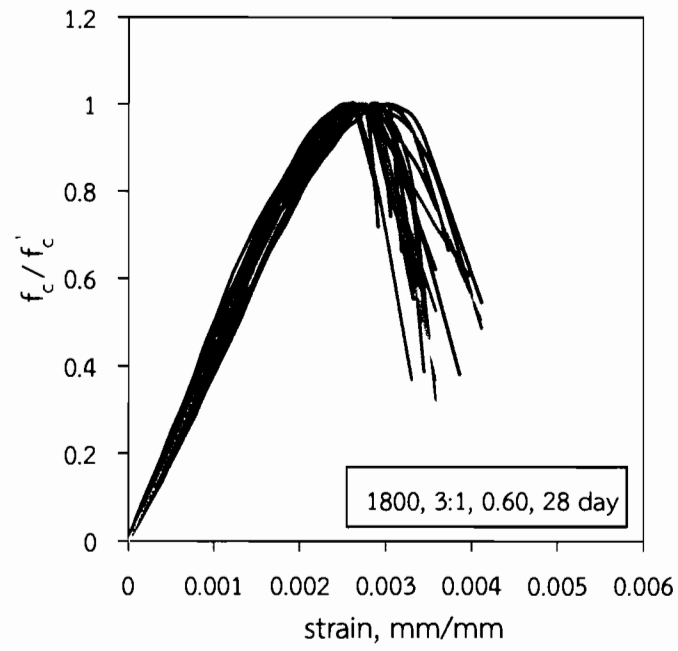


ค. ทดสอบที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.65

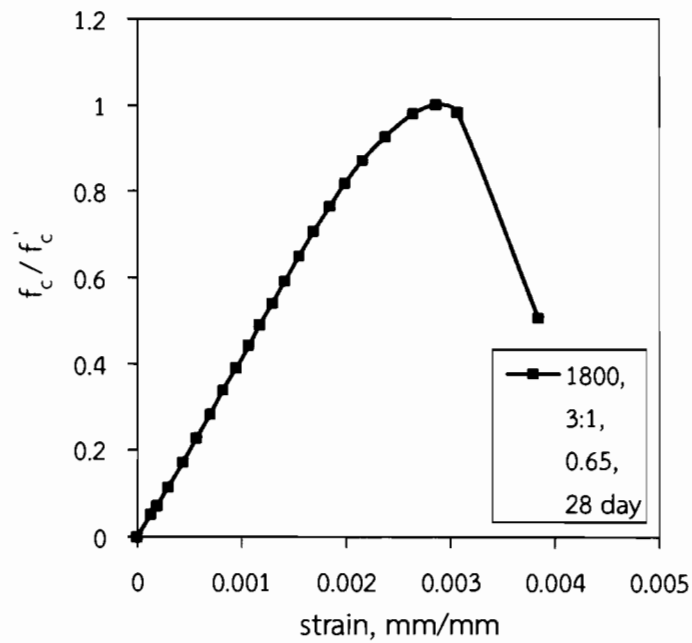
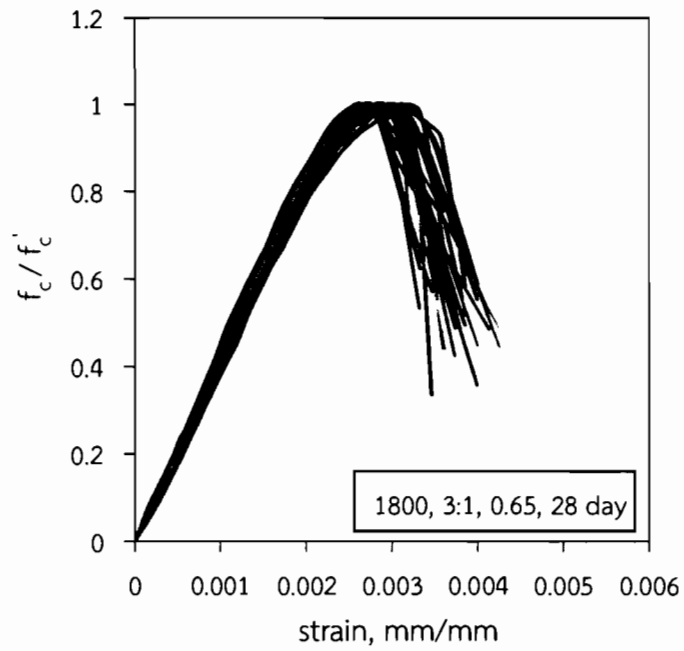
ภาพที่ ข.10 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

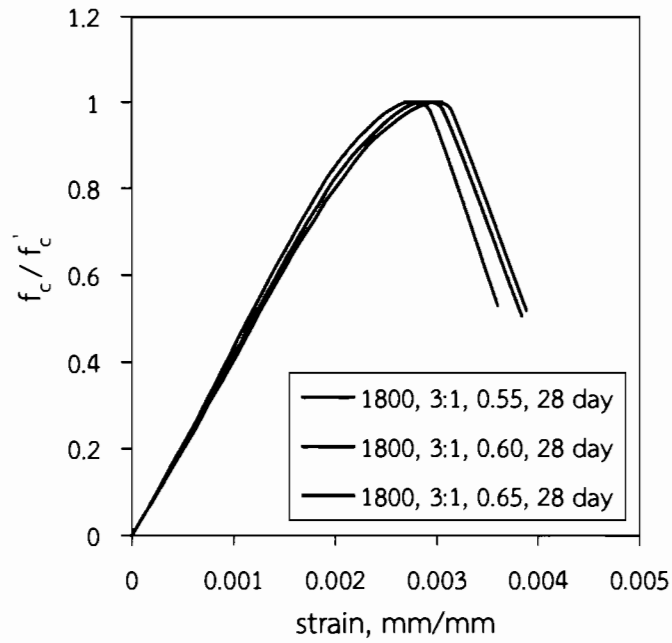


ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.60

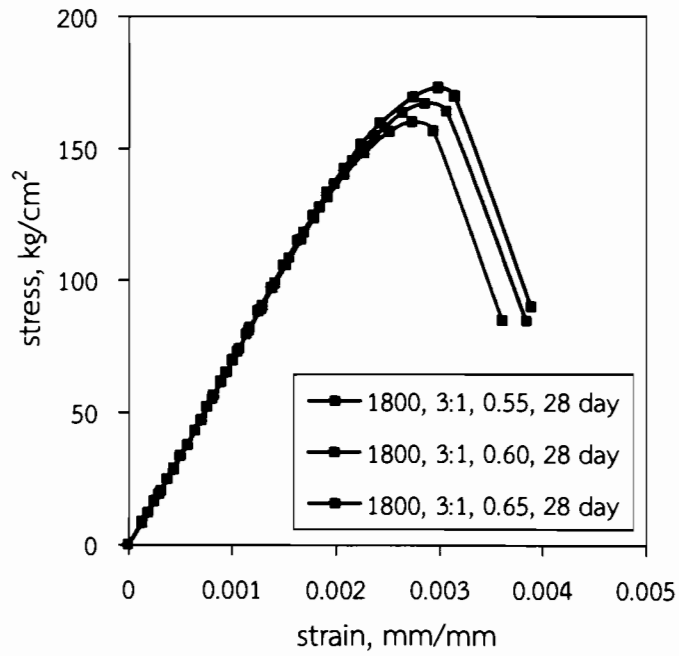


ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.65

ภาพที่ ข.11 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65

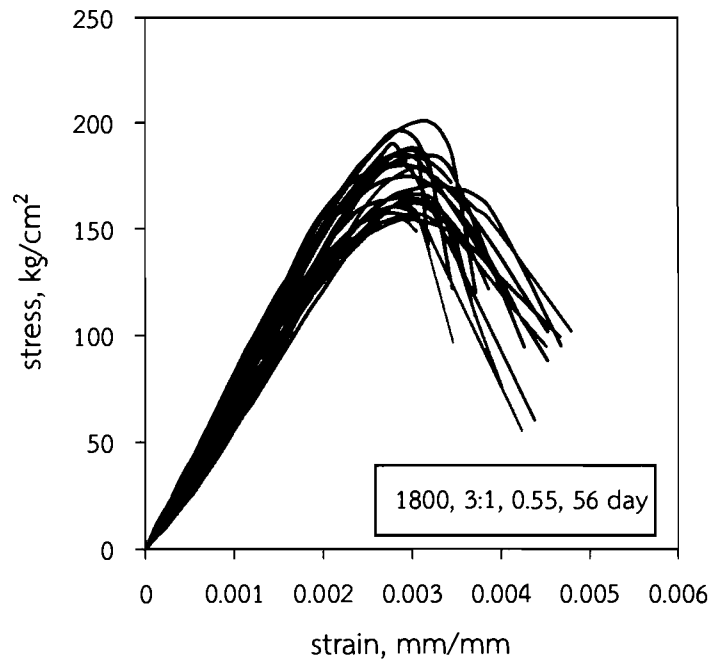


ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1

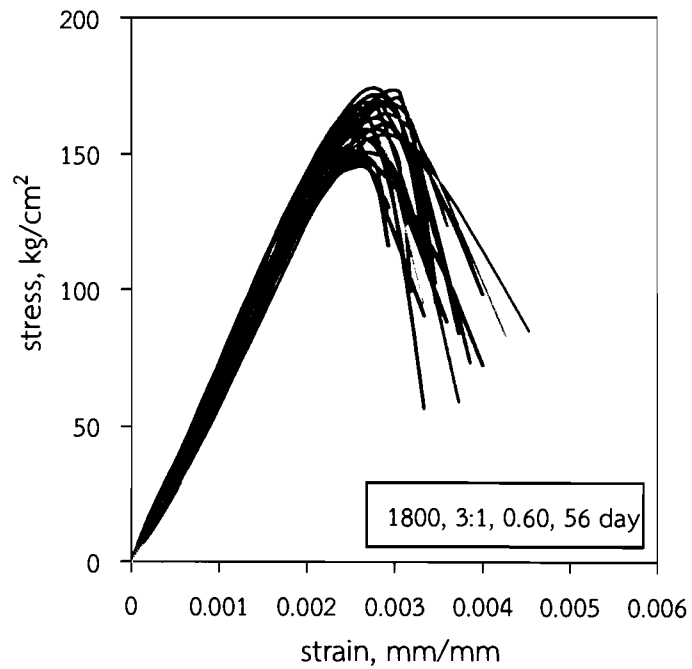


ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1

ภาพที่ ข.12 ความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 28 วัน

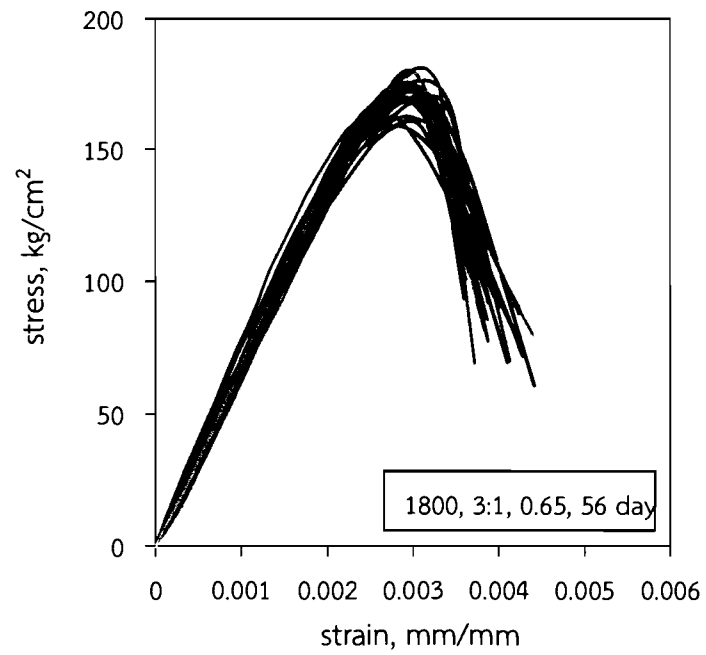


ก. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55



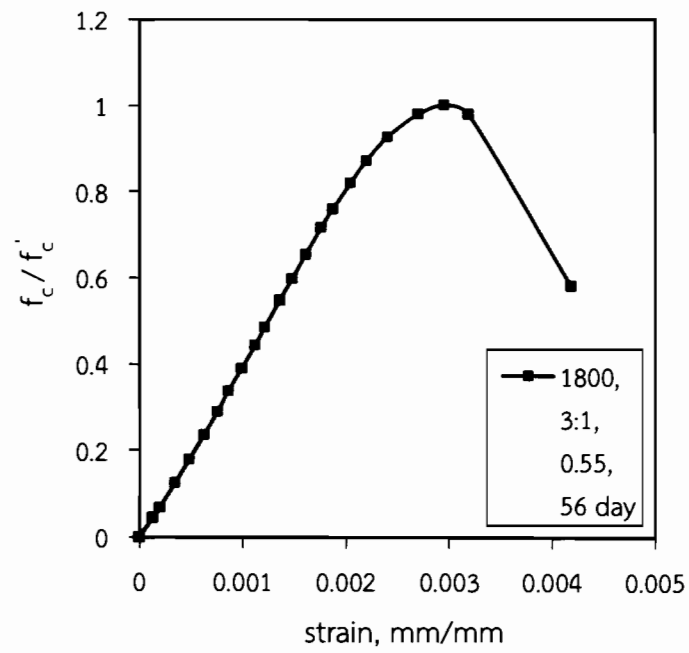
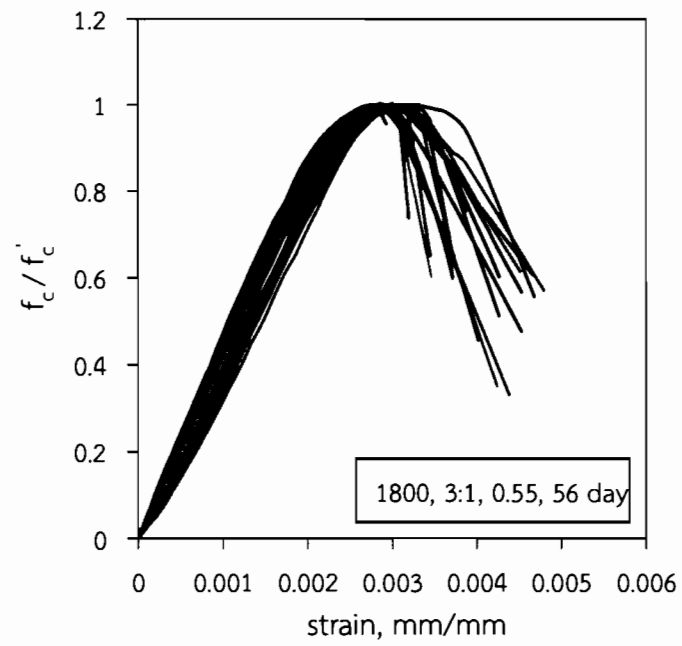
ข. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.60



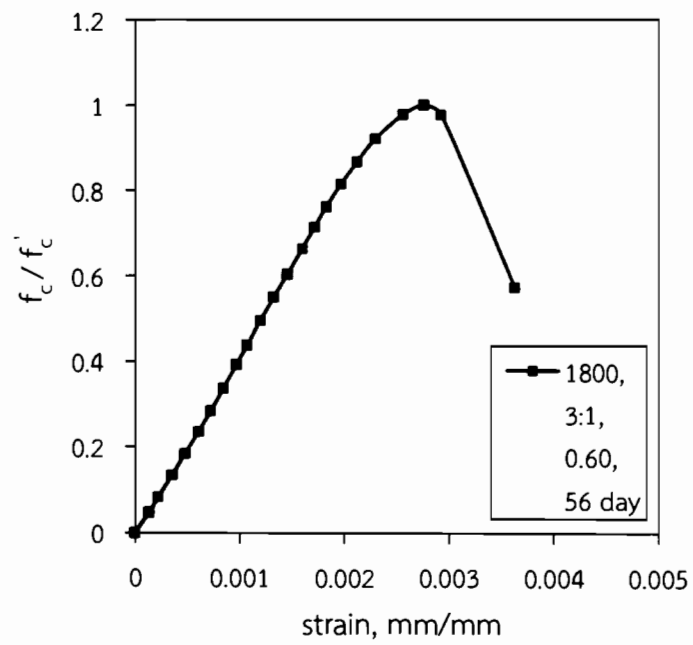
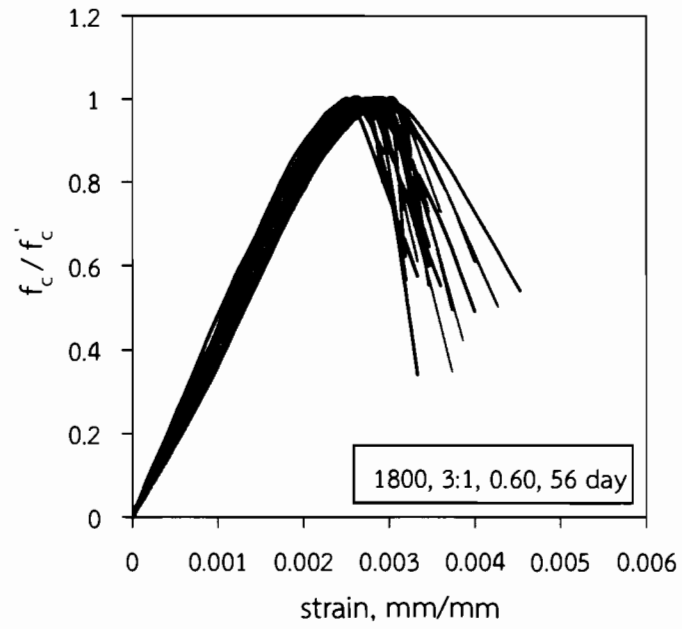


ค. ทดสอบที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.65

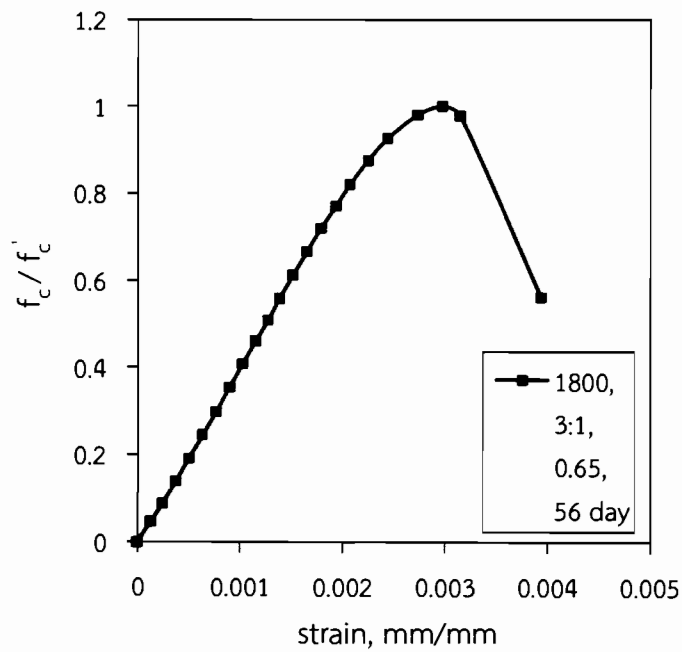
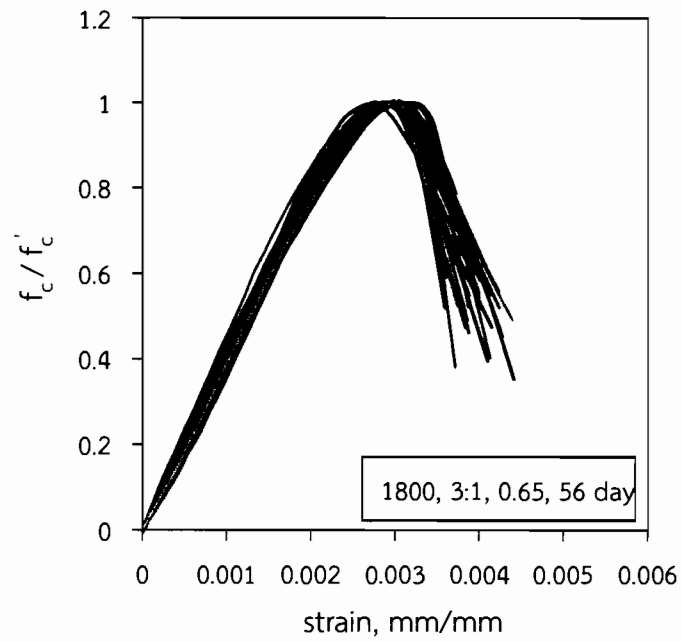
ภาพที่ ข.13 พฤติกรรมของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.55

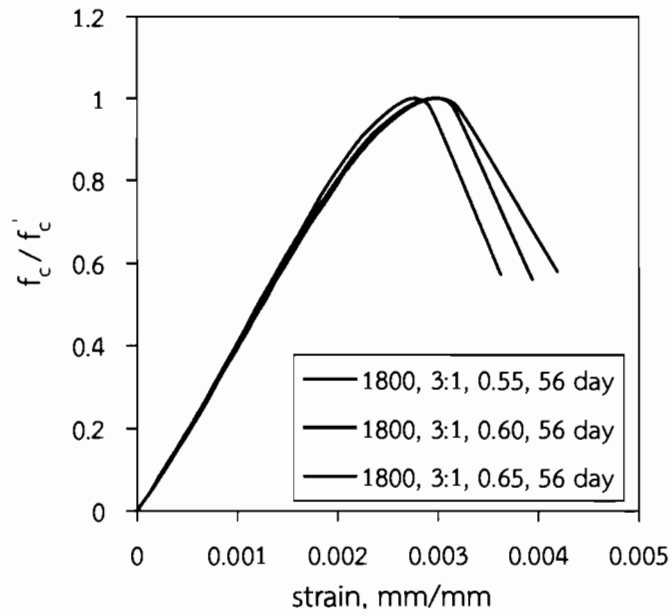


ข. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.60

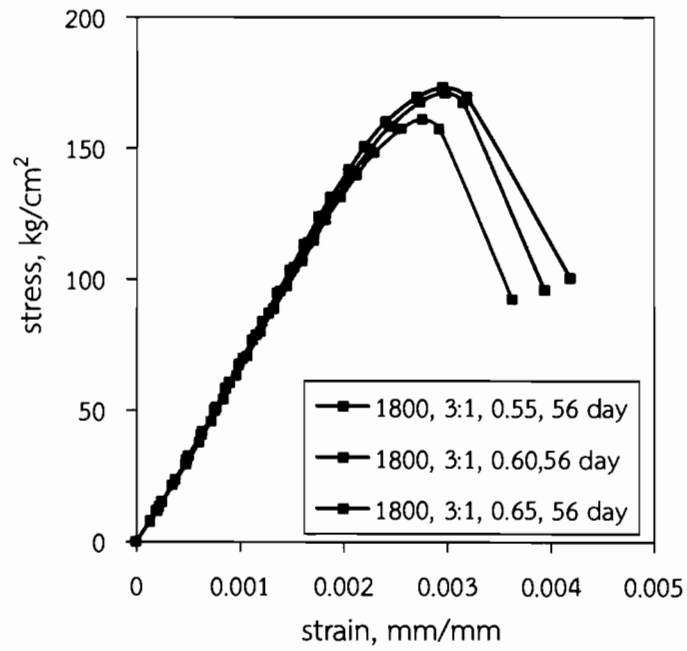


ค. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน W/C = 0.65

ภาพที่ ข.14 ความเครียดเฉลี่ยที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65



ก. ความเครียดเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1



ข. ความเค้นเฉลี่ย ที่อายุ 56 วัน ที่อัตราส่วน S:C = 3:1

ภาพที่ ข.15 ความเค้น-ความเครียดที่อัตราส่วน S:C = 3:1 และ W/C = 0.55, 0.60 และ 0.65 ที่อายุ 56 วัน

**ประวัติผู้วิจัย**

**ชื่อ** นายจรรพันธ์ ไพพูลพิมพ์  
**ประวัติการศึกษา** พ.ศ.2548-2551 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
**ประวัติการทำงาน** พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน  
ประกอบธุรกิจส่วนตัว  
**ตำแหน่ง** วิศวกร  
**สถานที่ทำงานปัจจุบัน** 108 หมู่ 4 ตำบลทุ่งเทิง อำเภอเดชอุดม  
จังหวัดอุบลราชธานี

