โครงงานวิจัย

การลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต
โดยใช้ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย

USING RICE HUSK ASH AND FLY ASH TO SUBSTITUTE PORTLAND CEMENT IN CONCRETE MIXED DESIGN

นายพลสันธิ์ พุกะทรัพย์ 33100253
นายธนณัฐ วานิชชินชัย 33100437

โครงงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

USING RICE HUSK ASH AND FLY ASH TO SUBSTITUTE PORTLAND CEMENT IN CONCRETE MIXED DESIGN

BY

Mr.POLSUNT POOKASAP

Mr.THANANATH VANICHCHINCHAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ใบรับรองโครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ การลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต
โดยใช้ขี้เถ้าแกลบ และขี้เถ้าลอย

นักศึกษา นายพลสันธิ์ พุกะทรัพย์ รหัสประจำตัว 33100253

นายธนัฐ วานิชชินชัย รหัสประจำตัว 33100437

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สุพจน์ ศรีนิล

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
อาจารย์ สุพจน์ ศรีนิล	
อาจารย์ วิบูลย์ วุฒิญาณ	
อาจารย์ ศิลป์ชัย จานสุวรรณ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชา วิศวกรรมโยธา

วันที่___เดือน_____พ.ศ.____

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต โดยใช้ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย

USING RICE HUSK ASH AND FLY ASH TO SUBSTITUTE PORTLAND CEMENT IN CONCRETE MIXED DESIGN

โดย นายพลสันธิ์ พุกะทรัพย์

นายธนัฐ วานิชชินชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สุพจน์ ศรีนิล

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการทำโครงงานพิเศษนี้ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้านกำลังการรับแรงอัด แรงดึง และแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยว่า ค่ากำลังการรับแรงจะมีค่าเป็นเท่าไร, มีแนวโน้วของกำลังอย่างไร และส่วนผสมใดสามารถให้ค่ากำลังการรับแรงที่สูงโดยที่สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง และนำขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัยนี้จะลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงครั้งละ 10% จากคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม 100% จนถึง 70% ในแต่ละส่วนผสมที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ก็จะเพิ่มปริมาณขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยครั้งละ 5% เพราะฉะนั้นจะได้ส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัยทั้งหมด 16 ส่วนผสม และทดสอบกำลังการรับแรงหลังเวลาบ่มที่ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน และ 60 วัน

ABSTRACT

THE MAIN PURPOSE OF THIS SPECIAL PROJECT IS TO STUDY COMPRESSIVE, TENSILE AND BONDING STRENGTH OF RICE HUSK ASH AND FLY ASH CONCRETE

THE PROCEDURE IS SIMPLY THAT WITHIN 100% BY WEIGHT OF PORTLAND CEMENT IN ONE CONCRETE MIXED DESIGN, WE WILL REDUCE THE CEMENT PORTION DOWN BY 10%, 20% AND 30% AND SUBSTITUTE BY RICE HUSK ASH AND FLY ASH AT RATE OF 5%, 10%, 15% UNTIL 30%. THE TOTAL OF 16 NEW MIXED DESIGNS ARE TESTED AT CURING DAY OF 3, 7, 14, 28 AND 60.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากท่านอาจารย์สุพจน์ ศรีนิล อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำชี้แนะ และให้คำปรึกษาระหว่างการทำโครงงานวิจัย และได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขโครงงานวิจัยฉบับนี้ ผู้เขียนรู้สึกสำนึกในความกรุณาและขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวัดผลโครงงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ท่านอาจารย์ศิลป์ชัย จานสุวรรณ และอาจารย์วิบูลย์ วุฒิญาณ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบโครงงานวิจัยฉบับนี้ ตลอดจนให้ความรู้ในระหว่างที่ผู้เขียนศึกษาอยู่ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้สั่งสอนอบรมผู้เขียนมาโดยตลอด

ในการทำโครงงานวิจัยนี้ ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจาก

- คุณ อลงกต สง่า วิศวกรประจำฝ่ายซ่อมบำรุง โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ได้มอบวัสดุขี้เถ้าลอยเพื่อใช้ในการทำวิจัย

- โรงสีไฟศรีกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ ที่ได้มอบแกลบข้าวเจ้า เพื่อใช้ในการทำวิจัย

- อาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำโรงปฏิบัติงานเซรามิค ภาควิชา ศิลปอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเผาแกลบเพื่อใช้ในการทำวิจัย

- เจ้าหน้าที่ประจำโรงปฏิบัติงานเทคโนโลยีการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์การทดสอบ ตลอดจนให้ความสะดวกตลอดการทำงานโครงการวิจัย

- นายศุภลักษณ์ ตันหยงมาศกุล เพื่อนผู้ช่วยพิมพ์งานตลอดการทำโครงงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นายคมกฤช พูนลาภ, นายมนตรี เกิดมณฑล, นายนิพนธ์ สาดสูงเนิน และเพื่อน ๆ ปที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดการทำโครงงานวิจัย

- บิดา, มารดา และน้องของผู้เขียน ผู้คอยช่วยเหลือสนับสนุน, ให้คำชี้แนะ และให้กำลังใจตลอดการทำโครงงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ความดีหรือประโยชน์ทั้งหลาย อันพึงได้จากโครงงานวิจัยฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่บิดา, มารดา และครูอาจารย์ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนผู้เขียนมาโดยตลอด

นาย พลสันธิ์ พุกะทรัพย์

นาย ธนัฐ วานิชชินชัย

ผู้เขียนกิตติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ก
หน้าอนุมัติ	
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ง
รายการตารางประกอบ	ช
รายการรูปประกอบ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1-6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	7-17
2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย	7
2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2.1.2 ขี้เถ้าลอย	9
2.1.3 ขี้เถ้าแกลบ	11
2.2 ส่วนประกอบทางเคมีโดยเปรียบเทียบ	12
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอซโซลาน (Portland-Pozzoan Cement)	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Hydration and Pozzalanic Reaction) 14

2.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น 14

2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน 15

2.5 ข้อสรุปของการวิจัยในอดีต 16

บทที่ 3 การเตรียมวัสดุวิจัยและการหาปฏิภาคส่วนผสม (Mix Design) 18-32

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 18

3.2 การปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต 19

3.3 ตัวอย่างการหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต 30

บทที่ 4 ปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัยและวิธีการทดสอบวิจัย 33-40

4.1 ปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย 33

4.2 วิธีการทดสอบวิจัย 40

4.2.1 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) 41

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) 43

4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว (Bonding Strength) 43

บทที่ 5 ผลการทดสอบ 45-150

5.1 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัด 45

5.2 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงดึง 46

5.3 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงยึดเหนี่ยว 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ 141-148

6.1 วิเคราะห์ผลการรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ 141

6.2 วิเคราะห์ผลการรับแรงดึงของแท่งตัวอย่างทดสอบ 144

6.3 วิเคราะห์ผลการรับแรงยึดเหนี่ยวของแท่งตัวอย่างทดสอบ 147

บทที่ 7 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ 149-150

7.1 สรุปผลการทดสอบ 149

7.2 ข้อเสนอแนะ 150

ภาคผนวก 151

เอกสารอ้างอิง 171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่ 2.1 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8

ตารางที่ 3.1 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 23

ตารางที่ 3.2 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 24

ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ 25

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีต ในสภาวะเปิดเผยรุนแรง 27

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 28

ตารางที่ 3.6 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต 29

ตารางที่ 5.1.1 - 5.1.16 ค่ากำลังการรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบทุกส่วนผสมที่ทดสอบ ที่เวลา 3, 7, 14, 28และ 60 วัน 49-64

ตารางที่ 5.1.17 สรุปค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมต่าง ๆ มีระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14,28 และ 60 วัน 65

ตารางที่ 5.1.18 ค่ากำลังการรับแรงอัดเป็นเปอร์เซ็นต์และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน 66

ตารางที่ 5.1.19 เปรียบเทียบค่ากำลังการอัดแรงอัดของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ 60 วัน 67

ตารางที่ 5.1.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ กำลังการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน 68

ตารางที่ 5.2.1 - 5.2.16 ค่ากำลังการรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบทุกส่วนผสมที่ทดสอบ ที่เวลา 3, 7, 14, 28และ 60 วัน 80-96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 5.2.17 สรุปค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมต่าง ๆ มีระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14,28 และ 60 วัน 97

ตารางที่ 5.2.18 ค่ากำลังการรับแรงดึงเป็นเปอร์เซ็นต์และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน 98

ตารางที่ 5.2.19 เปรียบเทียบค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ 60 วัน 99

ตารางที่ 5.2.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ กำลังการรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน 100

ตารางที่ 5.3.1 - 5.3.16 ค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบทุกส่วนผสม ที่ทดสอบที่เวลา 3, 7, 14, 28และ 60 วัน 111-126

ตารางที่ 5.3.17 สรุปค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมต่าง ๆ มีระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14,28 และ 60 วัน 127

ตารางที่ 5.3.18 ค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวเป็นเปอร์เซ็นต์และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน 128

ตารางที่ 5.3.19 เปรียบเทียบค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วันกับคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ 60 วัน 129

ตารางที่ 5.3.20 แสดงเปอร์เซ็นต์ กำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่ 5.1.1 - 5.1.4 กราฟเส้นการพัฒนากำลังการรับแรงอัดของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 69-72

รูปที่ 5.1.5 - 5.1.8 กราฟแท่งการพัฒนากำลังการรับแรงอัดของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 73-77

รูปที่ 5.1.9 กราฟเส้นแสดงค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาบ่ม 78

รูปที่ 5.1.10 กราฟแท่งแสดงค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงอัดสูงสุดทุกส่วนผสม 79

รูปที่ 5.2.1 - 5.2.4 กราฟเส้นการพัฒนากำลังการรับแรงดึงของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 101-104

รูปที่ 5.2.5 - 5.2.8 กราฟแท่งการพัฒนากำลังการรับแรงดึงของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 105-108

รูปที่ 5.2.9 กราฟเส้นแสดงค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาบ่ม 109

รูปที่ 5.2.10 กราฟแท่งแสดงค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงอัดสูงสุดทุกส่วนผสม 110

รูปที่ 5.3.1 - 5.3.4 กราฟเส้นการพัฒนากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 131-134

รูปที่ 5.3.5 - 5.3.8 กราฟแท่งการพัฒนากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน 135-138

รูปที่ 5.3.9 กราฟเส้นแสดงค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาบ่ม 139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.3.10 กราฟแท่งแสดงค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงอัดสูสุดทุกส่วนผสม 140

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน มีวัสดุเหลือใช้บางอย่างซึ่งเป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาในด้านมลพิษ, ก่อให้เกิดปัญหาด้านการขจัดทิ้ง มีความสกปรกด้วย แต่วัสดุเหลือใช้ที่ว่านี้มีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีความเป็นซีเมนต์ในตัวเองสูง และมีปริมาณมาก ดังนั้น ถ้าสามารถประยุกต์นำเอาวัสดุเหลือใช้ที่ว่านี้มาช่วยลดปริมาณซีเมนต์ในงานก่อสร้างทั่วไป ก็จะเป็นการช่วยลดปัญหาด้านมลพิษ, ลดปัญหาด้านการขจัดทิ้ง อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่าย เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงได้อีกด้วย

ขี้เถ้าลอย (FLY ASH,FA) เป็นกากที่เหลือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ เช่น ถ่านหินต่าง ๆ ในประเทศไทยการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันช่วยประหยัดเงินตราของประเทศได้เป็นจำนวนมาก แหล่งผลิตถ่านหินที่สำคัญอยู่ที่โรงผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดลำปางและจังหวัดกระบี่ ซึ่งปัจจุบันมีปริมาณถ่านหินทั้งหมดมากกว่า 1,400 ล้านตัน และสามารถขุดขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ทันทีไม่น้อยกว่า 350 ล้านตัน (ปริญญา,2528) ปัจจุบันโรงผลิตไฟฟ้าทั้งสองแห่งใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้ามากกว่า 10,000 ตันต่อวัน และคาดว่าในปีถัดไปจะใช้ปริมาณถ่านหินเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้านั้น เราจะได้ขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินประมาณ 20% โดยน้ำหนักของถ่านหิน ขี้เถ้าที่เหลือใช้นี้แบ่งได้ 3 ลักษณะคือ

1. ขี้เถ้าลอย (Fly Ash) มีขนาดเม็ดเล็กละเอียดมาก สามารถลอยไปกับไอร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ออกไปทางปล่องไฟได้ ต้องทำการเก็บกักไว้โดยเครื่องจับขี้เถ้า (Electrostatic Precipitators) มีปริมาณขี้เถ้าลอยอยู่ประมาณ 82% ของขี้เถ้าทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขี้เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) มีขนาดเม็ดใหญ่จึงตกสะสมอยู่ก้นเตา มีจำนวนประมาณ 18% ของขี้เถ้าทั้งหมด

3. ขี้เถ้าตระกรัน ขี้เถ้าตระกรันจะหลอมละลายจับตามผนังเตาหรือหม้อน้ำ มีปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น (ปริญญา, 2528)

จะเห็นได้ว่าปริมาณขี้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดนั้นมีปริมาณมากมาย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายในการขนไปทิ้ง และยังก่อให้เกิดมลภาวะจากการฟุ้งกระจายของขี้เถ้าอีกด้วย ดังนั้นการประยุกต์นำขี้เถ้าลอยไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้มาก อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณซีเมนต์ลงได้อีกด้วย

ขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) เกิดจากการเผาไหม้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งแกลบเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือก แกลบจึงมีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณข้าวที่ผลิตได้ภายในประเทศ ซึ่งผลผลิตข้าวได้เพิ่มขึ้นตลอดเวลา จากการส่งเสริมการเกษตรโดยรัฐบาลและหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันผลการผลิตข้าวมีประมาณ 20 ล้านตัน โดยทั่วไปการสีข้าวจะได้ปริมาณแกลบประมาณ 22-25% โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นทั้งประเทศจะมีปริมาณแกลบถึง 5 ล้านตัน แกลบเป็นวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี ให้ความร้อนประมาณ 3,800 กิโลแคลอรีต่อแกลบหนึ่งกิโลกรัม (อุดม, 2533) ดังนั้นในประเทศไทยแกลบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าวขนาดกลาง และโรงสีข้าวขนาดใหญ่ที่ใช้เครื่องจักรไอน้ำ นอกจากนั้นยังถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ใช้ในการเผาอิฐ และเนื่องจากแกลบมีสารประกอบ ซิลิเกต (Silicate) มาก ทำให้การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงจะเกิดขี้เถ้าแกลบ 16-20% โดยน้ำหนักของแกลบ ทำให้การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงจะเกิดปัญหาในด้านการต้องกำจัดขี้เถ้า และต้องป้องกันมลภาวะจากขี้เถ้า ดังนั้นถ้าเราสามารถนำขี้เถ้านี้มาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตได้ก็จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้บ้างพอสมควรและยังสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปทั้งขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ไม่มีราคาและยังเป็นภาระที่ต้องกำจัด ถ้าเราสามารถนำขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบเหล่านี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ ก็จะเป็นการลดภาระในการกำจัดและได้ประโยชน์เพิ่มขึ้น ในขอบข่ายของการนำของเสียกลับมาใช้ และจากคุณสมบัติที่ว่าขี้เถ้าลอยมีขนาดเล็กมาก มีส่วนประกอบทางเคมี และการเกิดคล้ายกับขี้เถ้าภูเขาไฟซึ่งเป็นคุณสมบัติของซีเมนต์ธรรมชาติ และขี้เถ้าแกลบก็ให้ผลทำนองเดียวกัน เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานจำนวนมาก และต้นทุนในการผลิตสูง ดังนั้นถ้าเราสามารถผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบลงในคอนกรีตในปริมาณและอัตราส่วนที่เหมาะสม ก็จะสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ในบางส่วน โดยที่คอนกรีตผสมนี้ยังมีคุณสมบัติในด้านกำลังการรับแรงอัด, แรงดึงและแรงยึดเหนี่ยวอยู่ในเกณฑ์ที่คาดว่าจะสามารถนำไปใช้งานได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงของคอนกรีตผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ กับความแข็งแรงของคอนกรีตล้วน

1.2.2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย ในส่วนผสมคอนกรีตว่ามีอัตราส่วนเท่าไรจึงจะทำให้มีความแข็งแรงที่เหมาะสมในการใช้งาน

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงระยะเวลาการบ่มหลังจาก 28 วันว่าความแข็งแรงมีแนวโน้มอย่างไร เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขี้เถ้าแกลบ เป็นขี้เถ้าแกลบจากการเผาแกลบข้าวเจ้า ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และบดละเอียดโดย Los Angeles Abrasion Machine และผ่านการร่อน ผ่านตะแกรงเบอร์ 100
- ขี้เถ้าลอย เป็นขี้เถ้าลอยจากการเผาไหม้ ถ่านหินลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- หิน เป็นหินปูนขนาดเบอร์ 2 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป
- ทราย เป็นทรายแม่น้ำ ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป
- น้ำ เป็นน้ำประปา

1.3.2 ขอบเขตของวิธีทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

- ทดสอบกำลังรับแรงอัด
- ทดสอบกำลังรับแรงดึง
- ทดสอบแรงยึดเหนี่ยว

(การทดสอบทั้งหมด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM)

1.3.3 ขอบเขตของระยะเวลาการบ่มตัวอย่างทดสอบ

- 3,7,14,28 และ 60 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 ขอบเขตของอัตราส่วนผสมในคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ (OPC)	:	ขี้เถ้าแกลบ (RHA)	:	ขี้เถ้าลอย (FA)	
100	:	0	:	0	
90	:	0	:	10	
90	:	5	:	5	
90	:	10	:	0	
80	:	0	:	20	
80	:	5	:	15	
80	:	10	:	10	
80	:	15	:	5	
80	:	20	:	0	
70	:	0	:	30	
70	:	5	:	25	
70	:	10	:	20	
70	:	15	:	15	
70	:	20	:	10	
70	:	25	:	5	
70	:	30	:	0	รวม 16 ส่วนผสม

รวมตัวอย่างที่ต้องทดสอบวิจัย = 3*3*5*16 = 720 ตัวอย่าง

(แต่ละชุดทดสอบ 3 ตัวอย่าง)

1.4 ประโยชน์และผลที่จะได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย ที่สามารถนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อเป็นข้อมูลที่อาจจะมีการนำไปใช้ประโยชน์หรืออ้างอิงได้ในการวิจัยต่อ ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในงานด้านวิศวกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญซึ่งมีราคาแพง ถ้าเราสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยให้คุณสมบัติทางด้านกำลังคงเดิมก็จะเป็นการประหยัดที่ดี ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีผู้สนใจในวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ (Pozzolan) เช่น ขี้เถ้าลอยจากถ่านหิน และขี้เถ้าแกลบ จากการเผาแกลบ ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นวัสดุที่เหลือใช้ตามธรรมชาติซึ่งมักจะไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และยังก่อให้เกิดมลภาวะที่ไม่ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาว่าจะสามารถนำขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ได้หรือไม่และคุณสมบัติที่ได้เป็นอย่างไร หัวข้อการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศและต่างประเทศ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย
- ส่วนประกอบทางเคมีโดยเปรียบเทียบ
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอซโซลาน
- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Hydration and Pozzolanic Reaction)
- ข้อสรุปของการวิจัยในอดีต

2.1 ความรู้พื้นฐานของวัสดุที่ทำการวิจัย

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในทางวิศวกรรม โดยที่เมื่อผสมกับหิน ทราย และน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม จะได้คอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ถึง 1500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ประเภทที่หนึ่งให้ธาตุคัลเซี่ยม ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว ประเภทที่สองให้ธาตุซิลิก้าและอลูมิน่า ได้แก่ หินเชล ดินเหนียว หินชนวน

2.1.1.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อเผาส่วนผสมของปูนซีเมนต์แล้วสารออกไซด์ของธาตุคัลเซียม ซิลิก้า อลูมิน่าและเหล็ก จะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

2.1.1.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากจำนวนของสารประกอบจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์แล้ว ชนิดของสารประกอบก็เป็นตัวสำคัญที่กำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้

ไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต Tricalcium Silicate, (C_3S)]จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก การเพิ่มยิบซั่มจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสภาพพลาสติกมากขึ้น และช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต [Dicalcium Silicate, (C_2S)] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้าให้กำลังสูงและเกิดความร้อนน้อย การเพิ่มยิบซั่มจะให้ผลหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บ้างเล็กน้อย

ไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนต [Trialcium aluminate, (C_3A)] จะก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำให้ความร้อนสูงจะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรก และจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต

เทตราคัลเซี่ยมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ [Tetracalcium aluminoferrite, (C_4AF)] จะก่อตัวอย่างรวดเร็วแต่ช้ากว่า และให้ความร้อนน้อยกว่าไทรคัลเซี่ยมอลูมิเนตเล็กน้อยส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_3S) และ ไดคัลเซี่ยมซิลิเกต (C_2S) รวมประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือคัลเซี่ยม(CaO)ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และซิลิก้า(SiO_2)ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้ง 2 ธาตุนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไทรคัลเซี่ยมซิลิเกตและไดคัลเซี่ยมซิลิเกตซึ่งจะให้กำลังรับแรงได้สูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (อุดม,2533)

2.1.2 <u>ขี้เถ้าลอย</u> ขี้เถ้าลอย คือ ขี้เถ้าส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ถ่านหิน มีขนาดเล็กมาก อาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่ว ๆ ไป รูปร่างมักมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม เนื่องจากส่วนประกอบและวิธีการเกิดคล้ายคลึงกับการเกิดของขี้เถ้าภูเขาไฟซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ขี้เถ้าลอยจึงมีคุณลักษณะในทำนองเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้งาน 033289

2.1.2.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ทำให้เกิดขี้เถ้าลอย คือ ถ่านหิน เมื่อถ่านหินถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้แล้วจะได้ขี้เถ้า ถ่านหินที่ใช้นี้มีอยู่ 4 ประเภท คือ

1. แอนทราไซด์ (Antracite)
2. บิทูมินัส (Bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (Sub - Bituminous)
4. ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงมาช้านาน ถ่านหินในประเทศแถบยุโรป ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกา ส่วนมากเป็นถ่านหินคุณภาพสูง คือ ให้พลังงานความร้อนมาก มีอายุการเกิดยาวนานได้แก่ พวก แอนทราไซด์ บิทูมินัส ซับมิทูมินัส แต่ในประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำเป็นเชื้อเพลิง อาจทำให้คุณสมบัติของขี้เถ้าลอยในประเทศไทยแตกต่างกับขี้เถ้าลอยจากถ่านหินคุณภาพสูงในต่างประเทศ จึงเป็นจุดที่น่าทำการศึกษา

2.1.2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอย ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย จะมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3, และ Fe_2O_3 เป็นส่วนใหญ่

2.1.2.3 อิทธิพลของขี้เถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอยเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) อย่างหนึ่งส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญในขี้เถ้าลอย คือ ซิลิก้า (SiO_2) อลูมิน่า (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกันกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ [Calcium Silicate Hydrate,(C-S-H)] ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานให้กำลังรับแรงของคอนกรีตเป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าแกลบ คือ ขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาไหม้ในลักษณะต่างกัน จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปบ้าง เช่น ถ้าเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าวเป็นการเผาที่ใช้เวลาน้อยอุณหภูมิไม่สูงมากจะได้ขี้เถ้าที่มีสีดำเป็นส่วนใหญ่ เพราะมีส่วนประกอบของคาร์บอนสูง มีขนาดใหญ่ มีคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่ำ แต่ถ้าการเผาไหม้อยู่ในการควบคุมหรือใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการเผาไหม้นานพอ เราจะได้ขี้เถ้าแกลบที่มีลักษณะดี มีสีขาว ปริมาณคาร์บอนต่ำ และคุณสมบัติในการพัฒนากำลังเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดีขึ้น

2.1.3.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบคือแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกตามปกติ

2.1.3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบมีซิลิก้า (SiO_2) สูงมาก คือประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ คัลเซี่ยม (CaO) ต่ำมากไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์และที่สำคัญมากคือเกือบจะไม่อนุมูลซัลเฟต(SO_3)เลย

2.1.3.3 อิทธิพลของขี้เถ้าแกลบต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบมีลักษณะการเกิด และส่วนประกอบทางเคมีคล้ายขี้เถ้าลอย และเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolanas) อย่างหนึ่งโดยซิลิก้า (SiO_2) ในขี้เถ้าแกลบ สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] ในน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมี	ส่วนประกอบทางเคมี (%)		
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ขี้เถ้าลอย	ขี้เถ้าแกลบ
SiO_2	20.20	35.43	94.80
CaO	63.82	11.92	0.40
Al_2O_3	5.42	28.27	1.27
Fe_2O_3	2.92	14.57	0.20
MgO	1.50	2.13	0.20
K_2O	0.46	2.48	1.26
MnO_2	-	0.11	0.14
TiO_2	-	0.38	0.03
So_3	2.55	2.35	0.08
ZnO	-	0.01	-
PbO	-	0.04	-
ZrO_2	-	-	0.01
SrO	-	0.09	-
Na_2O	0.26	-	0.20
CuO	-	0.05	-

(อุดม, 2533)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ขี้เถ้าลอย, และขี้เถ้าแกลบพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแคลเซี่ยม (CaO) เป็นส่วนใหญ่ คือ มีแคลเซี่ยมถึง 63.82% มากกว่าในขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ แต่มีผลรวมของซิลิก้า, อลูมิน่า และเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$)เท่ากับ 28.54% เท่านั้น ซึ่งสารประกอบส่วนนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีโดยรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ส่วนขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบกลับมีซิลิก้า (SiO_2) เป็นส่วนใหญ่คือมี 35.43 และ 94.80 % ตามลำดับ และมีผลรวมของซิลิก้า, อลูมิน่าและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับ 78.27 และ 96.27% ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนที่จะไปทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์หรือคือ สารที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (อุดม, 2533)

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland-Pozzolan Cement)

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอซโซลาน (Portland-Pozzolan Cement) เป็นซีเมนต์ที่ได้จากการผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับหินซิลิเกตที่มีคุณลักษณะปอซโซลาน (Pozzolanic Activity) หินหรือวัสดุที่มีคุณลักษณะปอซโซลาน คือ วัสดุที่เมื่อมีน้ำจะมีคุณสมบัติที่รวมตัวได้กับน้ำปูนขาว (Lime) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั่วไปแล้วเชื่อว่าสารประกอบที่ได้จากการรวมตัวของปอซโซลานกับน้ำปูนขาวนี้คือ โมโนดัลเซียมซิลิเกต สารประกอบนี้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ไม่ละลายในน้ำ ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามกาลเวลา วัสดุธรรมชาติที่มีคุณลักษณะปอซโซลานมากพอสมควรคือ หินพุมไม้ (Pumicite) หินขี้เถ้าภูเขาไฟ (Trasses หรือ Tuffs) ดินเบา (Diatomaceous earth) หินเชล (Shales) ปกติแล้วสามารถผสมวัสดุธรรมชาติเหล่านี้เข้าไปบดพร้อมกับปูนเม็ด (Clinker) ของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรืออาจจะบดแล้วใช้ผสมแทนบางส่วนของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยผสมเข้าไปในขณะผสมคอนกรีตหรืออาจจะมีโรงผสมทำซีเมนต์ผสมก่อนก็ได้ ปริมาณวัสดุปอซโซลานที่ใช้แทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เฉลี่ยแล้วประมาณร้อยละ 25 (ประจิต,2525)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานซึ่งมีส่วนผสมของปอซโซลานธรรมชาติในอัตราที่เหมาะสม จะมีคุณสมบัติดีกว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เช่น คอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจะมีสภาพใช้งาน (Workability) ดีกว่า มีความต้านทางต่อการเกิดแยกกลุ่ม (Seggregation) ได้ดีกว่าเมื่อใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ถึงแม้ว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานจะให้กำลังความแข็งแรงเมื่อแรกเริ่มต่ำแต่ระยะยาวแล้วก็สูงและอาจจะสูงกว่าด้วย นอกจากนี้แล้ว คอนกรีตจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานยังมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ต่ำและมีคุณสมบัติด้านการกัดกร่อนจากน้ำได้ดี (ประจิต,2525)

2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Hydration and Pozzolanic Reaction)

2.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (HydrationX) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเป็นปฏิกิริยาหลักของการเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้เป็นสารเชื่อมประสานเพื่อพัฒนากำลังรับแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบที่สำคัญต่อการพัฒนากำลังซึ่งเราสนใจศึกษา คือ ไทรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำแล้วจะเกิดสารประกอบคัลเซียมไฮเดรท [Calcium Silicate Hydrate,(CSH)] และคัลเซียมไฮดรอกไซด์ [Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$] อีกประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นคือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้ว จะเกิดเป็นไฮเดรทคอมปาว (Hydrate Compound) โดยไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$2(3CaO\ SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO\ SiO_2\ 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO\ SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO\ SiO_2\ 3H_2O + Ca(OH)_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินเรื่อยไป โดยคัลเซี่ยม (CaO) จะแยกตัวออกมาจาก คัลเซี่ยมซิลิเกต ($CaO\ SiO_2$) ไปเป็นคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] หรือสารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกต ($CaO\ SiO)_2$ ทำปฏิกิริยาไปจนหมดจากสารละลาย

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทั้ง 2 ส่วน คือ

1. คัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate, CSH) มีสูตรเคมีเป็น $3CaO\ Sio_2\ 3H_2O$ ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน

2. คัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) มีสูตรเคมีเป็น[$Ca(OH)_2$] คัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระนี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งความหมายของสารปอซโซลานนั้นหมายถึงวัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระแล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมซิลิก้า (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) จากวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์อิสระ [$Ca(OH)_2$] ซึ่งเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงแรก โดยอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \quad \text{-----}> \quad 3CaO\ 2SiO_2 3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \quad \text{-----}> \quad 3CaO\ 2Al_2O_3 3H_2O$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท $3CaO\ 2SiO_2 3H_2O$ และสารประกอบคัลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรท $3CaO\ 2Al_2O_3 3H_2O$ เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ และการผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เมื่อปฏิกิริยาเกิดช้าจะเป็นการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลงด้วย (อุดม,2533)

2.5 ข้อสรุปของการวิจัยในอดีต

ประจิต จิรัปปภา (พ.ศ. 2525) พบว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์คงที่ การเติมขี้เถ้าลอยเข้าไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าที่เติมเข้าไป และขี้เถ้าลอยที่เติมเข้าไปในคอนกรีต สามารถใช้แทนซีเมนต์ได้ 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 2 1/2 เดือน ตามลำดับ โดยที่ยังได้กำลังคอนกรีตเท่าเดิม

ปริญญา จินดาประเสริฐและอินทรชัย หอวิจิตร (พ.ศ.2528) พบว่า กำลังรับแรงอัดระยะเริ่มแรกของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณขี้เถ้าลอย เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดจะดีขึ้นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานโดยที่ขี้เถ้าลอยที่ใช้แทนซีเมนต์สามารถแทนได้ถึง 40% โดยที่กำลังการรับแรงอัดยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาอีกด้วย

กรกฎ วิจิตรพงศ์ (พ.ศ.2531) พบว่า การเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด ในรูปของการยุบตัว การไหล และการทำให้แน่น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมลงในส่วนผสม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะลดลงตามปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสม โดยจะมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง กล่าวคือ จะลดค่าประมาณ 10% ทุก ๆ 10% ของปริมาณขี้เถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุดม หงษ์ประชานพร (พ.ศ.2533) พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงและการพัฒนาสารเชื่อมประสานของส่วนผสมที่มีอัตราส่วนขี้เถ้าที่เหมาะสม จะให้ลักษณะการพัฒนากำลังรับแรงและสารเชื่อมประสานที่อายุช่วงแรกน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงอายุหลัง กำลังรับแรงและสารเชื่อมประสานจะมากกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา โดยที่ปริมาณขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอยที่เหมาะสมในส่วนผสมคือ ประมาณ 20% โดยน้ำหนักซีเมนต์ (ส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอยให้ผลดีกว่าขี้เถ้าแกลบเล็กน้อยคือที่อายุ 90 วันกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับ 453 KSC. กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเท่ากับ 415 KSC.)

ธนิต วิชานติรวัฒน์และพิเชษฐ์ เลาหพจนากุล (พ.ศ.2533) พบว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่มีขี้เถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัวสูง คือ ยิ่งมีขี้เถ้าลอยมากค่าการยุบตัวยิ่งสูง ซึ่งสามารถทำให้การทำงานคอนกรีตง่ายขึ้น ส่วนกำลังการรับแรงอัด, แรงดึง, และแรงยึดเหนี่ยวนั้นพบว่าในช่วงแรกของคอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอยจะมีกำลังน้อยกว่าคอนกรีตล้วน แต่หลังจาก 14 วันไปแล้วคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีแนวโน้มการเพิ่มของกำลังรับแรงสูงมาก (กราฟการรับกำลังชันมาก) และขี้เถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตปริมาณที่เหมาะสมคือ 10 - 30 %

ธงชัย ดลศรีชัยและชนินทร์ รุ่งเรืองพัฒนา (พ.ศ.2533) พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมขี้เถ้าแกลบจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูงมาก (ยิ่งผสมขี้เถ้าแกลบมากความต้านทานซัลเฟตยิ่งมากตาม) อีกทั้งขี้เถ้าแกลบมีความพรุนในตัวเองสูงเหมาะกับการทำเป็นวัสดุที่ประกอบการก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา และมีแนวโน้มที่จะมีความสามารถในการเก็บเสียงได้ดี ปริมาณขี้เถ้าแกลบที่เหมาะสมสามารถผสมได้ในอัตราส่วนซีเมนต์ 70 % ต่อขี้เถ้าแกลบ 30% โดยที่กำลังการรับแรงอัดลดลงประมาณ 20 - 40% นอกจากนี้กำลังการรับแรงอัด ยังสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้อีกถ้าสามารถบดขี้เถ้าแกลบมีความละเอียดมากขึ้นและขี้เถ้าแกลบถูกเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การเตรียมวัสดุวิจัย และการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภท 1 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C 150-71 Type 1 ซึ่งในการวิจัยนี้ ใช้ปูนตราเพชร ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด

3.1.2 ขี้เถ้าแกลบ แกลบที่นำมาใช้เป็นแกลบข้าวเจ้าจากโรงสีไฟศรีกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ ขี้เถ้าแกลบที่ใช้จะต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสโดยการวิจัยนี้ทำการเผาที่เตาเผาของภาควิชา ศิลปอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การเผาแกลบที่อุณหภูมินี้จะทำให้ซิลิกาในขี้เถ้าแกลบอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ถ้าเผาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีสารอินทรีย์เหลืออยู่ แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงไปซิลิก้าที่ได้จะอยู่ในรูปผลึก (Crystal) ซึ่งเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (ปริญญา, 2528) ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาแล้วจะต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนจึงจะใช้งานได้ โดยการบดละเอียดนั้นจะใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion Machine ซึ่งเป็นกล่องทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 cm. และยาว 50 cm. ตั้งตามยาวบนเพลาแนวนอน เครื่องจะหมุนด้วยอัตรา 40 รอบต่อนาที วัสดุสำหรับขัดสี คือลูกกลมเหล็กหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm. การบดนั้นจะบดรวม 10,000 รอบ สำหรับขี้เถ้าแกลบ 10 kg. หลังจากบดแล้วจะต้องนำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จึงจะสามารถนำมาใช้งานได้

3.1.3 ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าลอยที่ใช้ ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ที่โรงผลิตไฟฟ้าอำเภอ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ลักษณะของขี้เถ้าลอยเป็นฝุ่นผงละเอียด สีน้ำตาลเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ทราย ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป มีลักษณะเป็นทรายหยาบ เม็ดอนุภาคมีเหลี่ยมมุม มีขนาดต่าง ๆ กันตั้งแต่หลายมิลลิเมตรจนถึงฝุ่นทรายก่อนนำไปใช้จะผึ่งในร่มให้แห้งสนิทก่อน

3.1.5 หิน หินที่ใช้เป็นหินปูนขนาดเบอร์ 2 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป

3.2 การหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตโดยรวมก่อน ส่วนตัวอย่างการหาปฏิภาคส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบจริงนั้นจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

การคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปซึ่งหล่อกับที่ อาจจะดำเนินเป็นขั้น ๆ ตามวิธีการซึ่งเสนอโดย สถาบันคอนกรีต ของอเมริกา (ACI 211.1-70) ดังต่อไปนี้ซึ่งให้ผลค่อนข้างแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงและถูกต้องทั้งนี้จะต้องทราบถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตเสียก่อน เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ, หน่วยน้ำหนัก, โมดูลัสความละเอียดและเปอร์เซ็นต์การดูดซึม เป็นต้น อีกทั้งวัสดุผสมต้องมีส่วนขนาดคละอยู่ในพิกัดกำหนดด้วย

3.2.1 เลือกค่าความยุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงาน

ค่าความยุบตัวต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และให้ได้ความข้นเหลวพอทำงานได้สะดวก ในกรณีที่มิได้กำหนดค่าความยุบมาให้ ค่าความยุบตัวที่เหมาะสมกับประเภทของงานเลือกใช้ได้จากตารางที่ 3.1

3.2.2 เลือกขนาดโตสุดของวัสดุผสม

ขนาดโตสุดของวัสดุผสม ไม่ควรเกินกว่า 1/5 ของส่วนแคบที่สุดของแบบหรือ 1/3 ของความหนาของแผ่นพื้น หรือ 2/4 ของขนาดความห่างของเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบ (หิน) ที่เหมาะสมกับประเภทการใช้งานอาจเลือกได้จากตารางที่ 3.2

3.2.3 ปริมาณน้ำที่ผสม

ตารางที่ 3.3 ให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวตามที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโตสุด รูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุผสมในตารางดังกล่าว ยังให้ค่าปริมาณฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟองอากาศ และปริมาณฟองอากาศที่ควรจะมีในส่วนผสมคอนกรีตเมื่อใส่สารทำให้เกิดฟองอากาศ

3.2.4 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (W/C Ratio)

อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะที่คอนกรีตนั้นถูกนำออกไปใช้งานและกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต้องการ ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตสำหรับวัสดุผสมที่จะใช้ผสมทำคอนกรีต ก็ให้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จากตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตารางที่ 3.4 ให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่มากที่สุดสำหรับประเภทงาน และสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ส่วนตารางที่ 3.5 ให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักที่มากที่สุดสำหรับค่าเฉลี่ยของกำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ต้องการ และให้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่ต่ำที่สุดซึ่งหาได้จาก 2 ตารางนี้

3.2.5 คำนวณปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักแล้ว ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ในคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรย่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาได้ซึ่งเท่ากับปริมาณน้ำจากข้อ 3.2.3 หารด้วยอัตราส่วนในข้อ 3.2.4 อย่างไรก็ดี ถ้ากำหนดปริมาณซีเมนต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตมาให้ก็ให้เลือกใช้ค่าที่มากที่สุดจากที่คำนวณได้หรือที่กำหนดให้

3.2.6 คำนวณปริมาณวัสดุผสมหยาบ (หิน)

ตารางที่ 3.6 แสดงปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นในส่วนผสมต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งแตกต่างตามค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ใช้และขนาดโตที่สุดของหินที่ใช้ ปริมาณของวัสดุผสมหยาบคิดเป็นน้ำหนักมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัสดุผสมหยาบคูณด้วยหน่วยน้ำหนักของวัสดุผสมหยาบนั้น

3.2.7 ปริมาณวัสดุผสมละเอียด (ทราย)

เมื่อได้ค่าต่าง ๆ ของส่วนผสมจนถึง 3.2.6 แล้ว ปริมาณของวัสดุผสมละเอียดจะหาได้ดังนี้

ปริมาตรเนื้อแท้ของวัสดุผสมละเอียด = ปริมาตรคอนกรีต - ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสมต่าง ๆ (ยกเว้นทราย)

โดยที่ปริมาตรเนื้อแท้ (ซึ่งเป็นปริมาตรที่ไม่มีช่องว่างในเนื้อ) ของวัสดุคำนวณได้จากความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักของวัสดุ กล่าวคือ

$$\text{ปริมาตรเนื้อแท้} = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุ}}{\text{ความถ่วงจำเพาะ} * \text{หน่วยน้ำหนักน้ำ}}$$

3.2.8 ปรับส่วนผสมเนื่องจากความชื้นของวัสดุผสม

ตามปกติ วัสดุผสมที่ใช้งานจริงจะมีความชื้นสูงกว่าในสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้ง ฉะนั้นจึงต้องแก้ส่วนผสมให้เข้ากับสภาพจริง โดยเพิ่มน้ำหนักของวัสดุผสมขึ้นเท่ากับน้ำหนักน้ำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดมาและลดน้ำในส่วนผสมออกในจำนวนเท่ากัน ในกรณีที่วัสดุผสมแห้งกว่าสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้งจะต้องแก้ส่วนผสมเช่นเดียวกันในทางตรงกันข้าม

หมายเหตุ

ขั้นตอนต่าง ๆ ของวิธีการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตนี้เป็นขั้นตอน ในการหาปฏิภาคส่วนผสมสำหรับคอนกรีตล้วนตามมาตราฐานของสถาบันคอนกรีตของสหรัฐอเมริกา(ACI) แต่ในกรณีที่ส่วนผสมคอนกรีตมีสารปอซโซลานผสมอยู่ด้วย จำเป็นต้องประยุกต์บางขั้นตอนสำหรับหาปฏิภาคส่วนผสมดังนี้

3.2.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสม

อัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นจะหาได้จากการทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ต้า หาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ที่ทำให้ซีเมนต์มอร์ต้ามีอัตราการไหลแผ่ 100 -115 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ประเภทของงาน	ค่าความยุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด*	ค่าต่ำสุด
งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	2.0	2.0
งานฐานราคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

*อาจเพิ่มได้อีก 2 ซม. สำหรับการทำคอนกรีตให้แน่นตัวโดยวิธีการอื่น ที่นอกเหนือไปจากการใช้เครื่องสั่น (Vibrator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ขนาดความหนาของโครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คาน ผนังและเสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีต รับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0-15.0	1/2-3/4	12.5-20	3/4	20	3/4-1	20-25	3/4-1 1/2	20-40
15.0-30.0	3/4-1 1/2	20-40	1 1/2	40	1 1/2	40	1 1/2 - 3	40-75
30.0-75.0	1 1/2-3	40-75	3	75	1 1/2-3	40-75	3	75
มากกว่า 75.0	1 1/2-3	40-75	6	150	1 1/2-3	40-75	3 - 6	75-150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ

ค่าความยุบตัว (ซม.)	ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ม.^{3} สำหรับวัสดุขนาดต่าง ๆ							
	3/8" (10มม.)	1/2" (12.5มม.)	3/4" (20มม.)	1" (25มม.)	1 1/2" (40มม.)	2" (50มม.)	3" (75มม.)	6" (150มม.)
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ								
3 - 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 - 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 - 18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ								
3 - 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 - 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 - 18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ปริมาณน้ำที่แสดงนี้เป็นปริมาณสูงสุดสำหรับหินที่มีรูปร่างดี ช่วยให้ทำงานง่ายและลดหลั่นดีตามข้อกำหนด ถ้าจำเป็นต้องเพิ่มน้ำในส่วนหสม จะต้องเพิ่มปูนซีเมนต์เพื่อให้อัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์คงที่

นอกจากผลการทดลองแสดงว่าคอนกรีตมีกำลังสูงเกินต้องการ

ถ้าส่วนผสมต้องการน้ำน้อยกว่ากำหนด ยังไม่ควรลดปริมาณปูนซีเมนต์นอกจากผลการทดลองแสดงว่าคอนกรีตให้กำลังสูงกว่าต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลาหรือมีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำสลับกันบ่อย ๆ (เฉพาะคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำเค็มหรือถูกกับซัลเฟต
โครงสร้างบาง ๆ ที่มีเหล็กหุ้มบางกว่า 3 ซม.	0.45	0.40*
โครงสร้างอื่น ๆ ทั้งหมด	0.50	0.45*

*ถ้าใช้ปูนซีมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (ประเภทสองหรือประเภทห้า) อาจเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นี้ได้อีก 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน (กก./ซม.^{2})	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ได้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 15*30 ซม. ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อปริมาตร			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8" (10 มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2" (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4" (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 " (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"(40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2 " (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3" (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6" (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

หมายเหตุ ค่าที่กำหนดให้นี้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ตัวอย่างการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design)

ปูนซีเมนต์

- ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ 3.125

หิน

- วัสดุผสมหยาบขนาดโตสุด 40 มิลลิเมตร
- ความถ่วงจำเพาะ 2.658
- ค่าความชื้น 1.10 %
- หน่วยน้ำหนักแห้ง (ความหนาแน่น) 1569.015 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- การดูดซึมน้ำ 0.3838 %

ทราย - ความถ่วงจำเพาะ 2.455
- ค่าความชื้น 1.21 %
- ค่าโมดูลัสความละเอียด 2.60
- การดูดซึมน้ำ 2.167 %

กรณีอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย = 90 : 50 : 5

3.3.1 เลือกใช้ค่าความยุบตัว 8 -10 เซนติเมตร

3.3.2 คอนกรีตไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศและจากตาราง 3.3 เมื่อขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 25 มิลลิเมตร ค่าความยุบตัว 8 - 10 เซนติเมตร จะได้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ 195 ลิตร/ลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต

3.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมจากการทดสอบอัตราการไหลแผ่ ได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมเท่ากับ 0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ $= \frac{195}{0.64}$

$= 304.7$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรคอนกรีต

3.3.5 หาปริมาณของวัสดุผสมหยาบจากตาราง 3.6 เมื่อค่าโมดูลัสละเอียดของวัสดุผสมเท่ากับ 2.60 และขนาดโตสุดของวัสดุผสมหยาบเป็น 25 มิลลิเมตร จะได้ปริมาณของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่น

$= 0.69$ m^3/m^3 ของคอนกรีต (โมดูลัสของหิน)

หน่วยน้ำหนักของหิน $= 1569.015$ kg/m^3

ดังนั้น น้ำหนักของวัสดุผสมหยาบที่ใช้ $= 0.69 * 1569.015$

$= 1082.6$ kg/m^3 คอนกรีต

3.3.6 หาปริมาณของวัสดุผสมละเอียด (ทราย)

ปริมาตรเนื้อแท้ของส่วนผสม :

ปริมาตรของน้ำ $= \frac{195}{1000} = 0.195$ m^3

ปริมาตรของซีเมนต์ $= \frac{304.7}{3.125*100} = 0.098$ m^3

ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบ $= \frac{1082.6}{2.658*100} = 0.41$ m^3

ปริมาตรของฟองอากาศ $= 0.01*1 = 0.010$ m^3

ดังนั้น ปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดยกเว้นทราย $= 0.713$ m^3

ปริมาตรของทรายที่ต้องใช้ $= 1-0.713$

$= 0.287$ m^3

น้ำหนักของทราย $= 0.287*2.455*1000$

$= 702$ kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 ปรับส่วนผสมเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

ทรายดูดซึมน้ำ = 2.167 %

หินดูดซึมน้ำ = 0.3838 %

ปริมาณน้ำที่ห่อหุ้มทราย = 702(0.02167) = 15.2 kg.

ปริมาณน้ำที่ห่อหุ้มหิน = 1082.6(0.003838) = 4.15 kg.

เพราะฉะนั้น ใช้ปูนซีเมนต์ = 304.7 kg/m^3

น้ำ = 195-15.2-4.15 = 175.6 kg/m^3

หิน = 1082.6(1.021) = 1095.7 kg/m^3

ทราย = 702(1.011) = 709.7 kg/m^3

ส่วนผสมนี้ (90:5:5) มี 3*5*5 = 45 ตัวอย่างทดสอบ

(ทดสอบ 3 กำลัง

5 ระยะเวลาบ่ม

3 ตัวอย่างต่อ 1 ชุด)

1 แท่งตัวอย่างทดสอบ มีปริมาตร = 0.005301 m^3

45 แท่งตัวอย่างทดสอบ มีปริมาตร = 45*0.005301

= 0.24 m^3

การผสมเผื่อปริมาณคอนกรีต 10% = 0.24 * 1.10 = 0.264 m^3

ดังนั้น ใช้ปูนซีเมนต์ = 0.264*304.7*0.9 = 72.397 kg.

ขี้เถ้าแกลบ = 0.264*304.7*0.05 = 4.022 kg.

ขี้เถ้าลอย = 0.264*304.7*0.05 = 4.022 kg.

หิน = 0.264*1095.7 = 289.265 kg.

ทราย = 0.264*709.7 = 187.361 kg.

น้ำ = 0.264*175.6 = 46.358 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ปริมาณวัสดุ - อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

และ

วิธีการทดสอบวิจัย

4.1 ปริมาณวัสดุ-อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ประมาณ 20 ถุง
2. ขี้เถ้าแกลบ เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และบดละเอียดประมาณ 130 kg.
3. ขี้เถ้าลอย จากแม่เมาะประมาณ 130 kg.
4. ทรายแม่น้ำ ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป
5. หินปูนขนาดเบอร์ 2 ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป
6. น้ำประปา

(รายการวัสดุที่ 1-6 ใช้สำหรับการทดสอบ 720 ตัวอย่างแสดงปริมาณละเอียดท้ายหัวข้อ)

7. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm. ยาวเส้นละ 1.00 m. จำนวน 240 เส้น
8. กำมะถันผงและหม้อต้มสำหรับหล่อหัวท้ายแท่งคอนกรีต
9. เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนเบอร์ต่าง ๆ
10. เครื่องชั่งอิเลคทรอนิค
11. ถาดพลาสติกและถาดสังกะสี
12. เครื่อง Los Angeles Abrasion Machine
13. แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. สูง 30 cm.
14. เกรียงเหล็ก, คีม และค้อน
15. เครื่องโม่ผสมคอนกรีต
16. พลั่วตักคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm. สำหรับกระทุ้งคอนกรีต

18. โต๊ะควบคุมการไหลพร้อมแบบกรวย (Flow Table)

19. เครื่องหล่อหมวก (Capped) หัวท้ายของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

20. เครื่องทดสอบคอนกรีต (Universal Testing Machine)

4.1.1 สำหรับคอนกรีตอัตราส่วน OPC.:RHA.:FA = 100:0:0

W/C Ratio = 0.62

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	83.081	kg.
	น้ำ	46.395	kg.
	ทราย	186.033	kg.
	หิน	289.265	kg.

(OPC. คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภท 1
RHA. คือ ขี้เถ้าแกลบ
FA. คือ ขี้เถ้าลอย)

4.1.2 OPC. : RHA. : FA = 90 : 0 : 10

W/C Ratio = 0.64

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	72.397	kg.
	น้ำ	46.358	kg.
	ทราย	187.361	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	-	kg.
	FA	8.044	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 OPC. : RHA. : FA = 90 : 5 : 5

W/C Ratio = 0.64

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	72.397	kg.
	น้ำ	46.358	kg.
	ทราย	187.361	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	4.022	kg.
	FA	4.022	kg.

4.1.4 OPC. : RHA. : FA = 90 : 10 : 0

W/C Ratio = 0.66

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	70.199	kg.
	น้ำ	46.332	kg.
	ทราย	189.248	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	7.800	kg.
	FA	-	kg.

4.1.5 OPC. : RHA. : FA = 80 : 0 : 20

W/C Ratio = 0.65

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	63.360	kg.
	น้ำ	46.343	kg.
	ทราย	188.595	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	-	kg.
	FA	15.840	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 OPC. : RHA. : FA = 80 : 5 : 15

W/C Ratio = 0.66

ใช้ปริมาณ ปูนซีเมนต์	62.399	kg.
น้ำ	46.332	kg.
ทราย	189.248	kg.
หิน	289.265	kg.
RHA	3.900	kg.
FA	11.700	kg.

4.1.7 OPC. : RHA. : FA = 80 : 10 : 10

W/C Ratio = 0.67

ใช้ปริมาณ ปูนซีเมนต์	61.469	kg.
น้ำ	46.300	kg.
ทราย	190.553	kg.
หิน	289.265	kg.
RHA	7.684	kg.
FA	7.684	kg.

4.1.8 OPC. : RHA. : FA = 80 : 15 : 5

W/C Ratio = 0.67

ใช้ปริมาณ ปูนซีเมนต์	61.469	kg.
น้ำ	46.300	kg.
ทราย	190.553	kg.
หิน	289.265	kg.
RHA	11.526	kg.
FA	3.842	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 OPC. : RHA. : FA = 80 : 20 : 0

W/C Ratio = 0.69

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	59.687	kg.
	น้ำ	46.258	kg.
	ทราย	192.511	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	14.922	kg.
	FA	-	kg.

4.1.10 OPC. : RHA. : FA = 70 : 0 : 30

W/C Ratio = 0.65

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	55.440	kg.
	น้ำ	46.343	kg.
	ทราย	188.595	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	-	kg.
	FA	23.760	kg.

4.1.11 OPC. : RHA. : FA = 70 : 5 : 25

W/C Ratio = 0.65

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	55.440	kg.
	น้ำ	46.343	kg.
	ทราย	188.595	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	3.960	kg.
	FA	19.800	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.12 OPC. : RHA. : FA = 70 : 10 : 20

W/C Ratio = 0.66

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	54.600	kg.
	น้ำ	46.332	kg.
	ทราย	189.248	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	7.800	kg.
	FA	15.600	kg.

4.1.13 OPC. : RHA. : FA = 70 : 15 : 15

W/C Ratio = 0.68

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	52.191	kg.
	น้ำ	45.582	kg.
	ทราย	188.438	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	11.184	kg.
	FA	11.184	kg.

4.1.14 OPC. : RHA. : FA = 70 : 20 : 10

W/C Ratio = 0.68

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	52.191	kg.
	น้ำ	45.582	kg.
	ทราย	188.438	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	14.911	kg.
	FA	7.456	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.15 OPC. : RHA. : FA = 70 : 25 : 5

W/C Ratio = 0.69

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	52.226	kg.
	น้ำ	46.258	kg.
	ทราย	192.511	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	18.652	kg.
	FA	3.730	kg.

4.1.16 OPC. : RHA. : FA = 70 : 30 : 0

W/C Ratio = 0.70

ใช้ปริมาณ	ปูนซีเมนต์	51.480	kg.
	น้ำ	46.244	kg.
	ทราย	193.164	kg.
	หิน	289.265	kg.
	RHA	22.063	kg.
	FA	-	kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณวัสดุต่าง ๆ นี้คำนวณหาจากวิธีการ Mix Design

รวมปริมาณ ปูนซีเมนต์	ที่ใช้ทั้งหมด	980.026	kg.
รวมปริมาณ น้ำ	ที่ใช้ทั้งหมด	739.660	kg.
รวมปริมาณ ทราย	ที่ใช้ทั้งหมด	3,030.452	kg.
รวมปริมาณ หิน	ที่ใช้ทั้งหมด	4,628.240	kg.
รวมปริมาณ ขี้เถ้าแกลบ	ที่ใช้ทั้งหมด	128.424	kg.
รวมปริมาณ ขี้เถ้าลอย	ที่ใช้ทั้งหมด	132.662	kg.

แต่ละอัตราส่วนผสมใช้เหล็กเส้นกลม 12 mm. ยาว 1.00 m. จำนวน 15 เส้น

รวมปริมาณเหล็กเส้นกลมที่ใช้ทั้งหมด 240 เส้น

4.2 วิธีการทดสอบวิจัย

ก่อนที่จะนำเสนอถึงวิธีการทดสอบวิจัยต่าง ๆ เพื่อหากำลังของคอนกรีตผสมนั้นทางผู้วิจัยใคร่จะขอเสนอถึงวิธีการหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (W/C Ratio) ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่เราต้องทราบก่อนจึงจะทำการหาปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตได้ ซึ่งค่า W/C Ratio นี้จะหาได้จากการทดสอบหาความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ต้า ซึ่งมีวิธีการหาดังนี้

1. เตรียมซีเมนต์มอร์ต้าที่มาตรฐาน จาก ส่วนผสมซีเมนต์, ขี้เถ้าแกลบ, ขี้เถ้าลอย, รวมสาร 3 อย่างเป็น 1 ส่วน และทรายอีก 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก คลุกเคล้าให้เข้ากันดี

2. เตรียมโต๊ะควบคุมการไหลให้พร้อม ด้วยการเช็ดส่วนต่าง ๆ ให้แห้งสนิทโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนจานกลม (Plate) ที่จะวางบานซีเมนต์มอร์ต้า วางแบบทองเหลือง (Mould) ลงตรงศูนย์กลางของจาน

3. ผสมซีเมนต์มอร์ต้าส่วนหนึ่งให้พอดีกับที่จะบรรจุลงในแบบ ด้วยอัตราส่วนของน้ำที่ต่ำสุด (ปรกติควรเริ่มที่ 40%) คลุกเคล้าให้ทั่วกันดีแล้วจึงนำมาใส่ลงในแบบโดยการแบ่งใส่เป็น 2 ชั้น ๆ ละครึ่งแบบ แต่ละชั้นให้กระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งมาตรฐานขนาด 1"*5"*0.5" จำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 ครั้ง เมื่อครบ 2 ชั้นแล้วจิ้งปาดมอร์ต้าส่วนเกินออกให้พอดีปากแบบ นำส่วนเกินออกไปให้พ้นจาน จากนั้นจิ้งค่อย ๆ ยกแบบขึ้นตรง ๆ อย่างระมัดระวัง

4. หมุนลูกเบี้ยวของโต๊ะควบคุมการไหล เพื่อให้จานเลื่อนสูงขึ้น 0.5" แล้วกระแทกลงกับแกนด้วยน้ำหนักของตัวมันเองให้ได้ 25 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 วินาที

5. เมื่อครบจำนวนครั้งแล้ว ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ต้าที่กระจายออกไปรอบ ๆ โดยจัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานทั้งหมด 4 แนว รวมเป็น 4 ค่า บันทึกผลรวมทั้ง 4 ค่านี้ไว้ พร้อมกับอัตราของน้ำที่ใช้

6. ผลรวมของเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์มอร์ต้าที่กระจาย เมื่อวัดตามแนวเส้นทั้ง 4 ค่าแล้วได้ค่าอยู่ระหว่าง 100-115 ㎜. ปริมาณน้ำที่ใช้จะเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับความข้นเหลวของซีเมนต์มอร์ต้า

7. การทดลองไม่สามารถที่จะทำครั้งเดียวให้ได้ค่าดังแสดงในขั้นตอนที่ 6 ได้จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ จนกว่าจะได้ค่ามาตรฐานที่กำหนดในขั้นตอนที่ 6 (ซึ่งผลของค่า W/C Ratio ของแต่ละอัตราส่วนได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1-4.1.6 แล้ว)

4.2.1 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ก) การเตรียมวัสดุผสมและแบบหล่อ

1. ตวงวัสดุผสมทั้งหมดที่ใช้ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้แล้ว(วัสดุผสม , ซีเมนต์, ขี้เถ้าแกลบ, ขี้เถ้าลอย, หิน, ทราย และน้ำ)

2. ทำความสะอาดแบบ อย่าให้มีฝุ่นหรือเศษปูนเก่าติดอยู่ ทาน้ำมันที่ด้านผิวในคอนกรีตจะสัมผัสกับแบบให้ทั่ว

3. ตรวจสอบสกรูสำหรับรัดแบบทุกตัวให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ด้วยการประกอบแบบแล้วขันหรือรัดให้แน่น ทั้งนี้เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดรอยแยกหรือแบบหลุดขณะเทคอนกรีต หรือกระทุ้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การเตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีต

1. สำหรับคอนกรีตที่ใช้เครื่องผสม พยายามเลือกเอาคอนกรีตที่อยู่ตรงกลางที่เทออกจากเครื่องผสมใหม่ ๆ

2. เทคอนกรีตดังกล่าวลงในแบบส่วนหนึ่ง ประมาณให้ได้ความสูง 1 ใน 3 ของแบบและใช้เหล็กกระทุ้งให้ทั่ว 25 ครั้ง จากนั้นกระทำเช่นเดียวกันอีก 2 ชั้นเมื่อคอนกรีตเต็มแบบแล้วจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ

3. ทิ้งแบบที่บรรจุคอนกรีตเรียบร้อยแล้วไว้ในร่มเฉย ๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก นำแท่งคอนกรีตไปบ่มโดยแช่ในถังบ่มจนถึงอายุการที่ต้องการทดสอบ (ตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำมาทดสอบ 1 ชุด มี 3 ตัวอย่าง)

ค) การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีต ให้ทดสอบโดยเร็วที่สุดหลังจากนำขึ้นจากน้ำเมื่อครบอายุ ก่อนทดสอบควรตรวจสอบระนาบหัว-ท้ายของแท่งคอนกรีตว่าแบนราบหรือไม่ ระนาบดังกล่าวไม่ควรเอียงมากกว่า 0.5 องศา (หรือประมาณ 3 mm.) หากไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว ให้ทำการหล่อหมวกหัว-ท้ายเสียก่อน

ง) การคำนวณ

ค่าความเค้นอัดประลัยของแท่งคอนกรีต จะหาได้จากสูตร

$$F = P/A$$

โดยให้ P = แรงกระทำสูงสุดต่อแท่งคอนกรีต (kg.)

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่วัดตั้งฉากกับแรงกระทำ = $\frac{\pi D^2}{4}$

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการจัด 2 ทิศทางตั้งฉากกันที่กึ่งกลางความสูงของแท่งตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ก) การเตรียมวัสดุผสม, แบบหล่อ และแท่งตัวอย่างคอนกรีต เหมือนกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ข) การทดสอบกำลังรับแรงดึง

1. ขีดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางให้ยาวจรดหัว-ท้ายของแท่งตัวอย่างคอนกรีต

2. วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยจากการวัด 3 ค่าคือ ที่ใกล้ปลายทั้งสองและที่กึ่งกลางของแท่งตัวอย่าง พร้อมกับวัดความยาวเฉลี่ยจาก 2 ด้านตามแนวที่ขีดไว้

3. วางแท่งคอนกรีตนอนบนเครื่อง (Universal Testing Machine) ให้แนวเส้นที่ลากไว้อยู่ด้านบนและล่าง นำไม้รองมารองตรงเส้นทั้งด้านบนและล่างให้กึ่งกลางของไม้รองตรงแนวเส้น จากนั้นจึงให้แรงกระทำจนกระทั่งคอนกรีตปริแตก

ค) การคำนวณ

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะหาได้จากสูตร

$$T = 2P/\pi DL$$

4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบแรงยึดเหนี่ยว

ก) การเตรียมวัสดุผสม, แบบหล่อ และแท่งตัวอย่างคอนกรีตเหมือนกับการเตรียมการทดสอบแรงอัด แต่จะมีการฝังเหล็กเส้นกลม 12 mm. ลงไปในแท่งตัวอย่างละ 1 เส้น โดยฝังลงในแท่งคอนกรีต ประมาณ 20 cm.

ข) การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งตัวอย่างคอนกรีตกับเหล็กเส้น

1. นำเอาแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมไว้มา นำด้านปลายคอนกรีตที่มีเหล็กเส้นฝังไว้ยึดจับกับเครื่องให้แน่น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ให้แรงดึงจนกระทั่งถึงจุดประลัยอ่านค่าบันทึกผลไว้

3. ให้แรงดึงต่อไปจนกระทั่งเหล็กหลุดออกจากแท่งคอนกรีต

4. วัดความยาวของเหล็กที่ฝังไว้ในคอนกรีตและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้น เฉลี่ยการวัด 3 ค่าบันทึกค่าไว้

ค) การคำนวณ

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็ก จะหาได้จากสูตร $U = \frac{P}{\pi DL}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังการรับแรงของคอนกรีตผสมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100%, 90%, 80%, และ 70% ทดสอบที่หลังเวลาการบ่มที่ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 720 ตัวอย่าง โดยแบ่งผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังการรับแรงออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ ๆ ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัด (ความเค้นอัด) ของคอนกรีตในส่วนผสมต่างๆ 16 ส่วนผสม ทดสอบกำลังการรับแรงอัด หลังจากระยะเวลาบ่มที่ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน และ 60 วัน รวมผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 240 ตัวอย่าง โดยที่ผลการทดสอบจะนำเสนอในรูปของตารางข้อมูลและกราฟเปรียบเทียบดังนี้

- ตารางผลการทดสอบ ที่ 5.1.1 - 5.1.16 เป็นตารางแสดงผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ โดยที่แต่ละตารางจะแสดงผลการทดสอบของแต่ละส่วนผสมทดสอบที่เวลาหลังการบ่มที่ 3 วัน, 7วัน, 14 วัน 28 วัน, และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.1.17 เป็นตารางสรุปค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.1.18 เป็นตารางกำลังการรับแรงอัดเป็นเปอร์เซ็นต์ และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน
- ตารางที่ 5.1.19 เป็นตารางเปรียบเทียบค่ากำลังการรับแรงอัด (ความเค้นอัด) ของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมที่ 60 วัน
- ตารางที่ 5.1.20 แสดงเปอร์เซ็นต์กำลังการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28วัน
- กราฟเส้นรูปที่ 5.1.1 - 5.1.4 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงอัดของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วัน ถึง 60 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟแท่งรูปที่ 5.1.5 - 5.1.8 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงอัดของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกันตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน
- กราฟเส้นรูปที่ 5.1.9 แสดงค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาที่บ่ม
- กราฟแท่งรูปที่ 5.1.10 แสดงค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงอัดสูงสุดทุกส่วนผสม

5.2 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงดึง (ความเค้นดึง) ของคอนกรีตในส่วนผสมต่างๆ 16 ส่วนผสม ทดสอบกำลังการรับแรงดึง หลังจากระยะเวลาบ่มที่ 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน และ 60 วัน รวมผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 240 ตัวอย่าง โดยที่ผลการทดสอบจะนำเสนอในรูปของตารางข้อมูลและกราฟเปรียบเทียบดังนี้

- ตารางผลการทดสอบ ที่ 5.2.1 - 5.2.16 เป็นตารางแสดงผลการทดสอบกำลังการรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ โดยที่แต่ละตารางจะแสดงผลการทดสอบของแต่ละส่วนผสมทดสอบที่เวลาหลังการบ่มที่ 3 วัน, 7วัน, 14 วัน 28 วัน, และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.2.17 เป็นตารางสรุปค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.2.18 เป็นตารางกำลังการรับแรงดึงเป็นเปอร์เซ็นต์ และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน
- ตารางที่ 5.2.19 เป็นตารางเปรียบเทียบค่ากำลังการรับแรงดึง (ความเค้นดึง) ของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมที่ 60 วัน
- ตารางที่ 5.2.20 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์กำลังการรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟเส้นรูปที่ 5.2.1 - 5.2.4 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงดึงของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วัน ถึง 60 วัน
- กราฟแท่งรูปที่ 5.2.5 - 5.2.8 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงดึงของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกันตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน
- กราฟเส้นรูปที่ 5.2.9 แสดงค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาที่บ่ม
- กราฟแท่งรูปที่ 5.2.10 แสดงค่ากำลังการรับแรงดึงของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงดึงสูงสุดทุกส่วนผสม

5.3 ผลการทดสอบกำลังการรับแรงยืดเหนี่ยว (ความเค้นยืดเหนี่ยว) ของคอนกรีตในส่วนผสมต่าง ๆ 16 ส่วนผสม ทดสอบกำลังการรับแรงยืดเหนี่ยว หลังจากระยะเวลาบ่มที่ 3 วัน 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน และ 60 วัน รวมผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 240 ตัวอย่าง โดยที่ผลการทดสอบจะนำเสนอในรูปของตารางข้อมูลและกราฟเปรียบเทียบดังนี้

- ตารางผลการทดสอบ ที่ 5.3.1 - 5.3.16 เป็นตารางแสดงผลการทดสอบกำลังการรับแรงยืดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบ โดยที่แต่ละตารางจะแสดงผลการทดสอบของแต่ละส่วนผสมทดสอบที่เวลาหลังการบ่มที่ 3 วัน, 7วัน, 14 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.3.17 เป็นตารางสรุปค่ากำลังการรับแรงยืดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมต่าง ๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน, 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน,และ 60 วัน
- ตารางที่ 5.3.18 เป็นตารางกำลังการรับแรงยืดเหนี่ยวเป็นเปอร์เซ็นต์และผลต่างของกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์โดยเปรียบเทียบจากคอนกรีต 100:0:0 ที่ระยะเวลาเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตารางที่ 5.3.19 เป็นตารางเปรียบเทียบค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยว (ความเค้นยึดเหนี่ยว) ของคอนกรีต 100:0:0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมที่ 60 วัน
- ตารางที่ 5.3.20 แสดงเปอร์เซ็นต์กำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน
- กราฟเส้นรูปที่ 5.3.1 - 5.3.4 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน ตั้งแต่ระยะเวลา 3 วัน ถึง 60 วัน
- กราฟแท่งรูปที่ 5.3.5 - 5.3.8 แสดงการพัฒนากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกันตั้งแต่ระยะเวลา 3 วันถึง 60 วัน
- กราฟเส้นรูปที่ 5.3.9 แสดงค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาที่บ่ม
- กราฟแท่งรูปที่ 5.3.10 แสดงค่ากำลังการรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตผสมที่ให้กำลังการรับแรงดึงสูงสุดทุกส่วนผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1.1

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 100 : 0 : 0

Slump 10.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12906	12976	0.54		30.40	15.04	177.66		24060	135.43			
C2-3	3	12897	12942	0.35	0.48	30.20	15.11	179.32	178.37	24600	137.18	139.71	4.87	3.49
C3-3	3	12914	12982	0.56		30.25	15.06	178.13		26100	146.52			
C1-7	7	12756	12829	0.57		30.30	15.06	178.13		31320	175.83			
C2-7	7	12901	12953	0.40	0.52	30.30	15.08	178.60	178.29	31500	176.68	173.75	3.55	2.04
C3-7	7	12925	13002	0.60		30.40	15.06	178.13		30060	168.75			
C1-14	14	12753	12842	0.70		30.10	15.04	177.66		42060	236.74			
C2-14	14	12922	13017	0.74	0.70	30.20	15.10	179.08	178.61	40020	223.48	223.77	10.48	4.68
C3-14	14	12906	12990	0.65		30.50	15.10	179.08		37800	211.08			
C1-28	28	12782	12897	0.90		30.40	15.04	177.66		50580	284.70			
C2-28	28	13059	13191	1.01	0.92	30.20	15.06	178.13	178.29	45060	252.96	258.74	19.28	7.45
C3-28	28	12799	12906	0.84		30.30	15.10	179.08		42720	238.55			
C1-60	60	12949	13066	0.90		30.20	15.06	178.13		46500	261.05			
C2-60	60	12937	13080	1.10	1.01	30.40	15.08	178.60	178.13	48600	272.12	276.45	14.66	5.30
C3-60	60	12700	12830	1.02		30.20	15.04	177.60		52620	296.18			

ตารางที่ 5.1.2

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 90 : 0 : 10

Slump 9.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12790	12847	0.45	0.45	30.30	15.04	177.66	178.37	22920	129.01	120.88	6.74	5.58
C2-3	3	12511	12572	0.49		30.20	15.11	179.32		21720	121.12			
C3-3	3	12717	12770	0.42		30.10	15.06	178.13		20040	112.50			
C1-7	7	12416	12490	0.6	0.56	30.40	15.10	179.08	178.61	26700	149.09	154.91	12.21	7.88
C2-7	7	12381	12452	0.57		30.20	15.04	177.66		30540	171.90			
C3-7	7	12403	12467	0.52		30.30	15.10	179.08		25740	143.73			
C1-14	14	12738	12829	0.71	0.74	30.50	15.04	177.66	177.82	31440	176.97	187.26	10.55	5.63
C2-14	14	12598	12691	0.74		30.20	15.06	178.13		35940	201.76			
C3-14	14	12473	12569	0.77		30.30	15.04	177.66		32520	183.05			
C1-28	28	12845	12934	0.69	0.79	30.30	15.11	179.32	178.37	38880	216.82	215.15	6.12	2.85
C2-28	28	12567	12666	0.79		30.40	15.07	178.37		39540	221.67			
C3-28	28	12497	12609	0.90		30.20	15.03	177.42		36720	206.97			
C1-60	60	12670	12781	0.88	0.96	30.20	15.07	178.37	177.97	45420	254.64	238.79	13.68	5.73
C2-60	60	12584	12701	0.93		30.30	15.04	177.66		42720	240.46			
C3-60	60	12595	12731	1.08		30.40	15.05	177.89		39360	221.06			

ตารางที่ 5.1.3

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 90 : 5 : 5

Slump 9.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12805	12864	0.46	0.52	30.20	15.04	177.66	178.21	22560	126.98	133.86	5.81	4.34
C2-3	3	12983	13036	0.41		30.50	15.11	179.32		25320	141.20			
C3-3	3	12708	12797	0.70		30.20	15.04	177.66		23700	133.40			
C1-7	7	12738	12816	0.61	0.59	30.50	15.06	178.13	177.82	22680	127.32	147.36	17.14	11.63
C2-7	7	12598	12680	0.65		30.30	15.04	177.66		30060	169.20			
C3-7	7	12845	12911	0.51		30.10	15.04	177.66		25860	145.56			
C1-14	14	12856	12940	0.65	0.68	30.20	15.08	178.60	177.82	35340	197.87	185.78	9.65	5.19
C2-14	14	12897	12987	0.70		30.20	15.04	177.66		30960	174.26			
C3-14	14	12844	12932	0.69		30.30	15.02	177.19		32820	185.22			
C1-28	28	12857	12950	0.72	0.86	30.40	15.10	179.08	177.98	38280	213.76	218.47	5.08	2.33
C2-28	28	12843	12937	0.74		30.30	15.02	177.19		39960	225.52			
C3-28	28	12663	12804	1.11		30.30	15.04	177.66		38400	216.14			
C1-60	60	12725	12838	0.89	1.01	30.20	15.06	178.13	178.29	46020	258.25	257.67	4.42	1.72
C2-60	60	12791	12902	0.87		30.40	15.06	178.13		44880	251.95			
C3-60	60	12743	12903	1.26		30.30	15.08	178.60		46920	262.71			

ตารางที่ 5.1.4

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 90 : 10 : 0

Slump 9.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12914	12981	0.52		30.30	15.04	177.66		21600	121.58			
C2-3	3	12545	12605	0.48	0.53	30.30	15.08	178.60	178.29	23520	131.69	129.00	5.31	4.12
C3-3	3	12799	12875	0.59		30.40	15.08	178.60		23880	133.71			
C1-7	7	12906	12982	0.59		30.20	15.06	178.13		28860	162.02			
C2-7	7	12899	12989	0.70	0.63	30.50	15.08	178.60	178.13	25860	144.79	145.84	12.80	8.78
C3-7	7	12708	12786	0.61		30.50	15.04	177.66		23220	130.70			
C1-14	14	12613	12712	0.78		30.40	15.10	179.08		38040	212.42			
C2-14	14	12743	12829	0.67	0.74	30.30	15.04	177.66	178.13	33240	187.10	190.47	16.71	8.77
C3-14	14	12788	12887	0.77		30.40	15.04	177.66		30540	171.90			
C1-28	28	12761	12898	1.07		30.20	15.07	178.37		38400	215.28			
C2-28	28	12716	12811	0.75	0.89	30.40	15.06	178.13	178.05	38100	213.89	208.91	8.04	3.85
C3-28	28	12833	12943	0.86		30.30	15.04	177.66		35100	197.57			
C1-60	60	12835	12959	0.97		30.30	15.10	179.08		38880	217.11			
C2-60	60	12799	12929	1.01	1.03	30.10	15.04	177.66	178.13	41520	233.70	227.50	7.39	3.25
C3-60	60	12645	12786	1.11		30.50	15.04	177.66		41160	231.68			

ตารางที่ 5.1.5

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 80 : 0 : 20

Slump 10.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12536	12622	0.69		30.50	15.06	178.13		23040	129.34			
C2-3	3	12651	12747	0.76	0.74	30.20	15.06	178.13	178.45	23280	130.69	124.09	8.40	6.77
C3-3	3	12718	12815	0.76		30.30	15.10	179.08		20100	112.24			
C1-7	7	12633	12730	0.77		30.20	15.04	177.66		27540	155.01			
C2-7	7	12835	12953	0.92	0.85	30.40	15.07	178.37	177.82	23220	130.18	142.41	10.14	7.12
C3-7	7	12777	12886	0.85		30.40	15.03	177.42		25200	142.03			
C1-14	14	12805	12934	1.01		30.40	15.03	177.42		31020	174.84			
C2-14	14	12681	12795	0.90	0.92	30.20	15.11	179.32	178.05	31260	174.32	171.06	4.98	2.91
C3-14	14	12655	12763	0.85		30.30	15.03	177.42		29100	164.02			
C1-28	28	12851	12994	1.11		30.50	15.04	177.66		35700	200.95			
C2-28	28	12422	12538	0.93	1.08	30.40	15.10	179.08	178.61	36900	206.05	199.44	6.11	3.06
C3-28	28	12740	12894	1.21		30.30	15.10	179.08		34260	191.31			
C1-60	60	12550	12691	1.12		30.20	15.04	177.66		40260	226.61			
C2-60	60	12690	12854	1.29	1.19	30.30	15.07	178.37	178.21	42360	237.48	229.28	5.92	2.85
C3-60	60	12784	12933	1.17		30.50	15.08	178.60		39960	223.74			

ตารางที่ 5.1.6

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 80 : 5 : 15

Slump 9.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12800	12910	0.86		30.40	15.04	177.66		24180	136.10			
C2-3	3	12841	12974	1.03	0.97	30.40	15.10	179.08	178.13	23100	128.99	131.03	3.61	2.76
C3-3	3	12716	12845	1.01		30.30	15.04	177.66		22740	128.00			
C1-7	7	12914	13045	1.01		30.50	15.07	178.37		26820	150.36			
C2-7	7	12799	12939	1.09	1.11	30.20	15.02	177.19	177.98	26220	147.98	143.95	7.43	5.16
C3-7	7	12899	13058	1.23		30.20	15.07	178.37		23820	133.54			
C1-14	14	12853	13025	1.34		30.30	15.09	178.84		29220	163.39			
C2-14	14	12804	12976	1.34	1.31	30.40	15.07	178.37	178.29	34560	193.75	173.76	14.14	8.14
C3-14	14	12761	12922	1.26		30.30	15.04	177.66		29160	164.13			
C1-28	28	12888	13064	1.36		30.30	15.05	177.89		38280	215.19			
C2-28	28	12801	12970	1.32	1.34	30.40	15.07	178.37	177.97	42360	237.48	215.62	17.67	8.19
C3-28	28	12833	13003	1.33		30.30	15.04	177.66		34500	194.19			
C1-60	60	12800	12985	1.44		30.30	15.07	178.37		42600	238.83			
C2-60	60	12705	12903	1.56	1.46	30.40	15.05	177.89	178.45	44520	250.27	251.60	11.00	4.37
C3-60	60	12805	12982	1.38		30.40	15.10	179.08		47580	265.69			

ตารางที่ 5.1.7

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 80 : 10 : 10

Slump 9.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่บ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่บ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12586	12722	1.08		30.10	15.10	179.08		22140	123.63			
C2-3	3	12700	12829	1.02	1.04	30.30	15.04	177.66	178.37	20700	116.51	118.06	4.07	3.45
C3-3	3	12412	12540	1.03		30.30	15.07	178.37		20340	114.03			
C1-7	7	12458	12595	1.10		30.40	15.06	178.63		27900	156.63			
C2-7	7	12707	12841	1.05	1.11	30.20	15.10	179.08	178.21	27720	154.79	150.81	6.97	4.62
C3-7	7	12439	12586	1.18		30.40	15.03	177.42		25020	141.02			
C1-14	14	12736	12884	1.16		30.30	15.01	176.95		30300	171.23			
C2-14	14	12652	12823	1.35	1.21	30.20	15.05	177.89	177.74	37020	208.10	184.08	17.00	9.23
C3-14	14	12681	12824	1.13		30.20	15.07	178.37		30840	172.90			
C1-28	28	12705	12864	1.25		30.30	15.11	179.32		37080	206.78			
C2-28	28	12630	12821	1.50	1.34	30.30	15.09	178.84	178.61	39420	220.42	206.90	10.99	5.31
C3-28	28	12523	12683	1.27		30.40	15.04	177.66		34380	193.51			
C1-60	60	12825	12980	1.29		30.20	15.04	177.66		46020	259.03			
C2-60	60	12747	12919	1.35	1.35	30.40	15.11	179.32	178.21	44280	246.93	247.68	8.98	3.63
C3-60	60	12825	13006	1.41		30.40	15.04	177.66		42120	237.08			

ตารางที่ 5.1.8

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 80 : 15 : 5

Slump 8.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่าเฉลี่ยกลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12689	12851	1.27		30.30	15.03	177.42		21600	121.74			
C2-3	3	12765	12919	12.1	1.11	30.20	15.11	179.32	178.13	23580	131.50	133.05	9.92	7.46
C3-3	3	12646	12756	0.87		30.50	15.04	177.66		25920	145.90			
C1-7	7	12708	12860	1.19		30.50	15.10	179.08		26940	150.44			
C2-7	7	12805	12939	1.05	1.12	30.20	15.07	178.37	178.45	31800	178.28	168.49	12.78	7.58
C3-7	7	12780	12923	1.12		30.20	15.05	177.89		31440	176.74			
C1-14	14	12648	12810	1.28		30.30	15.01	176.95		32700	184.80			
C2-14	14	12596	12750	1.22	1.29	30.20	15.06	178.13	178.05	34860	195.70	192.73	6.94	3.60
C3-14	14	12426	12595	1.36		30.40	15.10	179.08		35400	197.68			
C1-28	28	12769	12949	1.41		30.30	15.04	177.66		36000	202.63			
C2-28	28	12505	12680	1.34	1.37	30.40	15.07	178.37	177.82	38760	217.30	217.53	12.26	5.64
C3-28	28	12446	12615	1.36		30.30	15.03	177.42		41280	232.67			
C1-60	60	12605	12780	1.40		30.20	15.09	178.84		44760	250.28			
C2-60	60	12504	12687	1.46	1.44	30.30	15.06	178.13	178.13	42000	235.78	241.15	6.49	2.69
C3-60	60	12648	12833	1.46		30.30	15.03	177.42		42120	237.40			

ตารางที่ 5.1.9

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 80 : 20 : 0

Slump 8.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12380	12506	1.02		30.40	15.11	179.32		21060	117.44			
C2-3	3	12403	12556	1.24	1.12	30.20	15.02	177.19	178.29	23280	131.38	122.86	6.10	4.97
C3-3	3	12511	12648	1.10		30.20	15.07	178.37		21360	119.75			
C1-7	7	12793	12958	1.37		30.20	15.06	178.13		25980	145.85			
C2-7	7	12416	12564	1.20	1.24	30.40	15.07	178.37	178.53	26220	147.00	141.84	6.50	4.58
C3-7	7	12697	12843	1.15		30.30	15.10	179.08		23760	132.68			
C1-14	14	12714	12880	1.31		30.30	15.06	178.13		29820	167.40			
C2-14	14	12419	12594	1.41	1.37	30.20	15.11	179.32	178.29	31260	174.33	169.60	3.35	1.97
C3-14	14	12438	12610	1.39		30.20	15.03	177.42		29640	167.06			
C1-28	28	12747	12915	1.32		30.50	15.04	177.66		36720	206.69			
C2-28	28	12673	12856	1.45	1.39	30.30	15.06	178.13	178.05	39000	218.94	210.61	5.89	2.80
C3-28	28	12972	13153	1.40		30.40	15.07	178.37		36780	206.20			
C1-60	60	12666	12839	1.37		30.30	15.06	178.13		39540	221.97			
C2-60	60	12576	12764	1.50	1.42	30.50	15.03	177.42	178.21	41520	234.02	227.83	4.92	2.16
C3-60	60	12371	12542	1.39		30.20	15.10	179.08		40740	227.50			

ตารางที่ 5.1.10

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 0 : 30

Slump 10.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนแ ลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลัง ลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12693	12776	0.66		30.50	15.11	179.32		19080	106.40			
C2-3	3	12605	12712	0.85	0.74	30.40	15.04	177.66	178.45	16080	90.51	94.45	8.61	9.12
C3-3	3	12755	12845	0.71		30.30	15.07	178.37		15420	86.45			
C1-7	7	12532	12628	0.77		30.50	15.09	178.84		19140	107.02			
C2-7	7	12588	12701	0.90	0.87	30.40	15.07	178.37	178.45	18780	105.29	102.21	5.63	5.51
C3-7	7	12522	12639	0.94		30.40	15.06	178.13		16800	94.31			
C1-14	14	12645	12794	1.18		30.20	15.03	177.42		22920	129.18			
C2-14	14	12548	12646	0.78	0.97	30.20	15.08	178.60	178.13	21180	118.59	121.15	5.79	4.78
C3-14	14	1258	12707	0.95		30.40	15.07	178.37		20640	115.71			
C1-28	28	12272	12437	1.35		30.40	15.07	178.37		32820	184.00			
C2-28	28	12512	12640	1.02	1.20	30.20	15.04	177.66	178.37	36000	202.63	188.51	10.20	5.41
C3-28	28	12487	12639	1.22		30.30	15.10	179.08		32040	178.91			
C1-60	60	12417	12583	1.34		30.30	15.06	178.13		37320	209.51			
C2-60	60	125456	12703	1.25	1.27	30.30	15.06	178.13	178.37	41160	231.07	218.98	8.99	4.11
C3-60	60	12263	12413	1.22		30.20	15.09	178.84		38700	216.39			

ตารางที่ 5.1.11

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 5 : 25

Slump 10.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12516	12638	0.97		30.30	15.04	177.66		18960	106.72			
C2-3	3	12492	12615	0.98	1.01	30.40	15.04	177.66	178.21	21180	119.22	118.03	8.79	7.45
C3-3	3	12586	12722	1.08		30.40	15.11	179.32		22980	128.15			
C1-7	7	12403	12545	1.14		30.40	15.03	177.42		26280	148.12			
C2-7	7	12416	12551	1.09	1.14	30.40	15.11	179.32	178.37	25080	139.86	135.07	12.37	9.12
C3-7	7	12659	12846	1.19		30.20	15.07	178.37		21180	118.74			
C1-14	14	12470	12627	1.26		30.50	15.04	177.66		30960	174.26			
C2-14	14	12561	12718	1.25	1.24	30.30	15.07	178.37	178.21	27720	155.41	162.19	8.56	5.28
C3-14	14	12825	12980	1.20		30.30	15.08	178.60		28020	156.89			
C1-28	28	12702	12868	1.30		30.30	15.11	179.32		37800	210.79			
C2-28	28	12593	12760	1.33	1.33	30.30	15.03	177.42	178.21	39660	223.54	214.48	6.44	3.00
C3-28	28	12652	12823	1.35		30.40	15.05	177.89		37200	209.12			
C1-60	60	12783	13020	1.38		30.30	15.07	178.37		43440	243.54			
C2-60	60	12614	12843	1.43	1.44	30.20	15.03	177.42	178.29	42240	238.08	246.00	7.64	3.11
C3-60	60	12630	12821	1.50		30.30	15.10	179.08		45900	256.31			

ตารางที่ 5.1.12

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 10 : 20

Slump 9.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12738	12810	0.57	0.59	30.30	15.03	177.42	178.21	19140	107.88	104.17	4.42	4.24
C2-3	3	12711	12775	0.50		30.20	15.09	178.84		17520	97.96			
C3-3	3	12377	12462	0.69		30.40	15.07	178.37		19020	106.63			
C1-7	7	12561	12630	0.55	0.63	30.20	15.04	177.66	177.97	20580	115.84	119.35	6.28	5.26
C2-7	7	12379	12474	0.77		30.20	15.07	178.37		20340	114.03			
C3-7	7	12707	12781	0.58		30.40	15.05	177.89		22800	128.17			
C1-14	14	12598	12709	0.88	0.85	30.50	15.07	178.37	177.89	23700	132.87	141.22	6.09	4.31
C2-14	14	12704	12813	0.86		30.20	15.04	177.66		25500	143.53			
C3-14	14	12497	12599	0.82		30.20	15.04	177.66		26160	147.25			
C1-28	28	12680	12702	0.88	0.89	30.20	15.06	178.13	178.05	35820	201.09	190.72	7.98	4.18
C2-28	28	12845	12958	0.88		30.40	15.07	178.37		33780	189.38			
C3-28	28	12663	12748	0.91		30.40	15.04	177.66		32280	181.69			
C1-60	60	12647	12775	1.01	10.6	30.30	15.07	178.37	178.37	38880	217.97	235.24	12.52	5.32
C2-60	60	12473	12610	1.10		30.30	15.09	178.84		44220	247.26			
C3-60	60	12379	12513	1.08		30.40	15.05	177.89		42780	240.48			

ตารางที่ 5.1.13

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 15 : 15

Slump 9.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12695	12770	0.59		30.30	15.11	179.32		21060	117.44			
C2-3	3	12610	12694	0.67	0.58	30.40	15.09	178.84	178.84	25440	142.25	130.74	10.21	7.81
C3-3	3	12645	12708	0.49		30.30	15.07	178.37		23640	132.53			
C1-7	7	12584	12655	0.56		30.30	15.09	178.84		28260	158.02			
C2-7	7	12470	12561	0.73	0.64	30.40	15.04	177.66	178.29	25980	146.23	160.51	12.79	7.97
C3-7	7	12552	12632	0.64		30.20	15.07	178.37		31620	177.27			
C1-14	14	12646	12758	0.88		30.30	15.01	176.95		37080	209.55			
C2-14	14	12710	12825	0.90	0.87	30.20	15.03	177.42	177.74	34800	196.14	204.12	5.76	2.82
C3-14	14	12470	12575	0.84		30.30	15.09	178.84		36960	206.66			
C1-28	28	12500	12621	0.96		30.40	15.04	177.66		37920	213.44			
C2-28	28	12582	12720	1.09	1.03	30.30	15.07	178.37	178.29	38880	217.97	220.41	6.90	3.13
C3-28	28	12548	12680	1.05		30.30	15.09	178.84		41100	229.81			
C1-60	60	12451	12598	1.18		30.20	15.04	177.66		41520	233.70			
C2-60	60	12520	12647	1.01	1.13	30.20	15.07	178.37	177.97	42240	236.81	241.05	8.29	3.44
C3-60	60	12584	12735	1.20		30.30	15.50	177.89		44940	252.63			

ตารางที่ 5.1.14

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 20 : 10

Slump 8.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่บ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่บ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12346	12437	0.74		30.40	15.11	179.32		17160	95.69			
C2-3	3	12459	12556	0.78	0.74	30.30	15.09	178.84	178.61	16260	90.92	99.58	9.08	9.12
C3-3	3	12460	12546	0.69		30.30	15.04	177.66		19920	112.12			
C1-7	7	12594	12684	0.71		30.30	15.03	177.42		23220	130.87			
C2-7	7	12547	12658	0.88	0.81	30.20	15.09	178.84	178.45	24060	134.53	128.72	5.74	4.46
C3-7	7	12460	12565	0.84		30.30	15.10	179.08		21660	120.95			
C1-14	14	12393	12504	0.90		30.20	15.11	179.32		31080	173.32			
C2-14	14	12477	12582	0.84	0.89	30.40	15.10	179.08	178.69	27900	155.79	162.50	7.72	4.75
C3-14	14	12499	12615	0.93		30.30	15.04	177.66		28140	158.39			
C1-28	28	12432	12555	0.90		30.30	15.09	178.84		31320	175.13			
C2-28	28	12370	12525	1.25	1.12	30.20	15.04	177.66	178.29	34320	193.18	184.55	7.39	4.00
C3-28	28	12415	12567	1.22		30.30	15.07	178.37		33060	185.34			
C1-60	60	12512	12675	1.30		30.30	15.08	178.60		41100	230.12			
C2-60	60	12488	12638	1.20	1.27	30.40	15.08	178.60	178.68	39120	219.03	222.74	5.22	2.34
C3-60	60	12263	12423	1.30		30.50	15.09	178.84		39180	219.08			

ตารางที่ 5.1.15

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 25 : 5

Slump 8.50 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนลงบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังลงบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12341	12412	0.58		30.40	15.09	178.84		18540	103.67			
C2-3	3	12374	12470	0.78	0.66	30.30	15.07	178.37	178.76	15300	85.78	94.09	7.36	7.82
C3-3	3	12466	12544	0.63		30.20	15.10	179.08		16620	92.81			
C1-7	7	12527	12614	0.69		30.50	15.06	178.13		22980	129.00			
C2-7	7	12538	12632	0.75	0.74	30.40	15.03	177.42	178.21	24180	136.29	136.68	6.43	4.70
C3-7	7	12345	12444	0.79		30.30	15.10	179.08		25920	144.74			
C1-14	14	12493	12587	0.75		30.40	15.04	177.66		29460	165.82			
C2-14	14	12295	12398	0.84	0.84	30.30	15.10	179.08	178.53	27720	154.79	160.55	4.52	2.82
C3-14	14	12375	12489	0.92		30.30	15.09	178.84		28800	161.04			
C1-28	28	12299	12425	1.02		30.20	15.11	179.32		38280	213.47			
C2-28	28	12276	12402	1.03	1.05	30.20	15.04	177.66	178.37	39600	222.90	215.29	5.62	2.61
C3-28	28	12263	12398	1.10		30.50	15.06	178.13		37320	209.51			
C1-60	60	12198	12328	1.07		30.40	15.04	177.66		39960	224.92			
C2-60	60	12312	12463	1.23	1.16	30.20	15.07	178.37	178.13	39240	220.00	227.81	7.82	3.43
C3-60	60	12543	12693	1.19		30.20	15.07	178.37		42540	238.50			

ตารางที่ 5.1.16

Compressive Strength

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) : ขี้เถ้าแกลบ (RHA) : ขี้เถ้าลอย (FA) = 70 : 30 : 0

Slump 8.00 cm.

ตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำบ่ม(g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำบ่ม(g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	Average (%)	ความสูงของแท่งตัวอย่าง (cm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	พื้นที่รับแรง (cm.*cm.)	Average (cm.*cm.)	กำลังประลัย (kg)	ความเค้นประลัย (ksc)	Average (ksc)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD.	สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน
C1-3	3	12277	12357	0.65		30.20	15.09	178.84		20820	116.42			
C2-3	3	12546	12448	0.23	0.76	30.20	15.09	178.84	178.68	20460	114.40	119.77	6.23	5.20
C3-3	3	12689	12791	0.80		30.40	15.07	178.37		22920	128.50			
C1-7	7	12272	12379	0.87		30.30	15.04	177.66		23880	134.41			
C2-7	7	12295	12387	0.75	1.82	30.20	15.11	179.32	178.77	26040	145.21	137.28	5.70	4.15
C3-7	7	12403	12507	0.84		30.30	15.11	179.32		23700	132.16			
C1-14	14	12356	12471	0.93		30.30	15.09	178.84		28080	157.01			
C2-14	14	12687	12794	0.84	0.89	30.20	15.04	177.66	178.05	25380	142.86	152.87	7.11	4.65
C3-14	14	12383	12494	0.90		30.30	15.04	177.66		28200	158.73			
C1-28	28	12328	12460	1.07		30.20	15.06	178.13		30540	171.14			
C2-28	28	12442	12579	1.10	1.03	30.30	15.07	178.32	178.61	37260	208.89	190.25	15.41	8.10
C3-28	28	12504	12619	0.92		30.20	15.11	179.32		34200	190.72			
C1-60	60	12354	12480	1.02		30.20	15.04	177.66		42900	241.47			
C2-60	60	12435	12571	1.09	1.12	30.20	15.06	178.13	177.97	40620	228.03	230.60	8.03	3.48
C3-60	60	12369	12524	1.25		30.20	15.06	178.13		39600	222.31			

ตาราง 5.1.17	ตารางค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสม				
ส่วนผสม	ค่าความเค้นอัด (KSC.)				
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
100:0:0	139.71	173.75	223.77	258.74	276.45
90:0:10	120.88	154.91	187.26	215.15	238.79
90:5:5	133.86	147.36	185.78	218.47	257.67
90:10:0	129.00	145.84	190.47	208.91	227.50
80:0:20	124.09	142.41	171.06	199.44	229.28
80:5:15	131.03	143.96	173.76	215.62	251.60
80:10:10	118.06	150.81	184.08	206.90	247.68
80:15:5	133.05	168.49	192.73	217.53	241.65
80:20:0	122.86	141.84	169.60	210.61	227.83
70:0:30	94.45	102.21	121.16	188.51	218.99
70:5:25	118.03	135.57	162.19	214.48	246.00
70:10:20	104.17	119.35	141.22	190.72	235.24
70:15:15	130.74	160.51	204.12	220.41	241.05
70:20:10	99.58	128.78	162.50	184.55	222.74
70:25:5	94.09	136.68	160.55	215.29	227.81
70:30:0	119.77	137.26	152.87	190.25	230.60

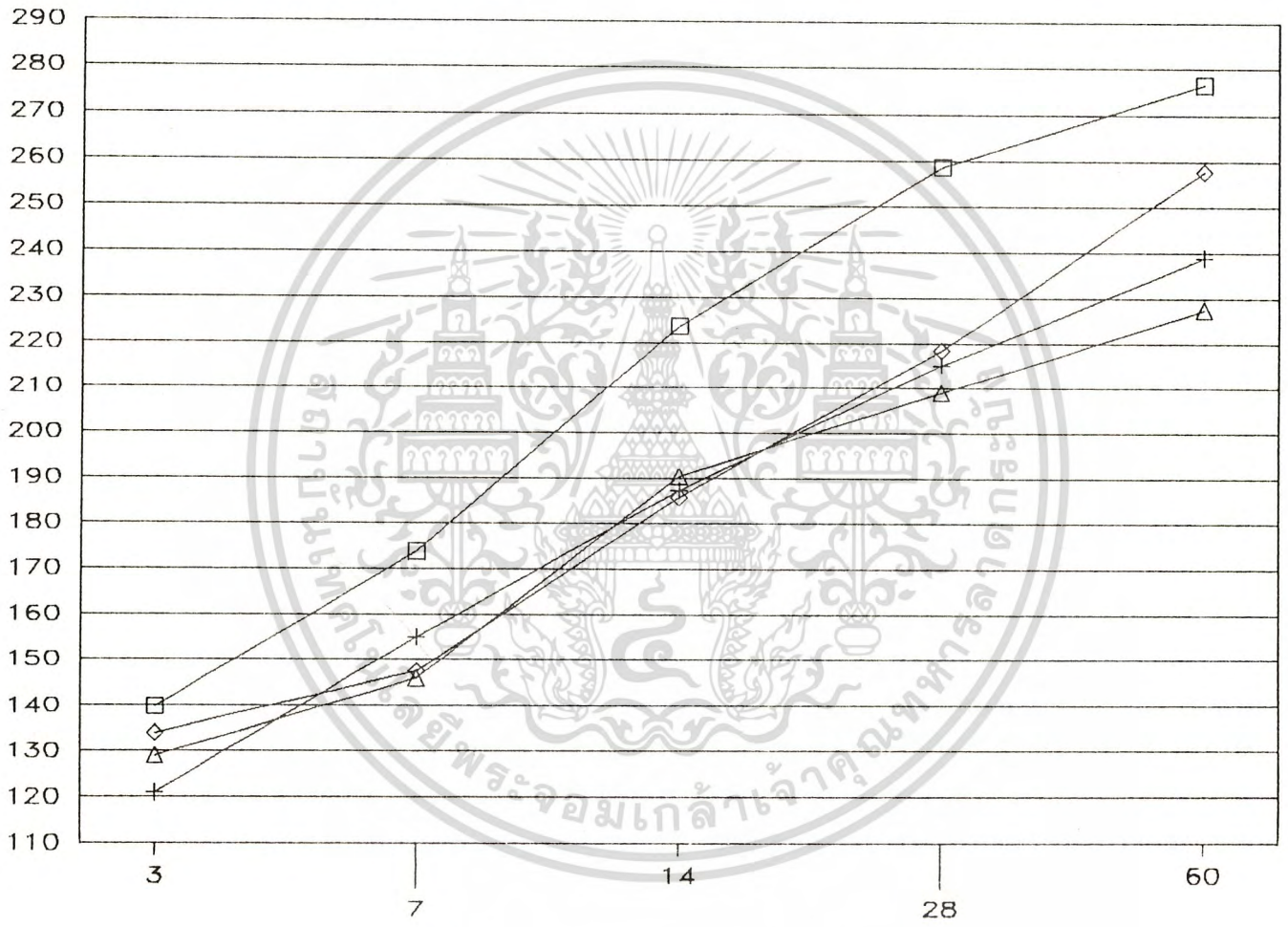
ตาราง 5.1.18	ตารางค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเทียบจากคอนกรีต 100 : 0 : 0 ที่บ่ม 28 วัน									
ส่วนผสม	ค่าความเค้นอัด (KSC.)									
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย	บ่ม 3 วัน		บ่ม 7 วัน		บ่ม 14 วัน		บ่ม 28 วัน		บ่ม 60 วัน	
	% เทียบกับ	ผลต่างของ %	% เทียบกับ	ผลต่างของ %	% เทียบกับ	ผลต่างของ %	% เทียบกับ	ผลต่างของ %	% เทียบกับ	ผลต่างของ %
	100 : 0 : 0		100 : 0 : 0		100 : 0 : 0		100 : 0 : 0		100 : 0 : 0	
100:0:0	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00
90:0:10	86.52	-13.48	89.16	-10.84	83.68	-16.32	83.15	-16.85	86.38	-13.62
90:5:5	95.81	-4.19	84.81	-15.19	83.02	-16.98	84.44	-15.56	93.21	-6.79
90:10:0	92.33	-7.67	83.94	-16.06	85.12	-14.88	80.74	-19.26	82.29	-17.71
80:0:20	88.82	-11.18	81.96	-18.04	76.44	-23.56	77.08	-22.92	82.94	-17.06
80:5:15	93.79	-6.21	82.85	-17.15	77.65	-22.35	83.33	-16.67	91.01	-8.99
80:10:10	84.50	-15.50	86.80	-13.20	82.26	-17.44	79.96	-20.04	89.59	-10.41
80:15:5	95.23	-4.77	96.97	-3.03	86.13	-13.87	84.07	-15.93	87.23	-12.77
80:20:0	87.94	-12.06	81.63	-18.37	75.79	-24.21	81.40	-18.60	82.41	-17.59
70:0:30	67.60	-32.40	58.83	-41.17	54.14	-45.86	72.86	-27.14	79.22	-20.78
70:5:25	84.48	-15.52	78.03	-21.97	72.48	-27.52	82.89	-17.11	88.99	-11.01
70:10:20	74.56	-25.44	68.69	-31.31	63.11	-36.89	73.71	-26.29	85.09	-14.91
70:15:15	93.58	-6.42	92.38	-7.62	91.22	-8.78	85.19	-14.81	87.19	-12.81
70:20:10	71.28	-28.72	74.12	-25.88	72.62	-27.38	71.33	-28.67	80.57	-19.43
70:25:5	67.35	-32.65	78.66	-21.34	71.75	-28.25	83.21	-16.79	82.41	-17.59
70:30:0	85.73	-14.27	79.00	-31.68	68.32	-31.68	73.53	-26.47	83.41	-16.59

ตาราง 5.1.19	ตารางเปรียบเทียบค่าความเค้นอัดของคอนกรีต 100: 0 : 0 ที่ 28 วัน กับคอนกรีตผสมที่ 60 วัน		
ส่วนผสม ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย	ค่าความเค้นของส่วนผสม 100 : 0 : 0 ที่ 28 วัน เปรียบเทียบกับส่วนผสมต่าง ๆที่ 60 วัน KSC.	ค่าเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)	ผลต่างเปรียบเทียบ (%)
100:0:0	258.74	100.00	0.00
90:0:10	238.79	92.29	-7.71
90:5:5	257.67	99.59	-0.41
90:10:0	227.50	87.93	-12.07
80:0:20	229.28	88.61	-11.39
80:5:15	251.60	97.24	-2.76
80:10:10	247.68	95.73	-4.27
80:15:5	241.65	93.20	-6.80
80:20:0	227.83	88.05	-11.95
70:0:30	218.99	84.64	-15.36
70:5:25	246.00	95.08	-4.92
70:10:20	235.24	90.92	-9.08
70:15:15	241.05	93.16	-6.84
70:20:10	222.74	86.09	-13.91
70:25:5	227.81	88.05	-11.95
70:30:0	230.60	89.12	-10.88

ตาราง 5.1.20	ตารางการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจาก 28 วัน		
ส่วนผสม	ระยะเวลาการบ่ม		
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน	% ที่เพิ่มขึ้น
100:0:0	258.74	276.45	6.84
90:0:10	215.15	238.79	10.99
90:5:5	218.47	257.67	17.94
90:10:0	208.91	227.50	8.90
80:0:20	199.44	229.28	14.96
80:5:15	215.62	251.60	16.69
80:10:10	206.90	247.68	19.71
80:15:5	217.53	241.65	11.09
80:20:0	210.61	227.83	8.18
70:0:30	188.51	218.99	16.17
70:5:25	214.48	246.00	14.70
70:10:20	190.72	235.24	23.34
70:15:15	220.41	241.05	9.36
70:20:10	184.55	222.74	20.69
70:25:5	215.29	227.81	5.82
70:30:0	190.25	230.60	21.21

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย



รูปที่ 5.1.1

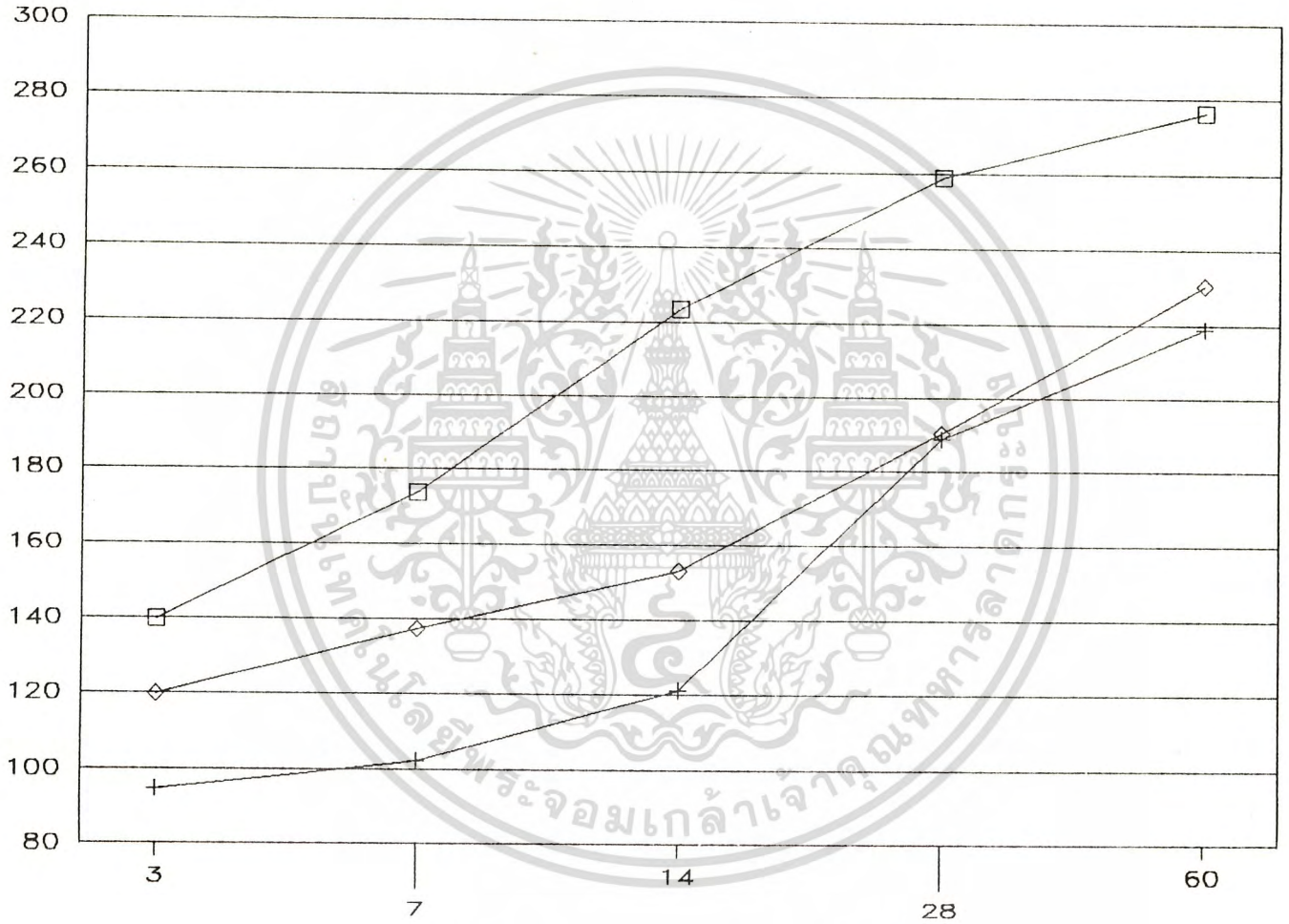
DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย

รูปที่ 5.1.2

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าลอย:ขี้เถ้าแกลบ



รูปที่ 5.1.3

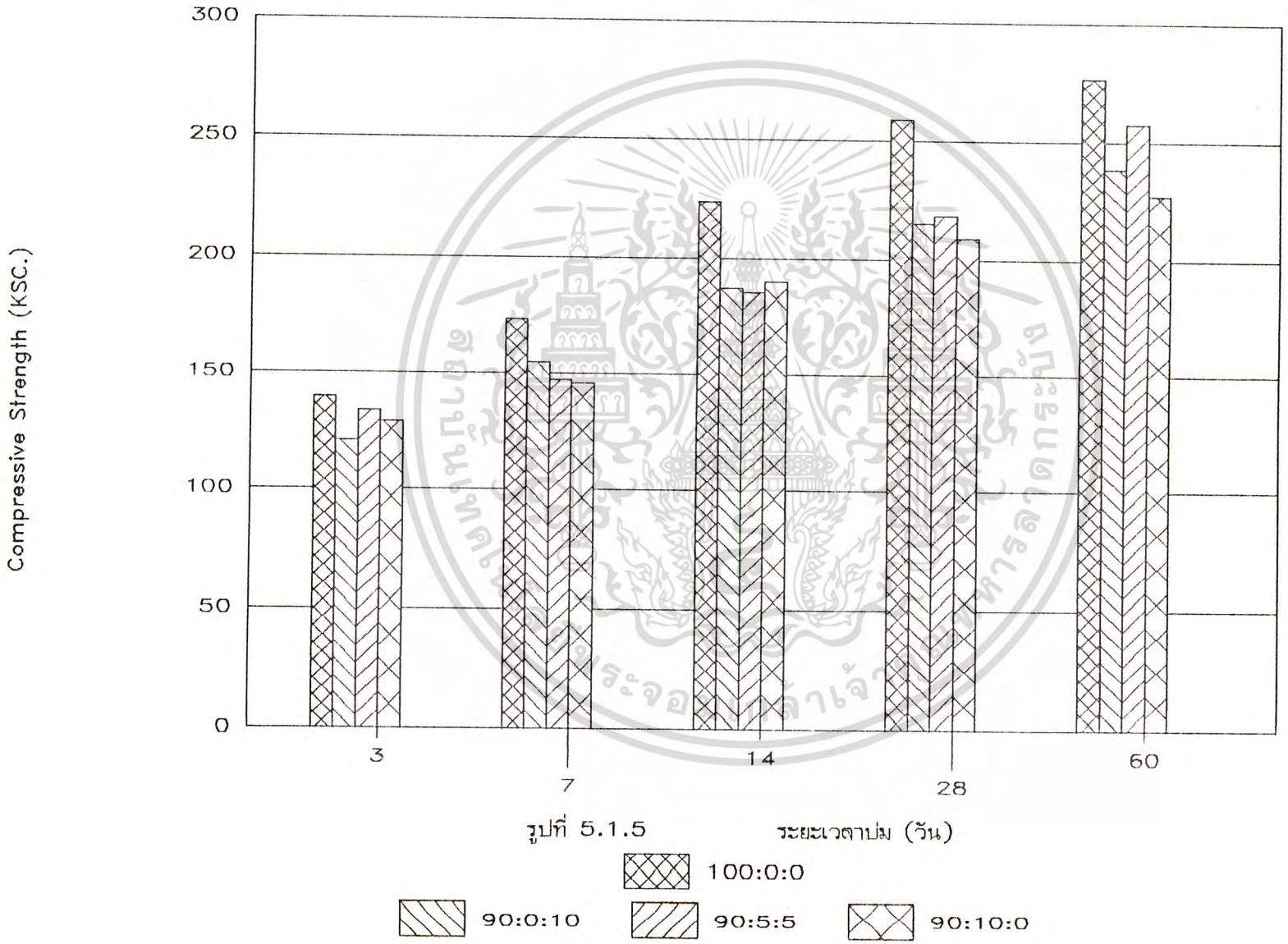
DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย

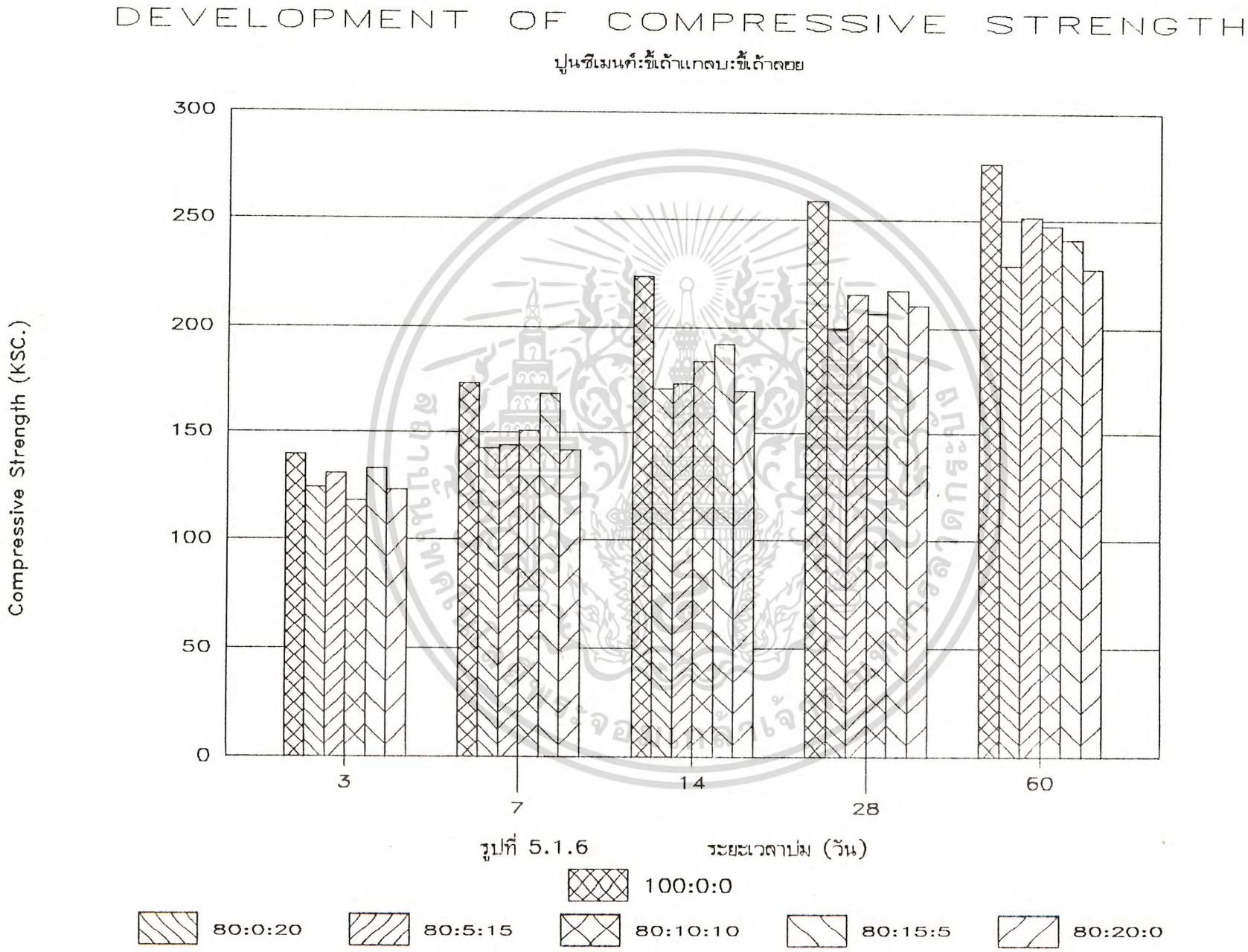
รูปที่ 5.1.4

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย



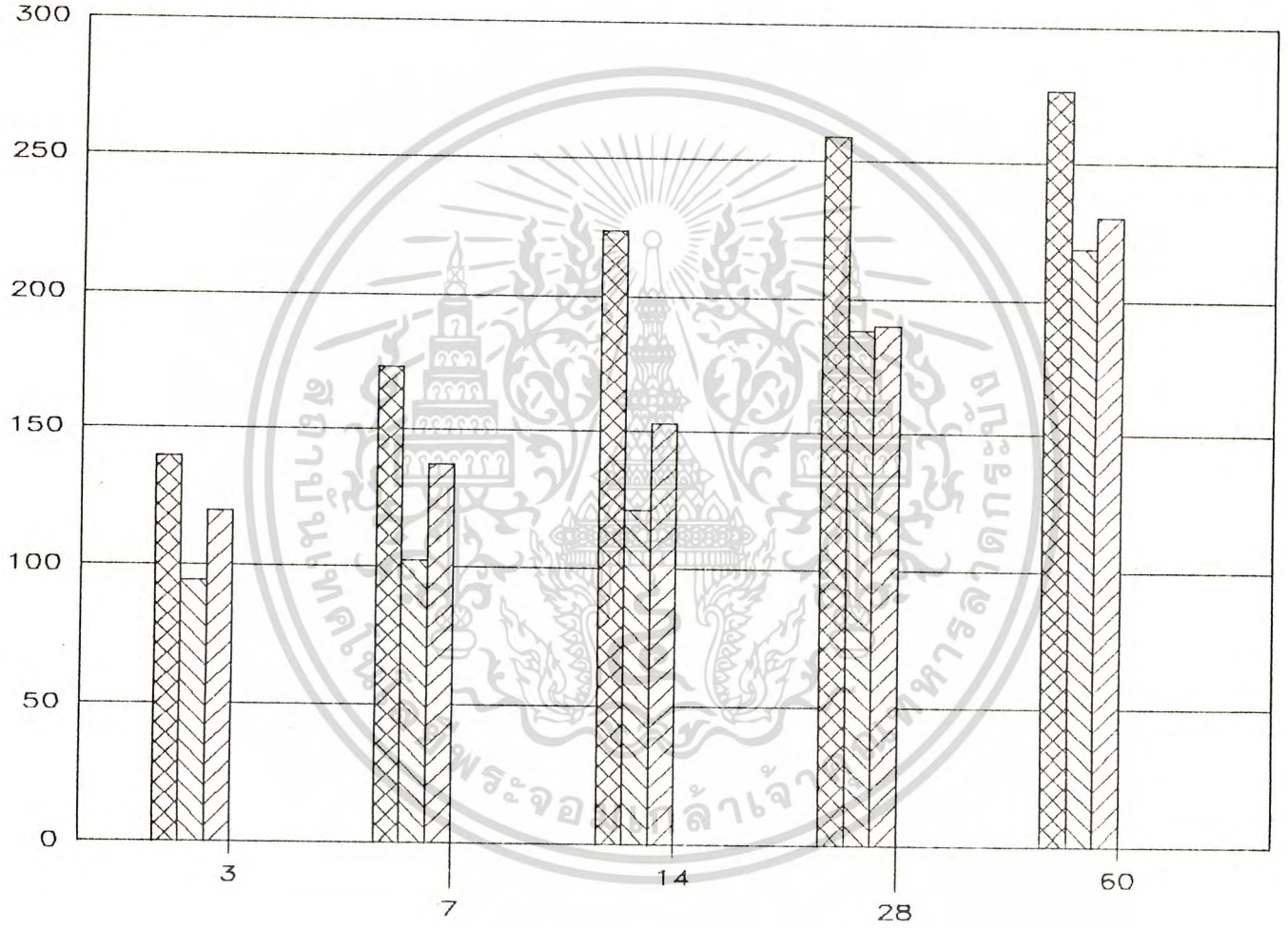
รูปที่ 5.1.5


DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH
ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย
Compressive Strength (KSC.)
300
250
200
150
100
50
0
3
7
14
28
60
ระยะเวลาบ่ม (วัน)
100:0:0
80:0:20
80:5:15
80:10:10
80:15:5
80:20:0

รูปที่ 5.1.6

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

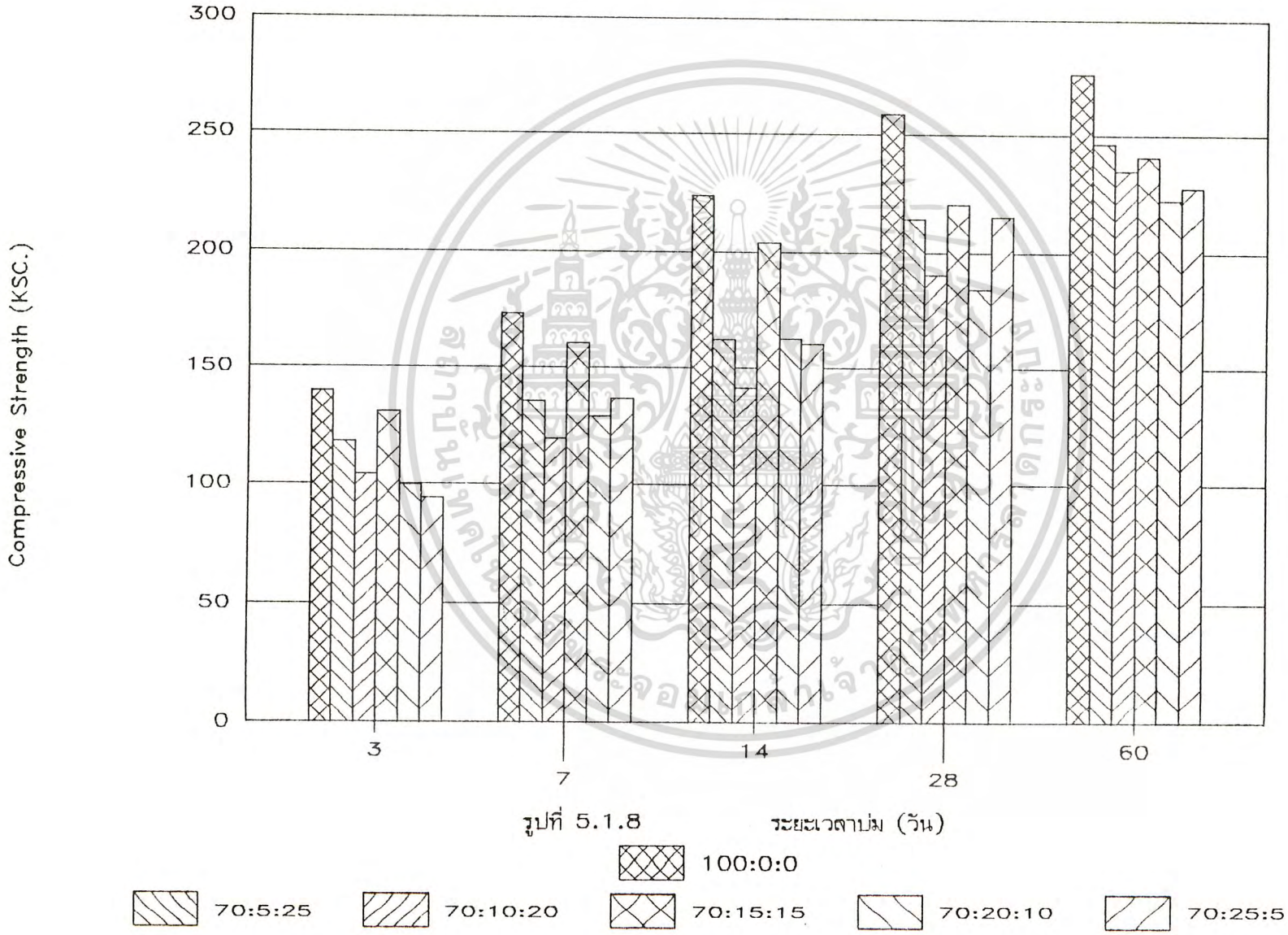
ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าลอย:ขี้เถ้าแกลบ



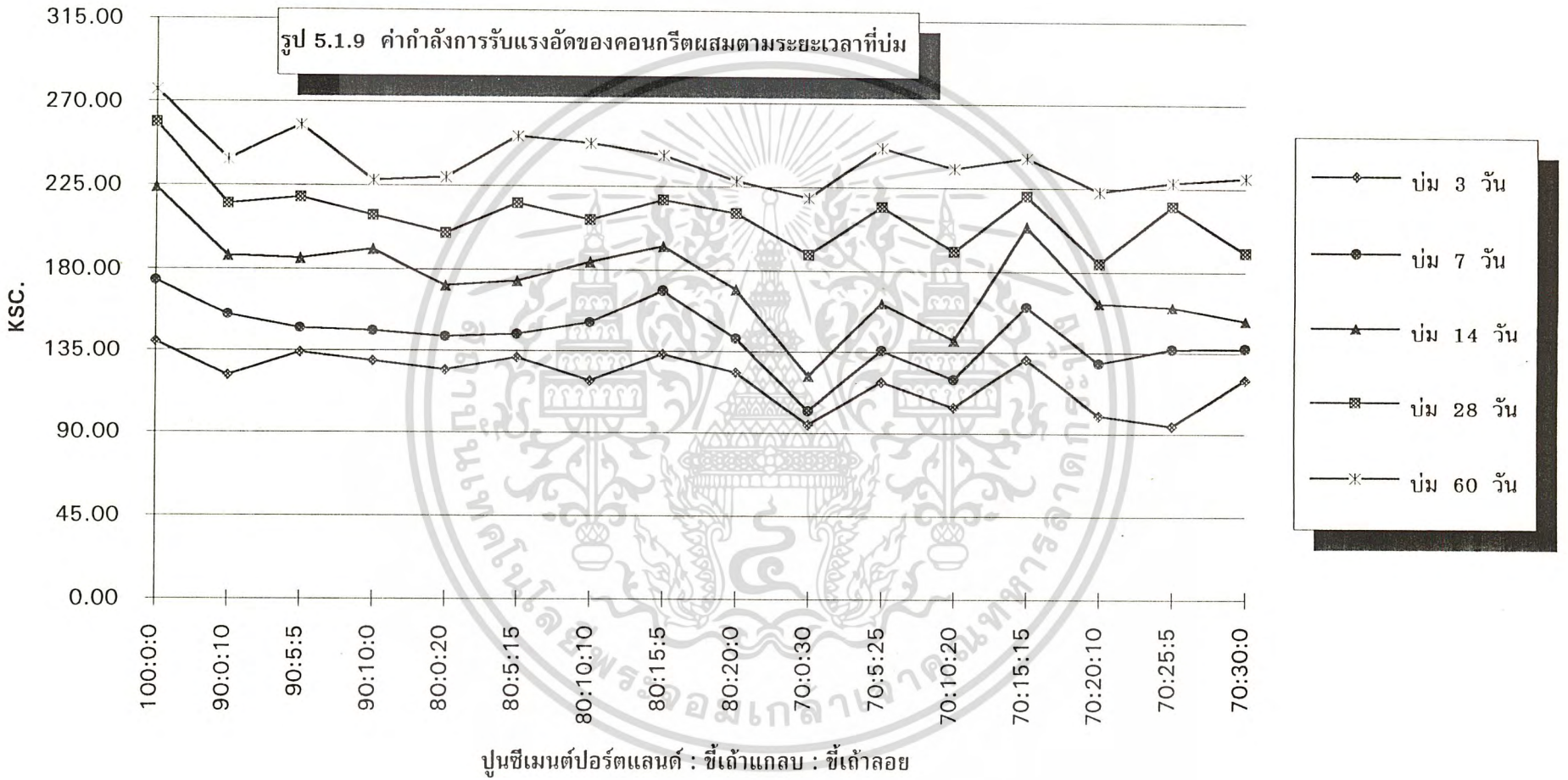
รูปที่ 5.1.7

DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH

ปูนซีเมนต์:ขี้เถ้าแกลบ:ขี้เถ้าลอย



รูปที่ 5.1.8


รูป 5.1.9 ค่ากำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตผสมตามระยะเวลาที่บ่ม
KSC.
315.00
270.00
225.00
180.00
135.00
90.00
45.00
0.00
100:0:0
90:0:10
90:5:5
90:10:0
80:0:20
80:5:15
80:10:10
80:15:5
80:20:0
70:0:30
70:5:25
70:10:20
70:15:15
70:20:10
70:25:5
70:30:0
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ขี้เถ้าแกลบ : ขี้เถ้าลอย
บ่ม 3 วัน
บ่ม 7 วัน
บ่ม 14 วัน
บ่ม 28 วัน
บ่ม 60 วัน