

ผลกระทบของสภาพความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน
ต่อการกำลังรับแรงอัด

กิจกุล ดีดวงพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
กรกฎาคม 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



ผลกระทบของสภาพความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน
ต่อการกำลังรับแรงอัด

กิจกุล ดีดวงพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กรกฎาคม 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม





คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกิจกุล ดีดวงพันธ์ แล้วเห็นสมควร
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.เรืองรุชต์ ชีระโรจน์) (อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.สพลาภ หอมมุขมิวงค์) (ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ภาณุรักษ์ ขอสุนทร) (กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ.ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๑๑ เดือน ก.ค. พ.ศ. ๒๕๕๗



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สพลาภ หอมวุฒิมังค์ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ชี้แนวทางในการศึกษาวิจัย ให้ข้อคิด คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง และดูแลเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ณัดกิจ ขาวรีรัตน์ ที่ให้เกียรติเป็นผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่มีประโยชน์ยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้และคำแนะนำที่ดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการจัดการหาวัสดุอุปกรณ์และที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ รวมทั้งสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท และนิสิตปริญญาตรีในกลุ่มของห้องวิจัยทุกคน ที่ช่วยเหลือในทุกเรื่อง ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณและขอรำลึกในพระคุณของ คุณพ่อคุณ - คุณแม่ไสว ดีดวงพันธ์ นางदान บัณพาน ในการศึกษาโดยตลอด และขอขอบคุณทัศนวรรณ ดีดวงพันธ์ เด็กชายพิรณัฐ ดีดวงพันธ์ เด็กชายพิชญุตม์ ดีดวงพันธ์ ญาติพี่น้องตระกูลดีดวงพันธ์และตระกูลคนชื่อ ทุกๆ คน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนสำเร็จ

กิจกุล ดีดวงพันธ์



ชื่อเรื่อง	ผลกระทบของสภาพความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินต่อกำลังรับแรงอัด		
ผู้วิจัย	นายกิจกุล ดีดวงพันธ์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
กรรมการควบคุม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหภาพ หอมวุฒิมังค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กริสัน ชัยมูล		
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยนำเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดสูงมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แล้วทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกให้มียกกำลังรับแรงอัด 240 330 และ 410 กก./ซม.² ที่อายุ 28 วัน และทำการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน โดยขณะที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้น ตัวอย่างคอนกรีตมีความชื้นแตกต่างกัน 4 ระดับคือ ร้อยละ 0 25 50 และ 100

จากผลการทดลองพบว่า ที่อายุ 7 วัน คอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เมื่อเทียบกับทุกระดับการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในช่วงอายุต้น และที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่ร้อยละ 50 - 60 กำลังรับแรงอัดลดลงเหลือประมาณร้อยละ 85 ของคอนกรีตควบคุม สภาพของความชื้นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจนที่อายุ 7 วัน แต่ผลดังกล่าวจะลดลงเมื่อตัวอย่างคอนกรีตมีอายุมากขึ้น โดยที่อายุ 28 และ 90 วัน ที่ระดับความชื้นร้อยละ 0 และ 25 จะมีร้อยละของกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันและคอนกรีตที่มีความชื้นร้อยละ 50 ก็มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันกับร้อยละ 100

ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่าจากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และความแม่นยำของผลการทำนายกำลังรับแรงอัดอยู่ในระดับที่ดีมาก ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้สามารถนำมาทำนายค่าการกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ที่สภาพความชื้นต่างๆได้อย่างดี

คำสำคัญ : กำลังรับแรงอัด; ปริมาณความชื้น; คอนกรีต; เถ้าถ่านหิน



TITLE Effect of moisture content in pulverized fuel ash concrete sample on compressive strength

AUTHOR Mr. Kijkule Deedoungpan

DEGREE M.Eng. **MAJOR** Civil Engineering

ADVISORS Asst. Prof. Sahalaph Homwottiwong, Ph.D.
Asst. Prof. Krit Chaimoon, Ph.D.

UNIVERSITY Mahasarakham University **DATE** 2014

ABSTRACT

This research studied the effect of moisture content in sample on the compressive strength of fly ash concrete. Fly ash fineness was improved by grinding and used to replace Portland cement type I at 0-60% by weight of binder. Cylindrical concrete sample were cast with the designate 28-day compressive strength of 240, 330 and 410 ksc. Compressive strengths were tested at 7, 28 and 90 days. The moisture content in concrete samples during compressive strength testing were controlled at 0, 25, 50 and 100%.

The results showed that at the age of 7 days, the compressive strength of control concrete was higher than fly ash concrete. as possible. This phenomenon was due to the hydration reaction at the early age of sample. Later, at the age of 28 and 90 days, concrete containing fly ash 10-40% had the compressive strength higher than the control concrete. the concrete containing 50-60% of fly ash had a reduction in their compressive strength, which was approximately 85% of the control concrete. At 7days, level of moisture content in fly ash concrete samples significantly affected to the compressive strength. However, the affect from the moisture level tended to reduce at the later age. At 28 and 90 days, compressive strength of concretes with moisture content 0% and 25% were in the same level and concrete had moisture content of 50% and 100% also had the same strength.

For mathematical model, it was found that the value from the experimental was very similar to the calculated values from the equation. The accuracy of the prediction compressive strength was very good. The compressive strength from the mathematical model linearly correlated with the experimental values. The mathematical model in this research could be applied to predicted the value of compressive strength of fly ash concrete containing various moisture content as well.

Key Words : Compressive strength; Moisture content; Concrete; Fly ash



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุปอชโซลาน	3
2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาปอชโซลาน	4
2.3 เถ้าถ่านหิน	5
2.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน	7
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด	8
2.6 ผลกระทบของความชื้นต่อกำลังของคอนกรีต	9
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	12
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	13
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	13
3.4 การทดสอบหาอัตราความชื้นในก้อนตัวอย่างคอนกรีต	18
3.5 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด	19
3.6 การสังเคราะห์แบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	23
4.1 ผลการทดสอบหาระดับความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต	23
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นต่างๆ	25
4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions	43



บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผล	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก ตารางผลกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินระดับความชื้นต่างๆ	59
ภาคผนวก ข ตารางเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลองของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นต่างๆ	63
ภาคผนวก ค ผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้น ร้อยละ 100 การแทนที่ร้อยละ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	75
ภาคผนวก ง อักษรย่อและสัญลักษณ์	81
ภาคผนวก จ รูปภาพประกอบการทดลอง	84
ประวัติย่อของผู้วิจัย	87



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.64 กำลังที่อายุ 28 วัน 240 ksc	15
ตาราง 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.51 กำลังที่อายุ 28 วัน 330 ksc	15
ตาราง 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.42 กำลังที่อายุ 28 วัน 410 ksc	16
ตาราง 4.1 ระยะเวลาของการบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความชื้นต่างๆ	24
ตาราง 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 อายุ 7 28 90 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	26
ตาราง 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 อายุ 7 28 90 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	33
ตาราง 4.4 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 อายุ 7 28 90 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	39
ตาราง 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 0.42 ที่อายุ 7 วัน	45
ตาราง 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 0.42 ที่อายุ 28 วัน	48
ตาราง 4.7 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 0.42 ที่อายุ 90 วัน	50
ตารางภาคผนวก ก-1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	60
ตารางภาคผนวก ก-2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	61
ตารางภาคผนวก ก-3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้นต่างๆ	62
ตารางภาคผนวก ข-1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	64



ตารางภาคผนวก ข-2	เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	67
ตารางภาคผนวก ข-3	เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	71
ตารางภาคผนวก ค-1	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่ระดับ ความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	76
ตารางภาคผนวก ค-2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	77
ตาราง ภาคผนวก ค-3	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	79



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 เชื้อนโคลงทำดำน	6
ภาพประกอบ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย	14
ภาพประกอบ 3.2 ชุดการทดสอบค่าการยวบตัวของคอนกรีต	18
ภาพประกอบ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ค่าความชื้นต่อระยะเวลาการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีต	19
ภาพประกอบ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตทุกๆส่วนผสม	24
ภาพประกอบ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	28
ภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	28
ภาพประกอบ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	29
ภาพประกอบ 4.5 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	30
ภาพประกอบ 4.6 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	30
ภาพประกอบ 4.7 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	31
ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 7 วัน	34
ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 28 วัน	34



ภาพประกอบ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 90 วัน	35
ภาพประกอบ 4.11	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	36
ภาพประกอบ 4.12	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	36
ภาพประกอบ 4.13	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	37
ภาพประกอบ 4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	40
ภาพประกอบ 4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	40
ภาพประกอบ 4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ	41
ภาพประกอบ 4.17	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	42
ภาพประกอบ 4.18	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	42
ภาพประกอบ 4.19	ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ	43
ภาพประกอบ 4.20	ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน	44
ภาพประกอบ 4.21	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน	45



ภาพประกอบ 4.22 ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน	47
ภาพประกอบ 4.23 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้ จากการทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน	47
ภาพประกอบ 4.24 ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน	49
ภาพประกอบ 4.25 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้ จากการทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน	49
ภาพประกอบภาคผนวก ค-1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	77
ภาพประกอบภาคผนวก ค-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	79
ภาพประกอบภาคผนวก ค-3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีสิ่งก่อสร้างเกิดขึ้นมากมาย เพื่อเติบโตไปพร้อมกับเศรษฐกิจที่กำลังพัฒนา และในสิ่งก่อสร้างส่วนใหญ่ล้วนแล้วแต่เป็นงานคอนกรีตทั้งสิ้น เนื่องจากคอนกรีตมีความเหมาะสมกว่าวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ทั้งในด้านคุณสมบัติ และในด้านของราคา โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญขององค์อาคารไม่ว่าจะเป็นบ้านพักอาศัย ตึกสูง ถนน เขื่อนคอนกรีตและสิ่งก่อสร้างต่างๆ ดังนั้นคุณสมบัติของคอนกรีตจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างต่างๆ เหล่านั้นโดยเฉพาะคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้เพราะกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ในการออกแบบได้โดยตรง

สำหรับการผลิตคอนกรีต โดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสานแต่ในปัจจุบันกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปได้มีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตจำนวนมาก เนื่องจากต้องการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งทำให้คอนกรีตที่ได้มีราคาต้นทุนต่ำและนอกจากนั้นการใช้วัสดุปอซโซลาน อาทิเช่น เถ้าถ่านหิน (Fly ash) ไมโครซิลิกา (Micro silica) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast furnace slag) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash) ในงานคอนกรีตยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด ลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟต ลดการซึมผ่านของน้ำ และเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต เป็นต้น

เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน และได้มีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเถ้าถ่านหินช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต

ในการศึกษาและออกแบบเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามความประสงค์สำหรับงานประเภทต่างๆ นั้นปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมีหลายประการ เช่น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อายุคอนกรีต ประเภทของวัสดุผสมที่ใช้ผสมเป็นคอนกรีต ชนิดของมวลรวม ส่วนผสมคอนกรีต การหล่อและการบ่มตัวอย่าง หากมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆข้างต้นก็จะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ปัจจัยอีกประการคือความชื้นในแท่งทดสอบคอนกรีต เนื่องจากพบว่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างคอนกรีตขณะที่ทำการทดสอบกำลังอัดมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C39 กำหนดให้ทำการทดสอบตัวอย่างทันทีที่นำออกมาจากสภาพการบ่มชื้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้วิธีการบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยการแช่น้ำ เมื่อครบอายุการทดสอบก็จะนำขึ้นมาทำ



การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด แต่ในการทำงานจริงตัวอย่างคอนกรีตไม่ได้ทำการทดสอบทันทีหลังจากนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำเนื่องจากมีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น การขนส่งตัวอย่างไปยังสถานที่ทดสอบ การรลำดับการทดสอบ เป็นต้น สถานการณ์เหล่านี้อาจทำให้สภาพความชื้นภายในตัวอย่างคอนกรีตไม่เท่ากัน และมีผลต่อค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ (Samir et al, 2010)

ดังนั้นวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างคอนกรีตขณะที่ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นค่ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณความชื้นต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมเถ้าถ่านหิน

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางของการศึกษาเกี่ยวปริมาณความชื้นในโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

1.2.3 เพื่อศึกษาแบบจำลองสมการเชิงเส้นที่ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างคอนกรีตมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน โดยปริมาณความชื้นที่สูงจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยเรื่องนี้ได้นำเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดด้วยเครื่องบดแบบตกระบอบให้ได้ขนาดที่ค้ำบนตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.4.1 ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต (W/B) ทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 0.64 0.51 และ 0.42

1.4.2 ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนร้อยละ 0 – 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.4.3 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาด 10 x 20 ซม. ถูกหล่อและควบคุมค่าการยุบตัวอย่างอยู่ในช่วง 10–15 ซม.

1.4.4 อายุการทดสอบคอนกรีตที่อายุ 7 28 และ 90 วัน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย งานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีหัวข้อหลักดังนี้

- 2.1 วัสดุปอซโซลาน
- 2.2 ปฏิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน
- 2.3 เถ้าถ่านหิน
- 2.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
- 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด
- 2.6 ผลกระทบของความชื้นต่อกำลังของคอนกรีต
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความของ วัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าลอยและเถ้ากลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟุ้งที่มีค่าความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2546)

ตาม ASTM C 618 (1995) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ โดยมีปริมาณผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ (silica oxide, SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (alumina oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 4 ค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 10 และมีค่าดัชนีกำลังไม่น้อยกว่าร้อยละ 75



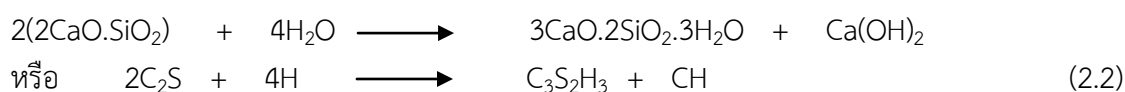
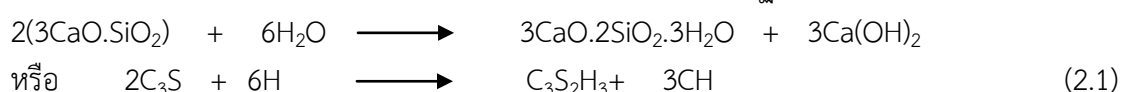
2. ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นถ่านล้อยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide, SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (alumina oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ซึ่งโดยทั่วไปถ่านล้อย ชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าถ่านล้อยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้ถ่านล้อยที่มี SiO_2 สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

3. ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นบอซโซลานที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) มากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ (silica oxide, SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (alumina oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

2.2 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาบอซโซลาน

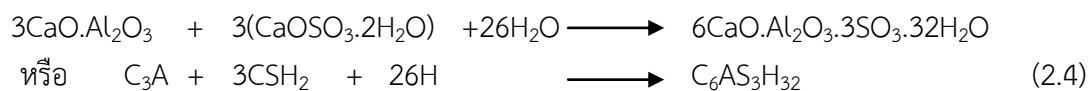
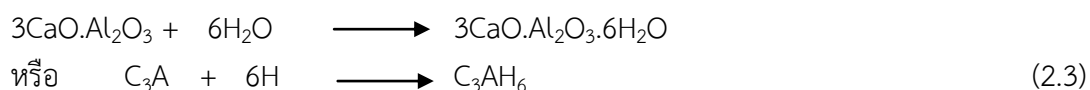
2.2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

เมื่อพิจารณาปฏิกริยาทางเคมีของปูนซีเมนต์กับน้ำพบว่า ปฏิกริยาที่ได้คือปฏิกริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ผสมกับน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้วไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันแตกต่างกันเพียงที่จำนวนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกริยาดังสมการ 2.1 และ 2.2



ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 2.3 ปฏิกริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมยิบซัมเพื่อหน่วงปฏิกริยา เพราะ C_3A จะทำปฏิกริยากับไอออนของซัลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรตหรือเรียกกันทั่วไปว่าเอทริงไต์ (Ettringite) ดังสมการที่ 2.4





ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเกลือออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาล้างกับอะลูมิเนียมออกไซด์

2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อยู่ในเม็ดานหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งสามารถเขียนแสดงสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ



โดยเรียกสมการที่ (2.5) และ (2.6) ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับค่า x , y และ z เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2536) โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุตั้งแต่ 7 วัน (Fraay, Bijen and Haan, 1989: 235-246) และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตจะมีอายุมากกว่า 3 ปี ครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990: 193-196)

2.3 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (electrostatic precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากแม่เมาะในการผลิตกระแสไฟฟ้าปีละ 3 ล้านตัน (สมชัย กกกำแหง, 2536)



อีกประมาณปีละ 2.8 แสนตันต่อปี และมีการนำเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งไปใช้ในงานคอนกรีตประมาณปีละ 1.5 ล้านตัน (สุรพล พฤษพานุกูล, 2546)

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าถ่านหินในประเทศไทยเริ่มขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2523 โดยประจิต จิระปภา (2523: 195-205) ได้นำเสนองานวิจัยที่มีชื่อว่า “การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ของเถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินแม่เมาะในโรงไฟฟ้า” ขึ้นเป็นครั้งแรก และต่อมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าถ่านหินในประเทศไทยกันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน จึงส่งผลให้ประเทศไทยมีการใช้เถ้าถ่านหินในงานก่อสร้างขึ้น โดยสิ่งก่อสร้างที่สำคัญ อาทิเช่น เชื้อเพลิงหล่อทำดำนหรือเชื้อเพลิงทำดำนที่จังหวัดนครนายก ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 โดยเป็นเชื้อเพลิงคอนกรีตอัดที่ใหญ่มากที่สุดในโลก ด้วยการนำเอาเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ที่ได้จากเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาใช้เป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วน แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดแบบสั่นสะเทือนเหมือนการบดอัดดินซึ่งมีปริมาตรคอนกรีตอัด (Roller Compacted Concrete) ถึง 5,470,000 ลูกบาศก์เมตร โดยมีความสูง 93 เมตร ยาว 2,720 เมตร (การนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์, 2545: เว็บไซต์)



ภาพประกอบ 2.1 เชื้อเพลิงหล่อทำดำน

เถ้าถ่านหินจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาในปริมาณที่สูง เป็นผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ และสำหรับโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะได้มีการควบคุมคุณภาพเถ้าถ่านหินให้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในปริมาณที่เหมาะสมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา ทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินโดยส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน American Society for Testing and Materials C 618 (2002: 294-296) เป็น Class F ประกอบกับลักษณะทางกายภาพของเถ้าถ่านหินซึ่งมีขนาดเล็ก มีรูปร่างที่แน่นอน ลักษณะเป็นทรงกลม ผิวค่อนข้างเรียบ จึงทำให้มีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น วัสดุถมสำหรับงานก่อสร้าง งานก่อสร้างชั้นพื้นทางถนน งานก่อสร้างถนนคอนกรีตอัด และงานก่อสร้างคอนกรีตหลายด้วยคอนกรีตความร่อนต่ำ รวมทั้งได้นำเถ้าถ่านหินไปใช้ทดแทนซีเมนต์ในงานคอนกรีตทั่วไป



ถ้าผ่านหินนอกจากจะทำให้คอนกรีตทำงานได้ง่ายขึ้นและยังทำให้คอนกรีตลดการเยิ้มน้ำและการแยกตัวได้ดี เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์ หยาบ และหิน การที่ถ้าผ่านหินเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นทำให้โอกาสในการแยกตัวของคอนกรีตน้อยลง (วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และเรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2546: 30-53)

2.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถ้าผ่านหิน

กำลังอัดถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงที่เข้าใจง่ายและทดสอบได้ง่าย จากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมถ้าผ่านหินมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นขึ้นในช่วงอายุปลายและช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตไปในทิศทางบวกเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมถ้าผ่านหินโดยเฉพาะคุณสมบัติด้านกำลังอัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ปริญญ และ อินทรชัย (2528) พบว่า กำลังอัดระยะต้นของปูนซีเมนต์ผสมถ้าล่อยมีค่าลดลงตามปริมาณถ้าล่อยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิด แต่เมื่อนานไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมถ้าล่อยมีค่าลดลงตามปริมาณถ้าล่อยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานแล้วและการใช้ถ้าล่อยมาเป็นส่วนผสมที่พอเหมาะ จะต้องผสมไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

เมธี เวชรัตน์ (2535) ได้ทำการศึกษาถ้าล่อย 2 ชนิด คือ Hanson และ Mercar ซึ่งทั้งสองชนิดมีขนาดต่างกันแต่ใช้ส่วนผสมเดียวกัน ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าในช่วงแรกกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถ้าล่อยต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาและส่วนผสมที่มีถ้าล่อยขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่สามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีถ้าล่อยขนาดใหญ่กว่าเป็นส่วนผสมในทุกอายุการทดสอบคอนกรีต

Swamy และ Mahmud (1986: 413 - 432) ได้ทำการเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์เข้าไปในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของถ้าผ่านหินอยู่ในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และเติมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ร้อยละ 0.3 และ 1.8 ของมวลรวมทั้งหมดของวัสดุประสาน ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน พบว่ามีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 - 30 ของคอนกรีตควบคุม

Bouzoubaa และ Lachemi (2000: 413 - 420) กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าผ่านหินปริมาณสูง (High volume pozzolan concrete, HVFA) ผสมถ้าผ่านหินเข้าไปในคอนกรีตร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเหลือร้อยละ 75

Jiang และคณะ (2000: 699 - 702) แทนที่ถ้าผ่านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างเท่ากับ 260 และ 360 กก./ซม.² ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.37



2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด

ในการศึกษาและออกแบบเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามความประสงค์สำหรับงานประเภทต่างๆ นั้นปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมีหลายประการ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

2.5.1.1 ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมากทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันแต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าผสมปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

2.5.1.2 มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เฟสค์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดผลของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดผลไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนผลที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความละเอียดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เช่นกัน

2.5.1.3 น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.5.2 การชั่งตวงส่วนผสม

2.5.2.1 การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

2.5.2.2 อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.5.3 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เฟสค์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่ทั่วถึงได้



2.5.3.1 การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตแยกตัวในขณะที่กำลังเท หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จะทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

2.5.4 การบ่มคอนกรีต

2.5.4.1 ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการ รวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจำต้องเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลาถ้าซีเมนต์เพสต์ไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะเป็นการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปจะทำการบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

2.5.4.2 อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

2.5.4.3 เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.6 ผลกระทบของความชื้นต่อกำลังของคอนกรีต

นับว่าเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดในการทดสอบคอนกรีต คอนกรีตที่มีความชื้นมากกำลังอัดขณะทดสอบลดลงและทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ฉะนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับค่าความชื้นที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีความชื้นระดับต่างๆ และจะเป็นข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งทางด้านความแข็งแรง และผลการทดสอบโดยสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้อธิบาย ดังนี้

Ryu และคณะ (2011: 142–153) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสภาพแวดล้อมต่อความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณความชื้นในคอนกรีต โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่ออธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและปริมาณความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์จากปริมาณน้ำฝน ซึ่งทำการเปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตกรณี cracking และ ไม่แตกร้าว uncracked โดยจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าการแตกร้าวเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีลักษณะเกิดขึ้นที่พื้นผิวคอนกรีต สำหรับปริมาณความชื้นทำให้การแตกร้าวลึกและรอยแตกร้าวมีลักษณะขนาดใหญ่

Ranjith และคณะ (2008: 453 - 469) ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตการแทนที่มวลรวมที่ระดับความชื้นต่างๆ โดยใช้วิธีทดสอบแบบคลื่นเสียงพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เปียกชื้นมีค่าลดลงเทียบกับตัวอย่างที่แห้งจากค่าการแทนที่ที่อัตราส่วนเดียวกัน และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง



โมดูลัสความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น และเปลี่ยนไปได้จากกำลังรับแรงอัดและปริมาณน้ำ

Samir และคณะ (2010: 688 - 696) ศึกษาผลกระทบของความชื้นและอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตพบว่า การพัฒนาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน การทดสอบได้วัดค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) กำลังอัด และกำลังรับแรงดึงที่อุณหภูมิและความชื้นที่ต่างกันเพื่อทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตปกติ ซึ่งผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีบทบาทสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยที่ระดับอุณหภูมิและความชื้นที่สูงจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีต แรงดึง และโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าต่ำลง ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นไม่มีความสำคัญต่ออัตราส่วนปัวซอง คอนกรีตที่เกิดจากการบ่มสัมประสิทธิ์ความร้อนและกำลังอัดที่ต่ำ กำลังของคอนกรีตของคอนกรีตของการขยายตัวของคอนกรีตเป็นการลดที่อายุตอนต้น การบ่มคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mendes และคณะ (2002: 631-644) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของความชื้นต่อการนำแรง คือผลกระทบของความชื้นที่เหมาะสมและแผ่การนำไหลจะแสดงโดยใช้ความร้อนและรูปแบบการถ่ายโอนมวลด้วยวัสดุตัวแปรคุณสมบัติภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกัน โดยทดสอบจากเมืองและประเทศที่มีความชื้นต่างกัน วัสดุที่ใช้ศึกษาคือคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (ACC), อิฐ (BRK), ปูนขาว (LMT) และไม้ พบว่าความชื้นที่ระดับต่างๆ ให้ค่าการนำพาแรงที่แตกต่างกัน

Gaur และ Bansal (2002: 11-17) ศึกษาผลของการถ่ายเทความชื้นในการสร้างส่วนประกอบในอุณหภูมิห้องพบว่าการวิเคราะห์ระบบปิดโดยกำหนดให้กระจายความร้อนและความชื้นได้ในบางส่วนของอากาศและความชื้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ 2-3 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับทิศทางของการไล่ระดับอุณหภูมิและความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้

Kukko และ Paroll (1997) นำเสนอเกี่ยวกับการวัดปริมาณความชื้นในงานคอนกรีตที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น โดยเลือกศึกษาในประเทศฟินแลนด์ อีกทั้งอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการของการฝั่งแห้งและการวัดความชื้นในคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งผลจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของคอนกรีตสามารถวัดได้ตามลักษณะของสภาพแวดล้อม โดยคอนกรีต สมรรถนะสูงต้องอาศัยความรู้ร่วมกับความชำนาญและใช้เวลานานกว่าคอนกรีตกำลังปกติ

Binsheng Zhang และคณะ (2002: 363-371) ทำการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างความเปราะและการสูญเสียความชื้นของคอนกรีตที่สัมผัสกับอุณหภูมิที่สูง ผลของการสูญเสียความชื้นในอุณหภูมิที่สูงบนความเปราะของคอนกรีตถูกตรวจสอบด้วยการดำเนินการทดสอบการดัดสามจุดบนรอบบากคาน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะนำไปสู่การสูญเสียมวลที่สูงขึ้น และความเปราะจะลดลง อันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำและความชื้นที่ลดลง



Miyazawa และ Monteiro (1996: 567-572) ศึกษาปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของคอนกรีตสมรรถนะสูงในสภาพที่มีความชื้น โดยอธิบายช่วงการเปลี่ยนแปลงของเพสต์คอนกรีตสมรรถนะสูงมอดาร์ และคอนกรีตที่มีสภาพชื้น โดยศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดตัวอย่าง อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์, ชนิดและขนาดของมวลรวมที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนแปลงความยาว ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างคอนกรีตขนาดเล็กมีปริมาณความชื้นสูงกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ในช่วงสองสัปดาห์แรกของการทดสอบ และความชื้นในตัวอย่งคอนกรีตสมรรถนะสูงมีปริมาณลดลงมากกว่าตัวอย่างมอดาร์ที่มีลักษณะและปริมาณมวลรวมเดียวกัน

Kim และ Leeb (1999: 1921-1927) ศึกษาการกระจายความชื้นของคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศในอายุช่วงต้น โดยจากผลการศึกษาอธิบายได้ว่าปริมาณความชื้นของคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับอากาศมีปริมาณลดลง และในอายุช่วงต้นปริมาณความชื้นลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตสมรรถนะสูง และจากการศึกษาสามารถอธิบายได้ว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงมีการกระจายความชื้นมากกว่าคอนกรีตที่มีสูงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ จากข้อมูลประกอบงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ปริมาณความชื้นมีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาสภาพความชื้นแตกต่างกันที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน สำหรับอายุและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและเป็นทฤษฎีอ้างอิงให้กับงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ ที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

- 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง
- 3.4 การทดสอบหาอัตราความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต
- 3.5 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต
- 3.6 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด
- 3.7 การสังเคราะห์แบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement type I) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 15-2547 สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป เป็นวัสดุประสาน

3.1.2 ulla่านหิน นำมาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง และนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยนำมาบดเพื่อลดขนาดให้อนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5

3.1.3 ทรายแม่น้ำธรรมชาติ ใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผสมคอนกรีต

3.1.4 หินปูนย่อยขนาดโตสุด 20 มิลลิเมตร มีขนาดคละตามมาตรฐาน American society for testing and materials (2000 A: 5 – 16; 2000 E: 84 – 87) ทำความสะอาดโดยการล้างและผึ่งแดดให้แห้งสนิท จากนั้นเก็บตัวอย่างให้พ้นจากฝุ่นและความชื้น ใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีต

3.1.5 น้ำสะอาด ในการทดลองนี้ใช้น้ำประปาผสมคอนกรีต

3.1.6 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตให้อยู่ในช่วงที่กำหนด



3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ชุดเครื่องทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C39
- 3.2.2 เครื่องบดแบบตกระทบ
- 3.2.3 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- 3.2.4 ตู้อบ
- 3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.6 ถังเก็บวัสดุ
- 3.2.7 ถังบ่มคอนกรีต
- 3.2.8 เครื่องผสมคอนกรีต
- 3.2.9 แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.
- 3.2.10 ชุดทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต
- 3.2.11 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ใช้โปรแกรมภาษา คอมพิวเตอร์ โดยคุณสมบัติของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง
- 3.2.12 ซอฟต์แวร์ในการใช้สร้างแบบจำลองใช้โปรแกรม SPSS 17.0

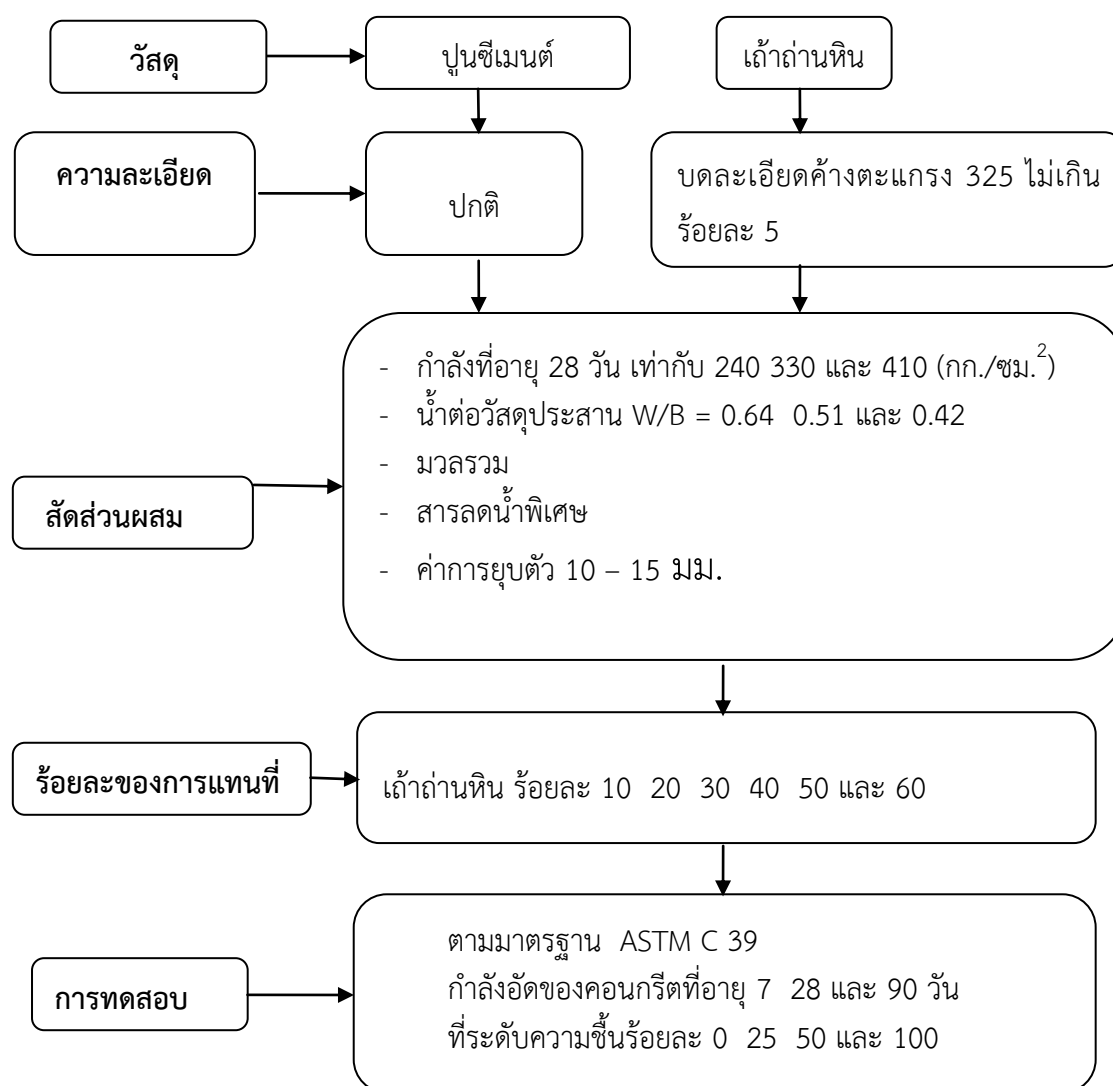
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

- 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ
 - 3.3.1.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement type I) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 15-2547 สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป
 - 3.3.1.2 แก้วถ่านหิน นำมาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาอบแห้งในอุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วใส่ภาชนะ ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันความชื้น และปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดด้วยเครื่องบดแบบตกระทบให้ได้ขนาดที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5
 - 3.3.1.3 หิน ทำความสะอาดโดยการล้าง และผึ่งแดดให้แห้งสนิท จากนั้นเก็บใส่ถังให้พ้นจากฝุ่นและความชื้นเพื่อรอการผสมคอนกรีต
 - 3.3.1.4 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำชีล้างทำความสะอาด และนำไปอบแล้วเก็บใส่ถังป้องกันความชื้น



3.3.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต

3.3.2.1 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต ก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ที่ W/B 0.64 เท่ากับ 240 กก./ชม.² ที่ W/B 0.51 เท่ากับ 330 กก./ชม.² และที่ W/B 0.42 เท่ากับ 410 กก./ชม.² และแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินโดยผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยในแต่ละอัตราส่วนผสมใช้ก้อนตัวอย่างจำนวนก้อนชุดตัวอย่างละ 5 ก้อนตัวอย่าง และหาค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดดังแสดงในตาราง 3.1 - 3.3 ควบคุมการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 10 – 15 ซม. ในบางส่วนผสมอาจมีการใช้สารลดน้ำ ช่วยปรับให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตครบ 1 วัน นำก้อนตัวอย่างออกแบบแล้วนำไปปั๊มในน้ำจนกระทั่งถึงอายุการทดสอบ



ภาพประกอบ 3.1 แผนการดำเนินการวิจัย



ตาราง 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.64 กำลังที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 240 (กก./ชม.²)

Type of Concrete	Mix Proportions(kg/m ³)						W/B
	Water	Cement	FA	sand	stone	SP.(kg)	
CT-N	203.64	312.50	-	815.75	1013.04	0.15	0.64
FA10-N	203.64	281.25	31.25	803.01	1013.04	0.10	0.64
FA20-N	203.64	250.00	62.50	790.16	1013.04	0.07	0.64
FA30-N	203.64	218.75	93.75	777.52	1013.04	0.03	0.64
FA40-N	203.64	187.50	125.00	764.82	1013.04	0.03	0.64
FA50-N	203.64	156.25	156.25	752.05	1013.04	0.02	0.64
FA60-N	203.64	125.00	187.50	739.32	1013.04	0.02	0.64

CT= Control, FA=Fly ash, N = Normal Concrete 240 ksc

ตาราง 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.51 กำลังที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 330 (กก./ชม.²)

Type of Concrete	Mix Proportions(kg/m ³)						W/B
	Water	Cement	FA	sand	stone	SP.(kg)	
CT-N2	203.51	392.16	-	755.01	1013.04	0.27	0.51
FA10-N2	203.51	352.94	39.22	739.01	1013.04	0.21	0.51
FA20-N2	203.51	313.73	78.43	723.02	1013.04	0.15	0.51
FA30-N2	203.51	274.52	117.64	707.04	1013.04	0.10	0.51
FA40-N2	203.51	235.30	156.86	691.07	1013.04	0.07	0.51
FA50-N2	203.51	196.08	196.08	675.07	1013.04	0.03	0.51
FA60-N2	203.51	156.86	235.30	659.08	1013.04	0.03	0.51

CT= Control, FA=Fly ash, N2 = Normal Concrete 330 ksc



ตาราง 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ W/B เท่ากับ 0.42 กำลังที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 410 (กก./ซม.²)

Type of Concrete	Mix Proportions(kg/m ³)						W/B
	Water	Cement	FA	sand	stone	SP.(kg)	
CT-H	203.37	476.19	-	677.88	1013.04	0.50	0.42
FA10-H	203.37	428.57	47.62	658.48	1013.04	0.44	0.42
FA20-H	203.37	380.95	95.24	639.08	1013.04	0.38	0.42
FA30-H	203.37	333.33	142.86	619.66	1013.04	0.33	0.42
FA40-H	203.37	285.73	190.46	600.23	1013.04	0.30	0.42
FA50-H	203.37	238.10	238.09	580.82	1013.04	0.26	0.42
FA60-H	203.37	190.46	285.73	561.40	1013.04	0.26	0.42

CT= Control, FA=Fly ash, H = High strength concrete 410 ksc

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

CT หมายถึง คอนกรีตควบคุม เป็นคอนกรีตควบคุมที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน

N หมายถึง คอนกรีตกำลังรับแรงอัด 240 (กก./ซม.²)

N2 หมายถึง คอนกรีตกำลังรับแรงอัด 330 (กก./ซม.²)

H หมายถึง คอนกรีตกำลังรับแรงอัด 410 (กก./ซม.²)

FA หมายถึง เถ้าถ่านหิน

สัญลักษณ์ตัวเลข 10 20 30 40 50 และ 60 คือ ร้อยละการแทนที่

ตัวอย่างสัญลักษณ์

FA10 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

FA20 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

FA30 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

FA40 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

FA50 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



FA60 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมแล้วผ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพ ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

100 หมายถึง ค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต ร้อยละ 100

50 หมายถึง ค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต ร้อยละ 50

25 หมายถึง ค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต ร้อยละ 25

0 หมายถึง ค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต ร้อยละ 0

7 Days หมายถึง ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 7 วัน

28 Days หมายถึง ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 28 วัน

90 Days หมายถึง ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 90 วัน

3.2.3 การทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump test)

การทดสอบค่ายุบตัว (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C 143 ทดสอบหาค่าการยุบตัว โดยกำหนดให้มีค่าระหว่าง 10 ถึง 15 ซม. ทำการทดสอบโดยใช้กรวยมาตรฐาน (Standard slump cone) สูง 305 มม. ตอนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 203 มม. ตอนบน 102 มม. มีหูยก 2 ข้าง ใส่คอนกรีตลงในกรวย 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยเหล็กมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. มีหัวมน เมื่อใส่คอนกรีตจนเต็มแล้วปาดให้เรียบ จากนั้นค่อยๆ ยกกรวยขึ้น นำมาเทียบค่าการยุบตัวของคอนกรีตกับความสูงกรวย วิธีการทดสอบหาค่ายุบตัวมีอยู่ในมีหลักและวิธีการดังนี้

3.2.3.1 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเป็นตัวแทน โดยนำตัวอย่างจากการผสมถึงที่ทำการผสมเสร็จใหม่และผสมเข้ากันดีใช้ทดสอบ

3.2.3.2 ด้านในของกรวยกลวง ทำให้ขึ้นและวางกรวยในพื้นที่เรียบขึ้นไม่ดูดซึมน้ำ ผิวเรียบ กว้างพอที่จะวางคอนกรีตที่จะทดสอบค่ายุบตัว ยื่นเหยียบที่วางเท้ายื่นจากกรวย 2 ข้างให้แน่น เพื่อยึดให้กรวยวางมั่นคงเมื่อทำตามกระบวนการทดสอบ

3.2.3.3 ใส่คอนกรีตให้เต็มลงในกรวย 1/3 โดยปริมาตร และกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเหล็กเส้นปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. จะต้องกระจายจุดการกระทุ้งให้ทั่วหน้าตัดของตัวอย่าง

3.2.3.4 ใส่คอนกรีตให้เต็มลงในกรวย 2/3 โดยปริมาตร ในแต่ละชั้นกระทุ้งอีก 25 ครั้ง ด้วยเหล็กมาตรฐานให้ปลายลงในผิวหน้าของการเทครั้งแรก แต่ลึกไม่ถึงตลอดชั้นแรกที่เทไว้

3.2.3.5 ใส่คอนกรีตครั้งนี้ให้เต็มลงในกรวย กระทุ้งในชั้นนี้อีก 25 ครั้ง ด้วยเหล็กให้ปลายกดล้าผิวครั้งที่สองไปเล็กน้อย จะไม่กระทุ้งตลอดเท่ากับความหนา การกระทุ้งให้ผิวแผ่ไปทั่วๆ โดยให้ครบพื้นที่ของรูปตัดของกรวยในชั้นนี้



3.2.3.6 ปาดคอนกรีตที่ล้นปากกรวยออก มักใช้เหล็กที่กระทุ้งเป็นก้านปาด ให้นำหน้าเรียบ ทำรอบบริเวณนั้นให้เรียบ โดยเฉพาะส่วนฐานของกรวย

3.2.3.7 ค่อยๆ ยกกรวยในแนวตั้งช้าๆ และระมัดระวัง ในกระบวนการนี้ จะต้องไม่เอียงกรวยไปชนหรือกระแทกต่อคอนกรีต ยกกรวยออก แล้วกลับเอาส่วนล่างขึ้น ปลายกรวยวางบนพื้นใกล้เคียงกัน แต่ต้องไม่ไปสัมผัสกับก้อนคอนกรีตที่อยู่บนนั้น

3.2.3.8 วางเหล็กให้ทาบตรงไปข้ามกรวยความยุบ วัดระยะความยาวเป็นนิ้ว จากส่วนใต้ของผิวเหล็กเส้นตรงไปยังยอดของคอนกรีตที่ยุบแล้ว หรือที่จุดศูนย์กลางของฐานดำเนินการวัด จะให้สมบูรณ์ถูกต้องจะต้องอยู่ในช่วงของเวลา $1\frac{1}{2}$ นาที ไม่ทั้งคอนกรีตไว้และไม่นำไปใช้ในการทดสอบอื่นๆ อีก



ภาพประกอบ 3.2 ชุดการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3.4 การทดสอบหาอัตราความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบเพื่อหาอัตราความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตโดยต้องหาระยะเวลาในการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาอัตราความชื้นในแต่ละส่วนผสม ที่ W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่ก้อนตัวอย่างคอนกรีตครบอายุการบ่มขึ้นเป็นระยะเวลา 7 28 และ 90 วัน การทดสอบหาอัตราความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต โดยนำก้อนตัวอย่างที่บ่มขึ้นตามระยะเวลา นำมาทดสอบหาอัตราความชื้นโดยก้อนตัวอย่างคอนกรีต ที่นำก้อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วแช่ให้แห้งทันทีทำการชั่งน้ำหนักก็จะมีอัตราความชื้นเป็น 100% ตามมาตรฐาน ASTM C39 จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และบันทึกค่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่สูญเสียไปหรือค่าของระดับความชื้นที่สูญเสียไปทุกๆ 30 นาที จนกระทั่งก้อนตัวอย่างเริ่มมีน้ำหนักคงที่ คือมีอัตราความชื้นเป็น 0 หรือก้อนตัวอย่างแห้งสนิท และ

นำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยใช้สมการที่ (1) โดยนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความชื้นหรือการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อหาระยะเวลาในการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความชื้นในก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับร้อยละต่างๆ (100 50 25 และ 0) ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงกราฟ (Graphical analysis)

การหาค่าความชื้นในก้อนตัวอย่างด้วยการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในสมการที่ (1)

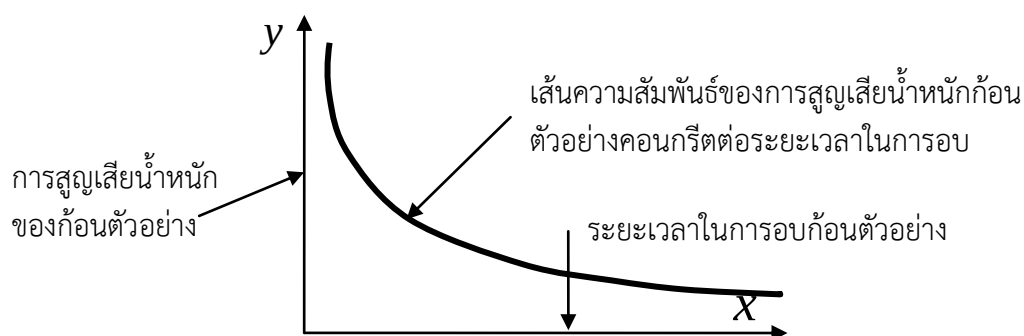
$$\begin{aligned} v &= W_{Water} - W_{Dry} \\ &= W_{Dry} + \left(\frac{v}{100} \right) x \text{ ระดับความชื้น (100 50 25 0)} \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ v คือ ความชื้นในก้อนตัวอย่าง (กก.)

W_{Dry} คือ น้ำหนักของก้อนตัวอย่าง ขณะแห้ง (กก.)

W_{Water} คือ น้ำหนักของก้อนตัวอย่างขณะเปียก (กก.)

โดยค่าความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะมีระยะเวลาในการอบเท่ากับ (นาท)



ภาพประกอบ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ค่าความชื้นต่อระยะเวลาการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีต

3.5 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยทดสอบก้อนตัวอย่างของความชื้นร้อยละ 100 คือนำก้อนตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มขึ้นจากน้ำแช่ให้แห้งแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ส่วนที่ความชื้นร้อยละ 50 25 และ 0 ต้องทำการอบก้อนตัวอย่างตามระยะเวลาที่ได้จากการทดสอบหาค่าความชื้นของแต่ละส่วนผสมแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และเปรียบเทียบค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความชื้นต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ (2)



การหาร้อยละกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตหาได้จาก

$$\text{ร้อยละกำลังรับแรงอัด} = \frac{CS_{Test}}{CS_{100\%}} \times 100 \quad (2)$$

CS_{Test} คือ กำลังรับแรงอัดที่ระดับความชื้นต่างๆ ที่ร้อยละ 100 50 25 และ 0 (กก./ชม.²)

$CS_{100\%}$ คือ กำลังรับแรงอัดที่ระดับความชื้นที่ร้อยละ 100 (กก./ชม.²)

3.6 การสังเคราะห์แบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions

ในการแก้ปัญหาอาจมี 2 ตัวแปรหรือมากกว่าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย มีความจำเป็นหรือความสำคัญที่ต้องหาแบบหุ่นและสำรวจความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น และนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการคาดคะเน (Prediction) หรือปรับกระบวนการให้เหมาะสม (Process optimization) หรืออาจใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต (Process control) โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวแปรหรือค่าตอบสนอง (Response; Y) จะขึ้นกับตัวแปรอิสระ K (Independent หรือ Regressor variables) เช่น $X_1, X_2, \dots, X_k$ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ สามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ สมการรีเกรสชัน ” (สมการถดถอย : Regression equation) แบบจำลองรีเกรสชันสอดคล้องกับกลุ่มข้อมูลของตัวอย่าง บางกรณีอาจทราบถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร เช่น $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k)$ เป็นต้น อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่จะไม่ทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร ดังนั้นจึงประมาณค่าของฟังก์ชันเพื่อประมาณค่า ϕ โดยมักใช้แบบจำลองของพหุนาม (Polynomial) วิธีรีเกรสชัน อาจใช้วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้วางแผน เช่น อาจนำข้อมูลจาก ปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือข้อมูลทางประวัติศาสตร์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์รีเกรสชันมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการทดลองที่มีการวางแผนไว้ อาจกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการวางแผนการทดลองเพื่อช่วยในการจำแนกว่าปัจจัยใดสำคัญ ขณะที่รีเกรสชันใช้เพื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงปริมาณของปัจจัยที่สำคัญต่อค่าตอบสนอง

3.6.1 รีเกรสชันเส้นตรงแบบง่าย (Simple linear regression)

หากต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตัวแปรเดียว x กับค่าตอบสนอง y ตัวแปร x มักเป็นตัวแปรชนิดต่อเนื่อง นั่นคือ สามารถควบคุมได้โดยผู้ทดลอง ซึ่งให้ค่าตอบสนองหรือค่าสังเกต y ที่ได้หากความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และ x เป็นเส้นตรง และค่าสังเกต y ในแต่ละระดับของ x เป็นตัวแปรอิสระ แบบจำลองที่ได้จะเป็น



$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่

β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

หากมีข้อมูล n คู่ เช่น (y_1, x_1) , (y_2, x_2) , ..., (y_n, x_n) จะสามารถประมาณค่าของพารามิเตอร์ของแบบหุ้ β_0 และ β_1 โดยวิธี Least squares ซึ่งจะได้แบบจำลอง fitted simple linear regression ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

3.6.2 รีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร (Multiple linear regression)

ในการทดลองโดยทั่วไป มักมีตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษามากกว่า 1 ตัวแปร มีลักษณะดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่

β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรงขอตัวแปร X_1

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

3.6.3 สถิติที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองนี้ โดยทั่วไปความถูกต้องของค่าจากการวัดจะทำการพิจารณาจากค่าดัชนีทางสถิติหลัก 2 ตัว ได้แก่ ค่าผิดพลาดเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) และค่าผิดพลาดรากเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction, } i} - E_{\text{Measured, } i})}{N} \times 100$$

(3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction, } i} - E_{\text{Measure, } i})^2}{N}} \times 100$$

(4)



เมื่อ $E_{\text{Measured}, i}$	คือ	ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือตำแหน่งที่ i
$E_{\text{Predicted}, i}$	คือ	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองตำแหน่งที่ i
N	คือ	จำนวนชุดของข้อมูล

การใช้ค่าสถิติ MBE และ RMSE ในการพิจารณาความถูกต้อง เนื่องจากในกรณีที่ค่า MBE เป็นศูนย์อาจจะดูเหมือนว่าข้อมูลจะถูกต้องทุกค่าเพราะเนื่องจากค่าผิดพลาดรวมเป็นศูนย์ ดังนั้น ค่า RMSE จะเป็นค่าที่ใช้ในการประกอบการพิจารณาความถูกต้อง ซึ่งค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยโดยปกติค่า RMSE จะไม่มีโอกาสมีค่าเป็นศูนย์

ในกรณีการวิเคราะห์ความแม่นยำของการนำแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนาย ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลหลักจะใช้ 3 ตัว ที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณา ได้แก่ ค่าเบี่ยงเบนของความผิดพลาดเฉลี่ย Mean bias deviation (MBD) ค่าเบี่ยงเบนรากกำลังสองเฉลี่ย Root mean square deviation (RMSD) และค่า Coefficient of Determination (R^2) ซึ่งสมการของค่าสถิติที่นำมาพิจารณาทั้ง 3 ค่า มีรูปสมการดังนี้

$$MBD = \frac{1}{\overline{E_{\text{Measure}, i}}} \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction}, i} - E_{\text{Measured}, i})}{N} \times 100 \quad (5)$$

$$RMSD = \frac{1}{\overline{E_{\text{Measured}, i}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction}, i} - E_{\text{Measure}, i})^2}{N}} \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction}, i} - \overline{E_{\text{Prediction}, i}})(E_{\text{Measured}, i} - \overline{E_{\text{Measured}, i}})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction}, i} - \overline{E_{\text{Prediction}, i}})^2][\sum_{i=1}^N (E_{\text{Measured}, i} - \overline{E_{\text{Measured}, i}})^2]}} \quad (7)$$

เมื่อ $E_{\text{Measured}, i}$	คือ	ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือตำแหน่งที่ i
$\overline{E_{\text{Measured}}}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ
$E_{\text{Predicted}, i}$	คือ	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองตำแหน่งที่ i
$\overline{E_{\text{Predicted}}}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้การทำนายโดยใช้แบบจำลอง
N	คือ	จำนวนชุดของข้อมูล



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

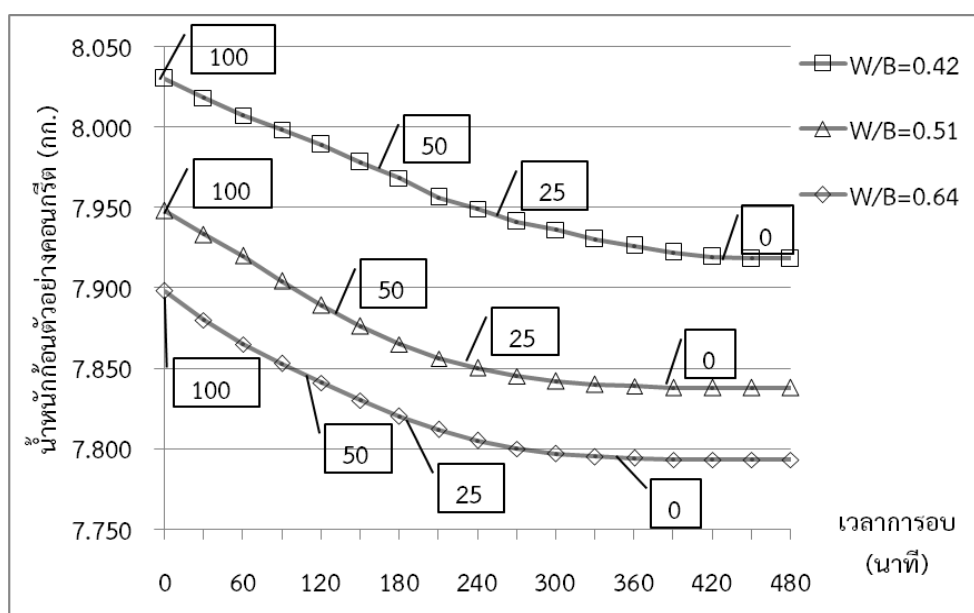
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ค่าความขึ้นที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและผลการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 4.1 ผลการทดสอบหาระดับความขึ้นในตัวอย่างคอนกรีต
- 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความขึ้นต่าง ๆ
- 4.3 ผลการทดสอบการสังเคราะห์แบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions

4.1 ผลการทดสอบหาระดับความขึ้นในตัวอย่างคอนกรีต

การทดสอบหาระดับความขึ้นในตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ที่ W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงกราฟ (Graphical analysis) ดังปรากฏในภาพประกอบ 4.1 และผลการทดสอบระยะเวลาที่ใช้ในการอบหาระดับความขึ้นภายในตัวอย่างคอนกรีตทุกๆ ส่วนผสม ค่าความขึ้นภายในตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันด้วย โดยจะกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตเปียก มีค่าความขึ้นร้อยละเท่ากับ 100 และตัวอย่างคอนกรีตที่แห้งสนิทมีค่าความขึ้นเท่ากับร้อยละ 0 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามช่วงเวลาการอบ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของ W/B จากการทดสอบเบื้องต้นของตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ก่อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ผลการทดสอบดังปรากฏตามตาราง 4.1





ภาพประกอบ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 กับระยะเวลาที่ใช้ในการอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ทั้ง 3 แบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ตาราง 4.1 ระยะเวลาการอบตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความชื้นต่างๆ

ส่วนผสม	ระยะเวลาในการอบ (นาท)	ความชื้น (ร้อยละ)
W/B 0.64	0	100
	115	50
	183	25
	351	0
W/B 0.51	0	100
	137	50
	231	25
	388	0
W/B 0.42	0	100
	167	50
	258	25
	429	0



4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นต่างๆ

4.2.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B เท่ากับ 0.64 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

จากตาราง 4.2 พบว่าการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการเฉลี่ยจากจำนวน 5 ก้อนตัวอย่างต่อชุดทดสอบ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสมเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดดีในช่วงอายุต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551)

พิจารณาการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลแสดงให้เห็นว่าปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือจากการทดลองที่ระดับความชื้นที่ร้อยละ 100 อย่างเดียว ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 ทุกส่วนผสม ดังปรากฏตามตาราง ข4 ในภาคผนวก คอนกรีต FA10-N FA20-N FA30-N FA40-N FA50-N FA60-N มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT-N หรือมีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 93 89 87 84 82 และ 82 ตามลำดับ จากนั้นจึงสามารถเพิ่มค่ากำลังสูงขึ้นได้เมื่ออายุมากขึ้น เมื่อที่อายุ 28 วัน คอนกรีต FA10-N FA20-N FA30-N FA40-N มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้มีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 104 106 111 และ 113 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA50-N และ FA60-N มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 91 และ 89 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต FA10-N FA20-N FA30-N FA40-N มีกำลังรับแรงอัดคล้ายคลึงกับอายุ 28 วัน คือมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้มีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 101 102 103 และ 105 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA50-N และ FA60-N มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 94 และ 88 ตามลำดับ ดังปรากฏภาพประกอบ ข1 ในภาคผนวก



ตาราง 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 อายุ 7 28 และ 90
ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-N	117.6	120.9	144.5	150.8	100.0	102.8	122.9	128.3	12
FA10-N	109.7	115.0	129.2	142.1	100.0	104.8	117.8	129.5	11.5
FA20-N	105.2	111.6	122.6	131.6	100.0	106.1	116.6	125.2	11.5
FA30-N	102.7	110.5	121.6	129.4	100.0	107.7	118.4	126.0	11
FA40-N	98.9	106.9	117.4	123.4	100.0	108.1	118.7	124.8	10.5
FA50-N	97.0	104.1	110.1	120.7	100.0	107.3	113.5	124.4	10.5
FA60-N	96.1	102.3	108.0	118.4	100.0	106.5	112.4	123.2	10
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
CT-N	201.6	218.7	226.1	237.6	100.0	108.5	112.2	117.9	12
FA10-N	209.4	223.0	231.4	239.9	100.0	106.5	110.6	114.6	11.5
FA20-N	213.5	223.7	232.3	241.7	100.0	104.8	108.8	113.2	11.5
FA30-N	223.6	232.2	237.0	253.6	100.0	103.9	106.0	113.4	11
FA40-N	227.3	238.5	246.3	255.6	100.0	104.9	108.3	112.4	10.5
FA50-N	184.2	200.9	209.5	218.5	100.0	109.1	113.7	118.6	10.5
FA60-N	178.9	191.2	199.9	208.1	100.0	106.9	111.7	116.3	10
	อายุ 90 วัน				อายุ 90 วัน				
CT-N	237.0	249.4	253.0	257.5	100.0	105.3	106.8	108.7	12
FA10-N	240.0	253.0	259.6	263.1	100.0	105.4	108.2	109.6	11.5
FA20-N	242.3	253.4	263.0	269.4	100.0	104.6	108.5	111.2	11.5
FA30-N	244.7	259.6	270.8	274.4	100.0	106.1	110.7	112.1	11
FA40-N	249.1	269.5	275.6	278.8	100.0	108.2	110.6	111.9	10.5
FA50-N	222.9	237.1	245.0	256.9	100.0	106.4	109.9	115.2	10.5
FA60-N	209.3	218.3	227.0	246.9	100.0	104.3	108.5	118.0	10

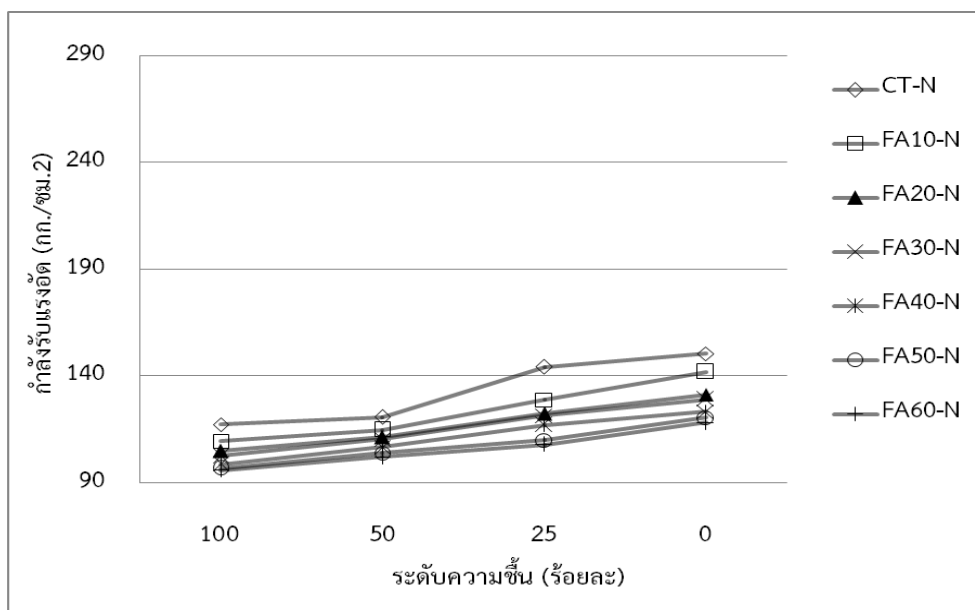


กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 117.5 120.9 144.5 และ 150.8 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 109.7 115.0 129.2 และ 142.1 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 105.2 111.6 122.6 และ 131.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 102.7 110.5 121.6 และ 129.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 98.9 106.9 117.4 และ 123.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 97.0 104.1 110.1 และ 120.7 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 96.1 102.3 108.0 และ 118.4 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.2

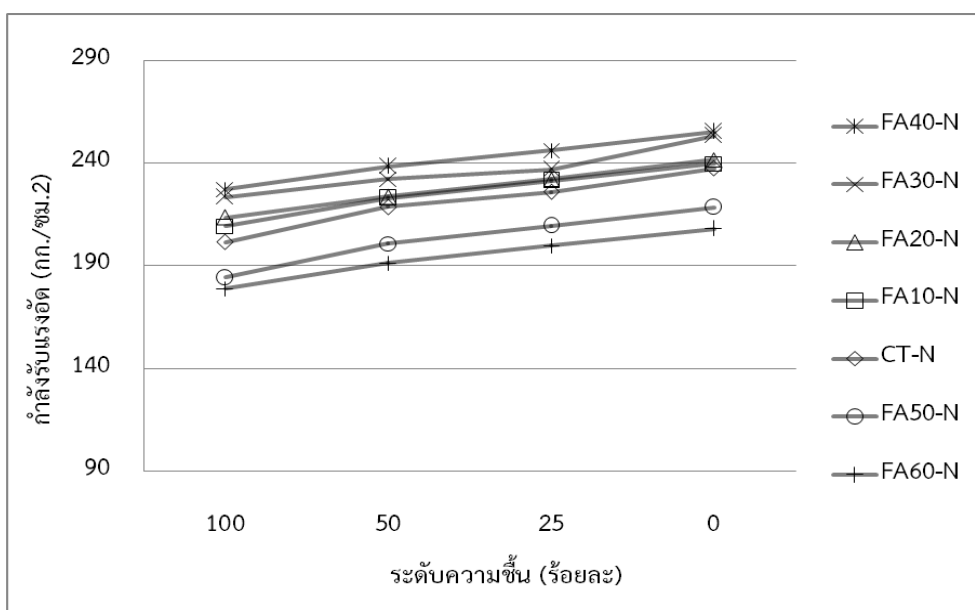
ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน กับความขึ้นที่ระดับต่างๆ ดังภาพประกอบ 4.3 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 201.5 218.6 226.1 และ 237.6 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 209.3 222.9 231.4 และ 239.8 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 213.4 223.7 232.2 และ 241.7 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 223.5 232.2 237.0 และ 253.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 227.3 238.5 246.2 และ 255.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 184.2 200.8 209.4 และ 218.5 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 178.9 191.2 199.9 และ 208.1 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ

สำหรับภาพประกอบ 4.4 ได้แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 237 249.4 253 และ 257.5 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 239.9 253.0 259.6 และ 263.0 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 242.3 253.0 263.0 และ 269.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 244.7 259.6 270.7 และ 274.3 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 249.1 269.5 275.5 และ 278.8 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 222.9 237.0 245.0 และ 256.8 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 209.3 218.2 227.0 และ 246.9 กก./ชม.² ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ



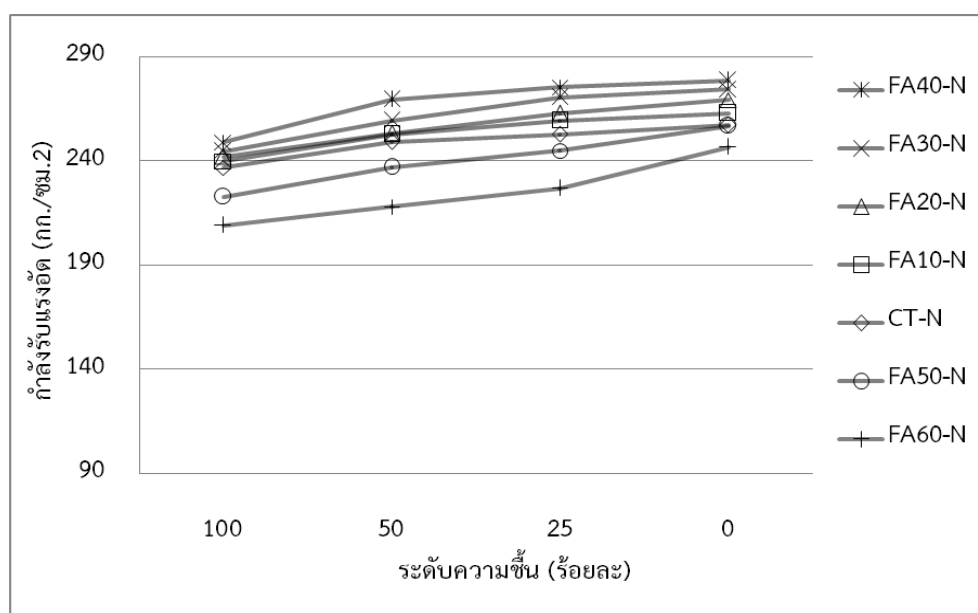


ภาพประกอบ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ



ภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ





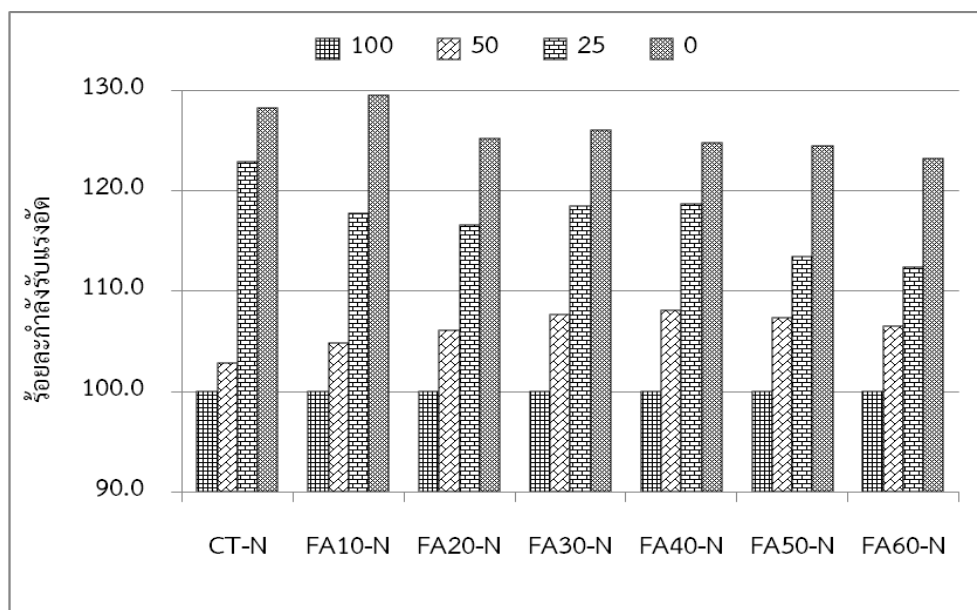
ภาพประกอบ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วันความชื้นที่ระดับต่างๆ

4.2.2 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

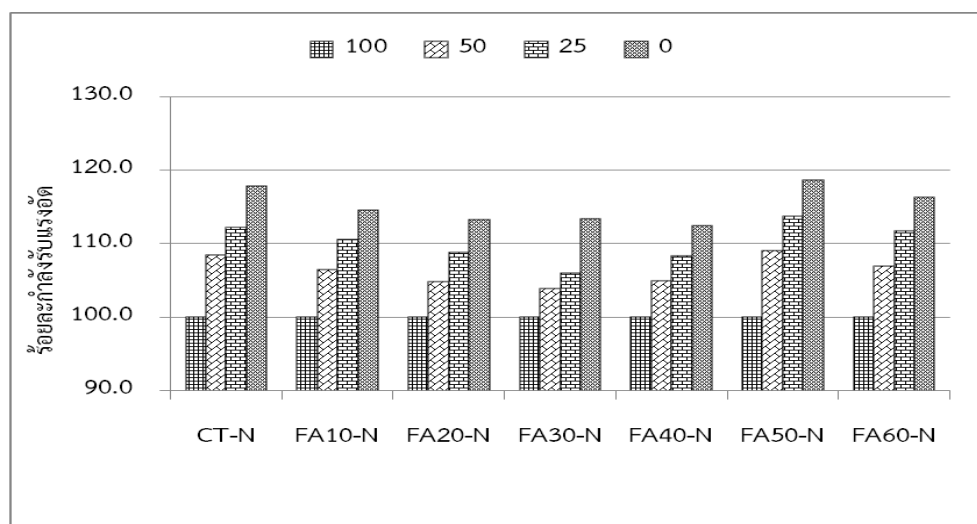
ค่าความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันด้วย ดังภาพประกอบ 4.5 – 4.7 และได้แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีตควบคุม จะมีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดทุกระดับความชื้น คือ 102.8 122.9 และ 128.3 ที่ความชื้นร้อยละ 50 25 และ 0 ตามลำดับ ส่วนปอซโซลานคอนกรีตจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 10 - 60 จะมีแนวโน้มลดลงตามลำดับการแทนที่ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น และภาพประกอบ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน พบว่าปอซโซลานคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 จะมีค่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่ความชื้น 50 25 และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น แต่ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 50 - 60 จะร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานมีปริมาณเกินความเหมาะสมจึงทำให้ร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกระดับความชื้น ภาพประกอบ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วัน พบว่าร้อยละค่ากำลังรับแรงอัดของปอซโซลานคอนกรีตที่แทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมจะคล้ายคลึงกับร้อยละกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน คือ การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 เมื่อความชื้นภายในก้อนตัวอย่างที่ร้อยละ 50 25 และ 0 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ที่ร้อยละ 50 และ 60 จะพบว่ามีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด หรือประมาณร้อยละ 85 ของคอนกรีตควบคุม กล่าวได้ว่าในช่วงอายุต้น คือ 7 วัน ความชื้น



ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยชัดเจน ในทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน เมื่ออายุ 28 วัน ความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตค่อนข้างเด่นชัด และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 ความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย ส่วนอายุ 90 วัน ความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย แต่ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงความชื้นจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมีมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่น้อย

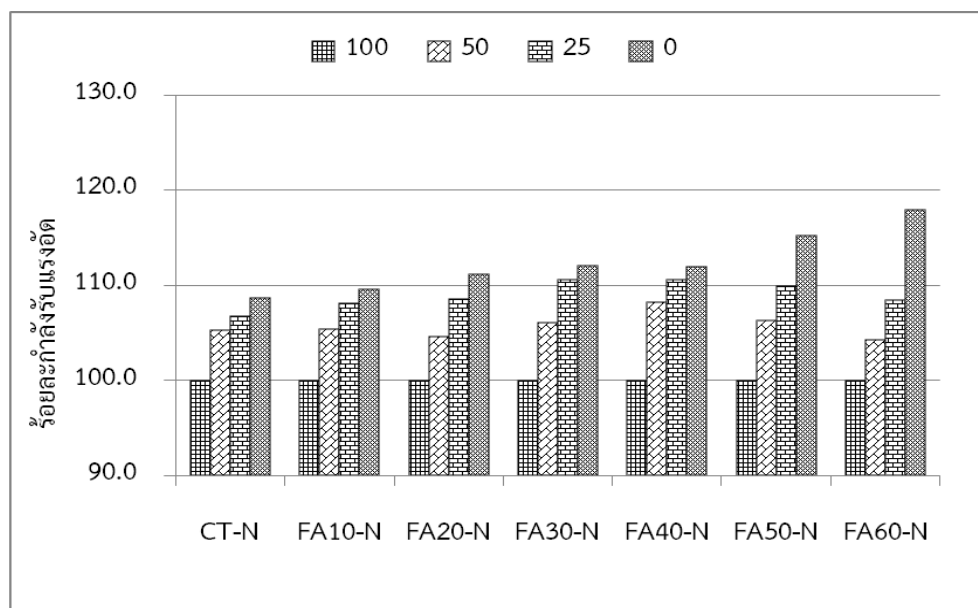


ภาพประกอบ 4.5 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ



ภาพประกอบ 4.6 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ





ภาพประกอบ 4.7 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

4.2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B เท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

พิจารณาการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลแสดงให้เห็นว่าปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 ทุกส่วนผสม ดังปรากฏตามตาราง ข5 ในภาคผนวก พบว่า คอนกรีต FA10-N2 FA20-N2 FA30-N2 FA40-N2 FA50-N2 FA60-N2 มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT-N2 หรือมีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 92 90 83 82 80 และ 77 ตามลำดับ จากนั้นจึงสามารถเพิ่มค่ากำลังสูงขึ้นได้เมื่ออายุมากขึ้น เมื่อที่อายุ 28 วัน คอนกรีต FA10-N2 FA20-N2 FA30-N2 FA40-N2 มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้มี ร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 104 108 114 และ 116 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA50-N2 และ FA60-N2 มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 93 และ 92 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต FA10-N2 FA20-N2 FA30-N2 FA40-N2 มีกำลังรับแรงอัดคล้ายคลึงกับอายุ 28 วัน คือมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้มีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 103 105 108 และ 110 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA50-N2 และ FA60-N2 มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 94 และ 90 ตามลำดับ ดังปรากฏภาพประกอบ ข2 ในภาคผนวก

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 7 วัน ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความชื้นที่ระดับต่างๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสมเนื่องจากปฏิกิริยา



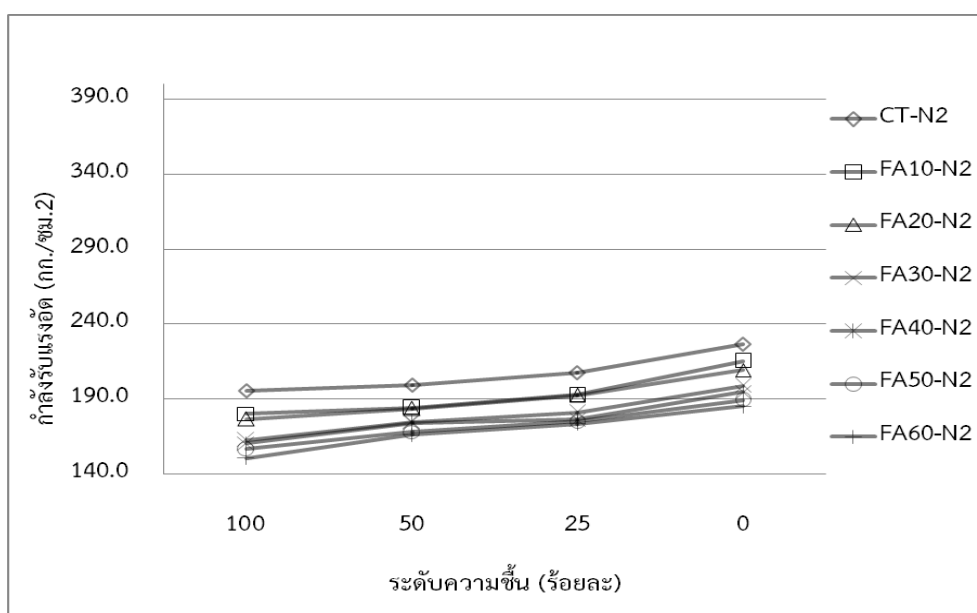
ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดดีในช่วงอายุต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 195.5 199.0 207.0 และ 226.4 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 180.2 184.3 192.6 และ 215.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 176.7 183.5 192.5 และ 209.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 162.7 174.6 181.0 และ 198.8 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 160.6 174.0 176.3 และ 194.7 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 156.5 168.1 175.2 และ 189.3 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 150.8 166.1 173.6 และ 185.3 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 28 วัน ภาพประกอบ 4.9 และ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน กับความชื้นที่ระดับต่างๆ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ คือมีค่าเท่ากับ 285.2 298.3 307.3 และ 322.7 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 295.5 309.4 317.0 และ 330.8 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 308.5 315.1 328.4 และ 336.1 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 324.1 334.3 341.1 และ 353.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 329.8 337.8 344.9 และ 356.2 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 266.1 273.6 280.9 และ 287.0 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 262.5 269.8 276.8 และ 283.1 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 325.8 332.9 340.3 และ 358.5 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 334.5 345.1 348.8 และ 362.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 343.2 355.4 361.1 และ 373.9 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 353.1 359.7 365.5 และ 383.0 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 359.3 363.8 371.0 และ 390.4 กก./ชม.² แต่เมื่อแทนที่ถึงร้อยละ 50 และ 60 กำลังรับแรงอัดกลับลดต่ำลงอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 70 - 80 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่าน (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547) ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 306.8 318.6 327.0 และ 341.6 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 294.1 312.5 324.3 และ 339.2 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ



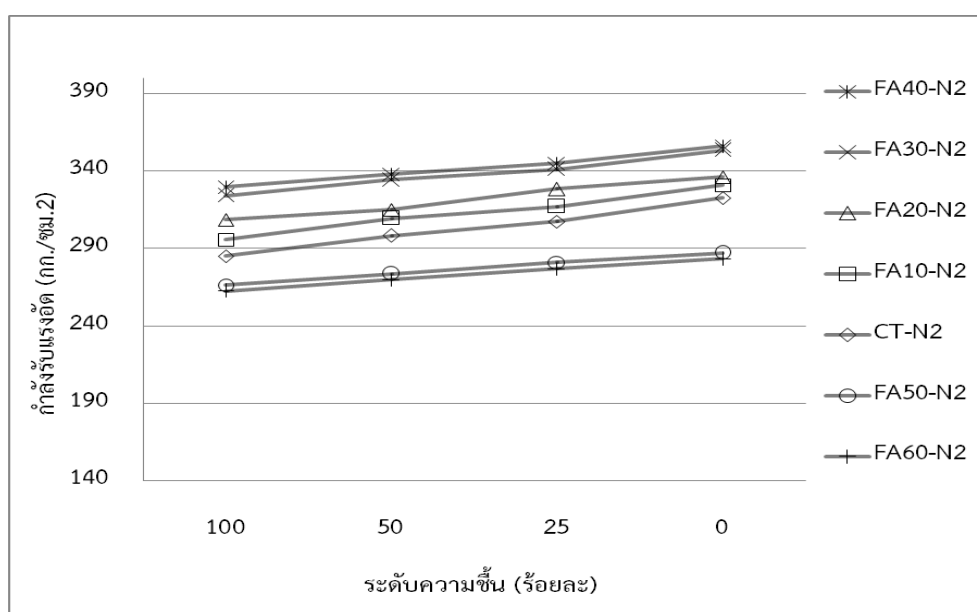
ตาราง 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 อายุ 7 28 และ 90
ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-N2	195.5	199.0	207.8	226.4	100.0	101.8	106.3	115.8	12
FA10-N2	180.3	184.3	192.7	215.4	100.0	102.3	106.9	119.5	11.5
FA20-N2	176.8	183.5	192.6	209.4	100.0	103.8	108.9	118.5	11.5
FA30-N2	162.8	174.7	181.0	198.8	100.0	107.3	111.2	122.2	11
FA40-N2	160.6	174.1	176.3	194.7	100.0	108.4	109.8	121.2	10.5
FA50-N2	156.6	168.2	175.2	189.3	100.0	107.4	111.9	120.9	10.5
FA60-N2	150.8	166.1	173.6	185.4	100.0	110.2	115.1	122.9	10.5
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
CT-N2	285.2	298.4	307.3	322.7	100.0	104.6	107.8	113.1	12
FA10-N2	295.6	309.5	317.1	330.8	100.0	104.7	107.3	111.9	11.5
FA20-N2	308.5	315.1	328.4	336.2	100.0	102.1	106.5	109.0	11.5
FA30-N2	324.2	334.3	341.1	353.4	100.0	103.1	105.2	109.0	11
FA40-N2	329.8	337.9	344.9	356.2	100.0	102.5	104.6	108.0	10.5
FA50-N2	266.2	273.7	280.9	287.1	100.0	102.8	105.5	107.9	10.5
FA60-N2	262.5	269.9	276.9	283.2	100.0	102.8	105.5	107.9	10.5
CT-N2	325.9	333.0	340.3	358.5	100.0	102.2	104.4	110.0	12
FA10-N2	334.6	345.1	348.8	362.6	100.0	103.2	104.3	108.4	11.5
FA20-N2	343.2	355.4	361.2	374.0	100.0	103.6	105.2	109.0	11.5
FA30-N2	353.1	359.8	365.5	383.0	100.0	101.9	103.5	108.5	11
FA40-N2	359.3	363.8	371.1	390.5	100.0	101.2	103.3	108.7	10.5
FA50-N2	306.8	318.7	327.0	341.6	100.0	103.9	106.6	111.3	10.5
FA60-N2	294.2	312.6	324.3	339.3	100.0	106.3	110.3	115.3	10.5



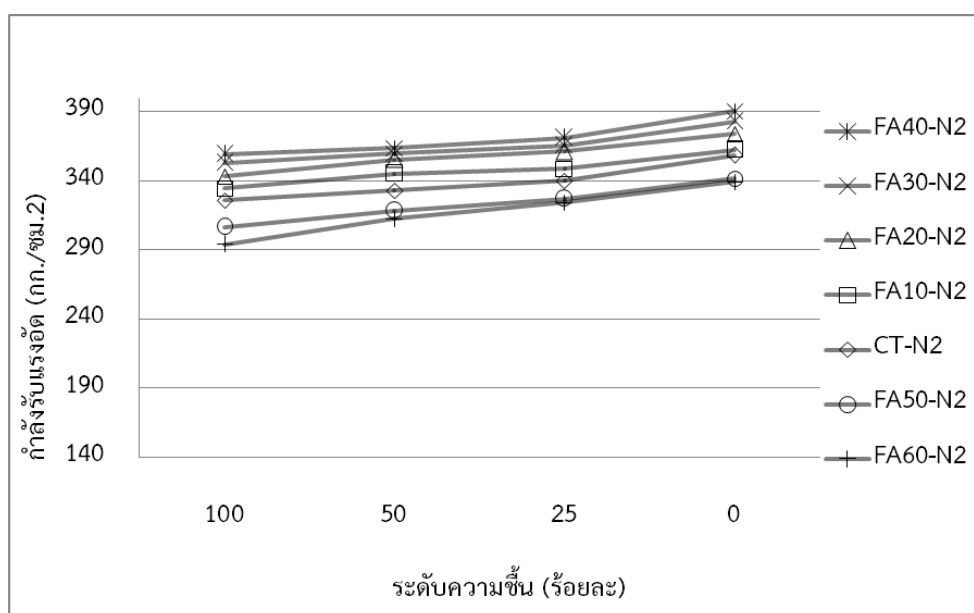


ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 7 วัน



ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 28 วัน





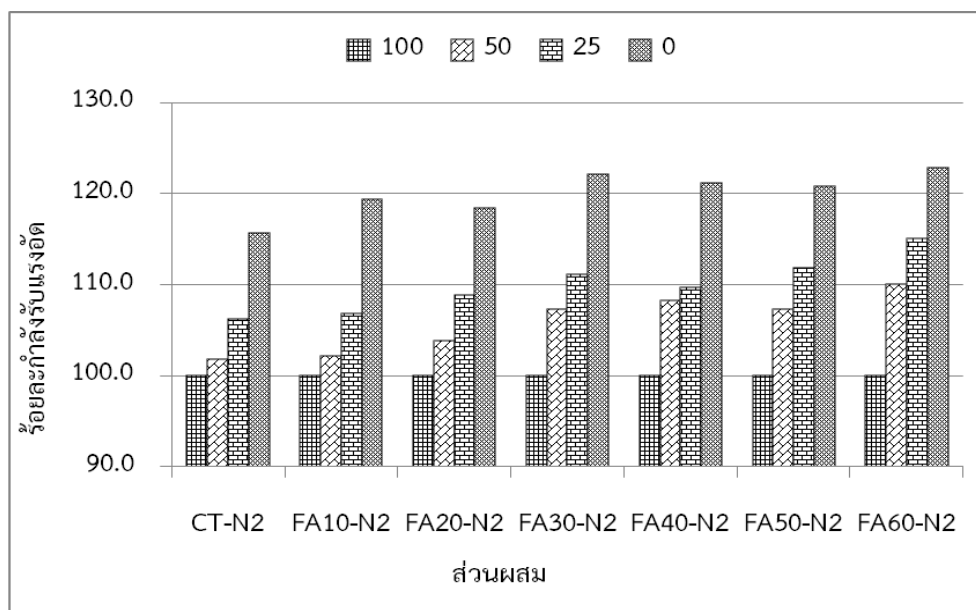
ภาพประกอบ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.51 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 90 วัน

4.2.4 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

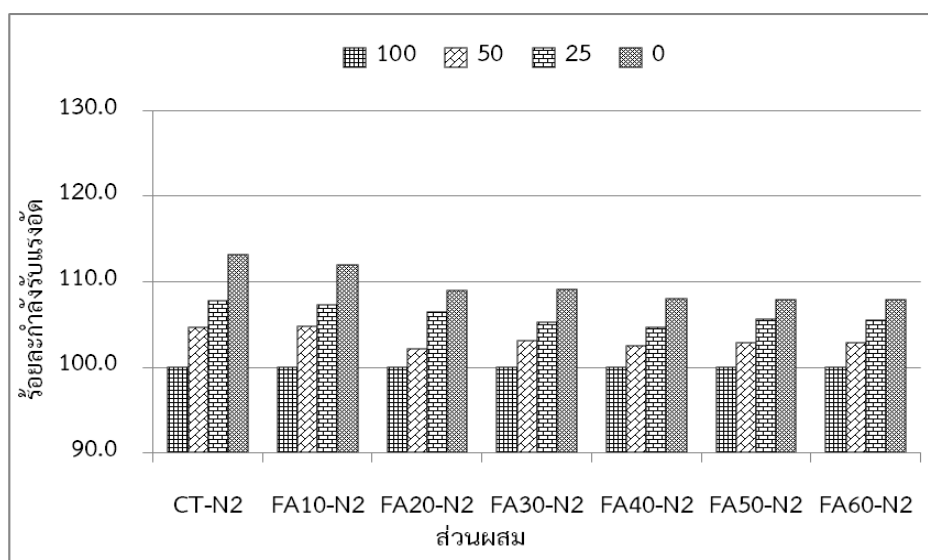
ค่าความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันด้วย ดังภาพประกอบ 4.11 – 4.13 และได้แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีตควบคุมจะมีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดทุกระดับความชื้น คือ 100 101.8 106.3 และ 115.8 ที่ความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.11 ส่วนปอซโซลานคอนกรีตจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 10 - 60 จะมีแนวโน้มลดลงตามลำดับการแทนที่ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น และภาพประกอบ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 28 วัน พบว่าปอซโซลานคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 จะมีค่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่ความชื้น 50 25 และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น แต่ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 50 - 60 จะร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานมีปริมาณเกินความเหมาะสมจึงทำให้ร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกระดับความชื้น ภาพประกอบ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 90 วัน พบว่าร้อยละค่ากำลังรับแรงอัดของปอซโซลานคอนกรีตที่แทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมจะคล้ายคลึงกับร้อยละกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน คือ การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 เมื่อความชื้นภายในก้อนตัวอย่างที่ร้อยละ 50 25 และ 0 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ที่ร้อยละ 50 และ 60 จะพบว่ามีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด หรือประมาณร้อยละ 90 ของคอนกรีต



ควบคุม กล่าวได้ว่าในช่วงอายุต้น คือ 7 วัน ความชื้นส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยชัดเจน ในทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน เมื่ออายุ 28 วัน ความชื้นมีผลค่อนข้างน้อยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่วนอายุ 90 วัน ความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย แต่ตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงความชื้นจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมีมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่น้อย

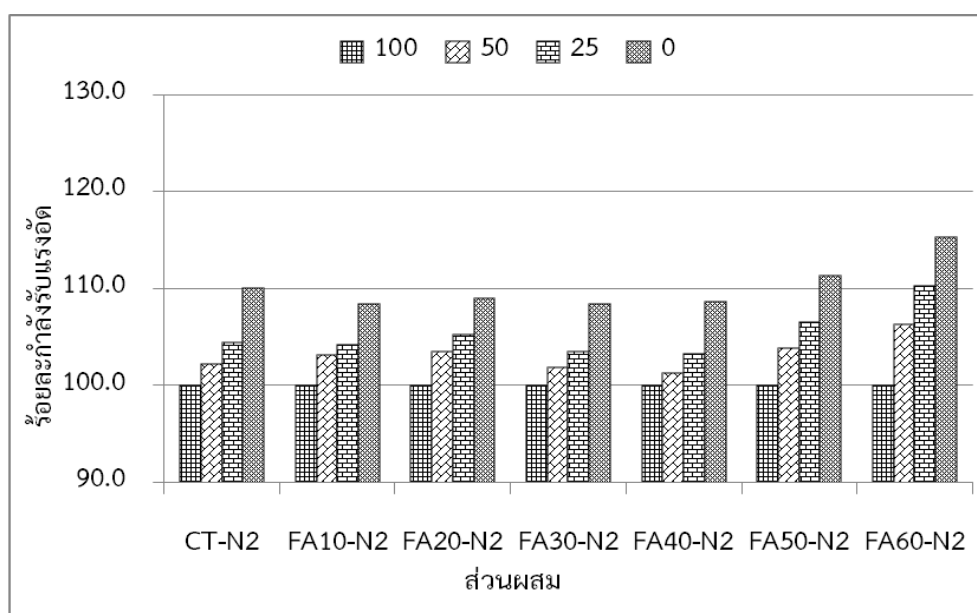


ภาพประกอบ 4.11 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ



ภาพประกอบ 4.12 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ





ภาพประกอบ 4.13 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

4.2.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B เท่ากับ 0.42 ความชื้นที่ระดับต่างๆ ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

พิจารณาการใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลแสดงให้เห็นว่าปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 ทุกส่วนผสม ดังปรากฏตามตาราง ข6 ในภาคผนวก คอนกรีต FA10-H FA20-H FA30-H FA40-H FA50-H FA60-H มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่า คอนกรีตควบคุม CT-H หรือมีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 96 95 90 88 84 และ 78 ตามลำดับ จากนั้นจึงสามารถเพิ่มค่ากำลังสูงขึ้นได้เมื่ออายุมากขึ้น เมื่อที่อายุ 28 วัน คอนกรีต FA10-H FA20-H FA30-H FA40-H มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้มีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 101 102 103 และ 105 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA50-H และ FA60-H มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 90 และ 87 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต FA10-H FA20-H FA30-H FA40-H มีกำลังรับแรงอัดคล้ายคลึงกับอายุ 28 วัน คือมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ คอนกรีตควบคุมได้มีร้อยละกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 103 105 105 และ 106 ตามลำดับ ส่วน คอนกรีต FA50-H และ FA60-H มีร้อยละกำลังรับแรงอัดลดลงเหลือ 90 และ 87 ตามลำดับ ดัง ปรากฏภาพประกอบ ข3 ในภาคผนวก

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมกำลังสูง W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน ภาพประกอบ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับความชื้นที่ระดับต่างๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกส่วนผสมเนื่องจาก ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดดีในช่วงอายุต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 268.5 273.0



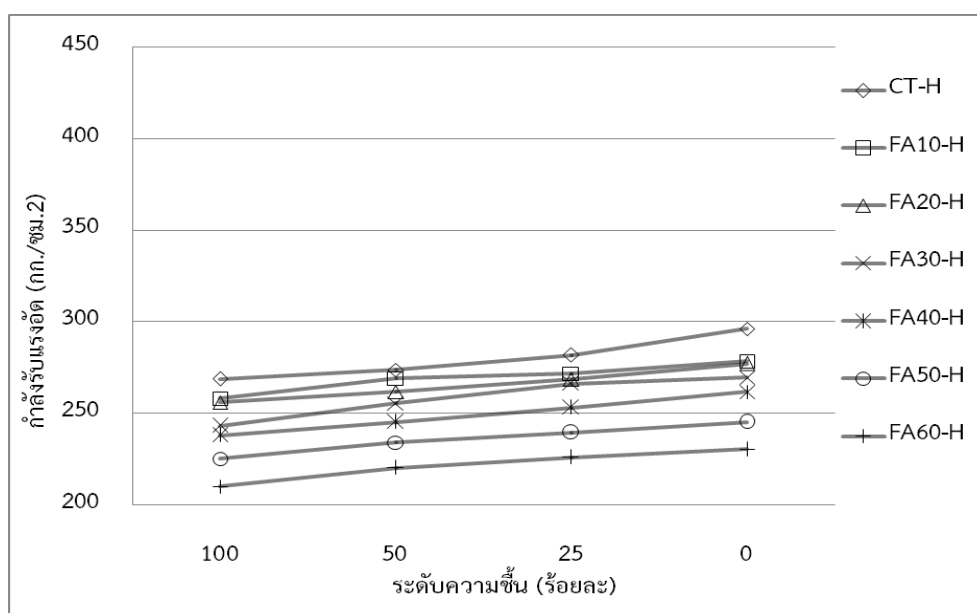
281.6 และ 296.1 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 257.8 268.9 271.5 และ 278.2 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 255.8 261.5 268.3 และ 277.0 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 242.9 255.3 265.9 และ 269.3 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 237.7 245.1 253.0 และ 261.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 225.0 233.9 239.4 และ 245.0 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 209.9 220.0 225.9 และ 230.1 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน ภาพประกอบ 4.15 และ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน กับความชื้นที่ระดับต่างๆ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ คือมีค่าเท่ากับ 363.6 368.3 372.2 และ 387.3 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 368.2 370.3 376.4 และ 392.5 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 371.8, 376.4, 388.3 และ 397.3 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 375.9 380.0 388.9 และ 401.6 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 382.0 390.5 397.9 และ 413.7 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 327.6 335.1 344.4 และ 354.1 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 316.1 321.1 333.5 และ 337.9 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 397.2 413.5 419.7 และ 431.0 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 407.5 416.4 429.1 และ 432.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 415.9 420.1 431.1 และ 437.1 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 416.9 424.7 435.1 และ 441.4 กก./ชม.² ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 420.8 429.4 436.7 และ 446.9 กก./ชม.² แต่เมื่อแทนที่ถึงร้อยละ 50 และ 60 กำลังรับแรงอัดกลับลดต่ำลงอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 70 - 80 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ชัย จาตรุพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2536) ที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 358.7 370.4 374.6 และ 378.9 กก./ชม.² และที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 346.1 360.9 366.9 และ 369.3 กก./ชม.² ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ



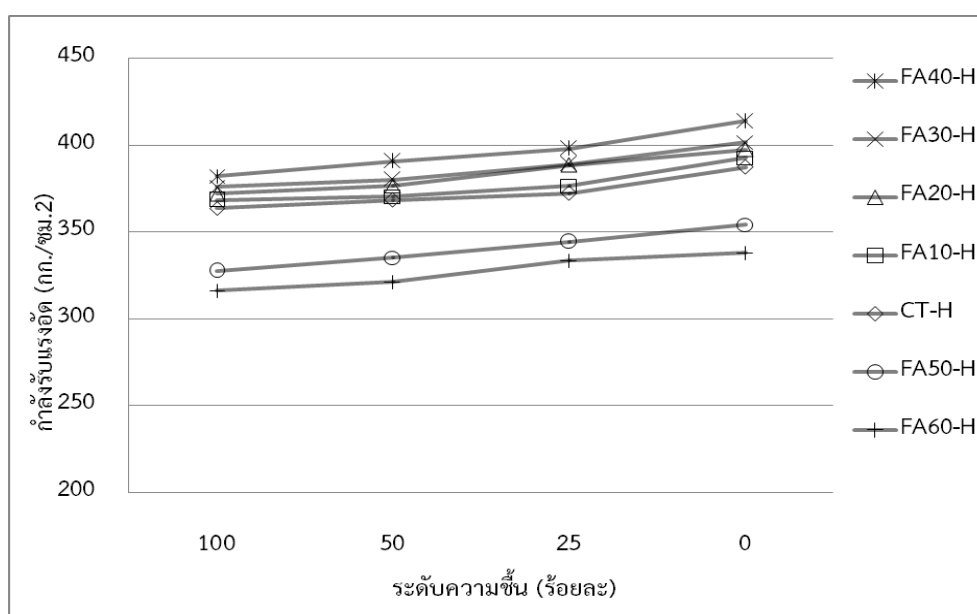
ตาราง 4.4 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 อายุ 7 28 และ 90
ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	268.6	273.5	281.7	296.1	100.0	101.8	104.9	110.3	12
FA10-H	257.8	268.9	271.5	278.2	100.0	104.3	105.3	107.9	11.5
FA20-H	255.9	261.6	268.3	277.1	100.0	102.2	104.9	108.3	11
FA30-H	243.0	255.4	265.9	269.4	100.0	105.1	109.4	110.9	11
FA40-H	237.7	245.1	253.1	261.6	100.0	103.1	106.4	110.0	10.5
FA50-H	225.0	234.0	239.5	245.0	100.0	104.0	106.4	108.9	10
FA60-H	209.9	220.1	225.9	230.2	100.0	104.8	107.6	109.6	10
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	363.6	368.4	372.2	387.4	100.0	101.3	102.4	106.5	12
FA10-H	368.3	370.3	376.5	392.5	100.0	100.6	102.2	106.6	11.5
FA20-H	371.8	376.4	388.3	397.4	100.0	101.2	104.4	106.9	11
FA30-H	375.9	380.0	389.0	401.6	100.0	101.1	103.5	106.8	11
FA40-H	382.1	390.5	398.0	413.7	100.0	102.2	104.2	108.3	10.5
FA50-H	327.6	335.1	344.4	354.1	100.0	102.3	105.1	108.1	10
FA60-H	316.1	321.2	333.5	337.9	100.0	101.6	105.5	106.9	10
	อายุ 90 วัน				อายุ 90 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	397.3	413.5	419.7	431.1	100.0	104.1	105.7	108.5	12
FA10-H	407.6	416.4	429.2	432.4	100.0	102.2	105.3	106.1	11.5
FA20-H	416.0	420.1	431.1	437.1	100.0	101.0	103.6	105.1	11
FA30-H	416.9	424.8	435.2	441.5	100.0	101.9	104.4	105.9	11
FA40-H	420.8	429.5	436.8	447.0	100.0	102.0	103.8	106.2	10.5
FA50-H	358.7	370.4	374.7	378.9	100.0	103.3	104.4	105.6	10
FA60-H	346.2	361.0	366.9	369.4	100.0	104.3	106.0	106.7	10



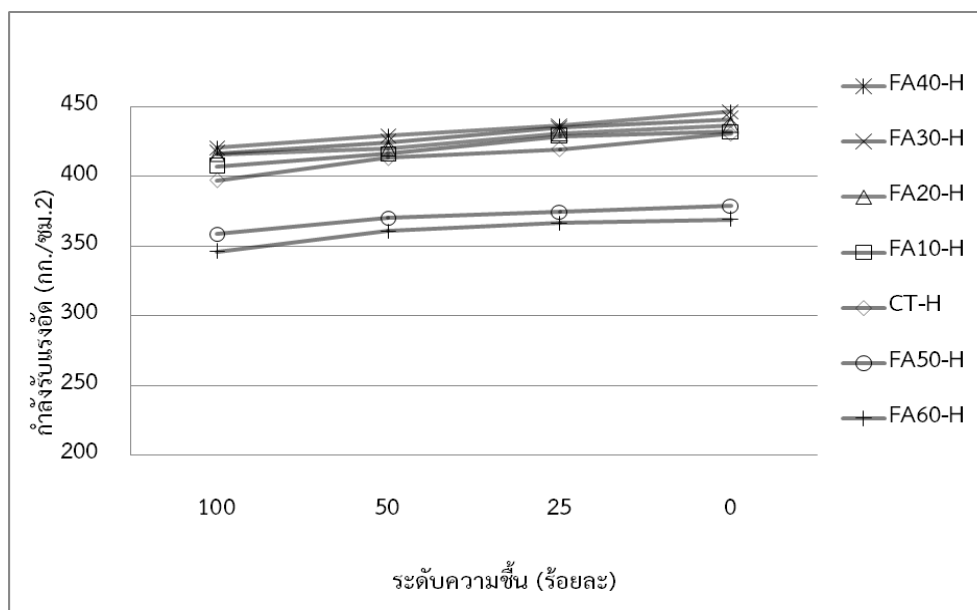


ภาพประกอบ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ



ภาพประกอบ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน ความชื้นที่ระดับต่างๆ





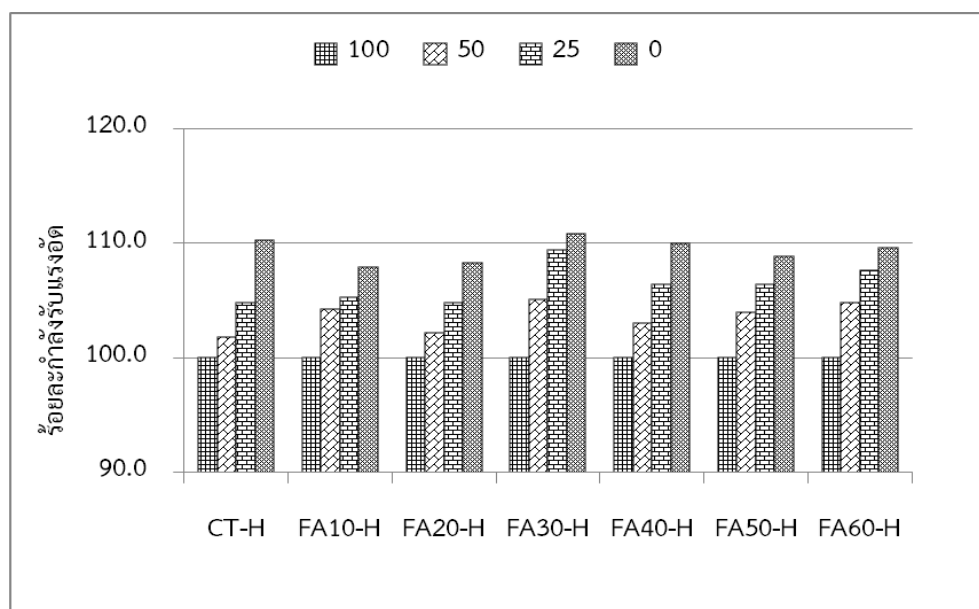
ภาพประกอบ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินของการแทนที่ร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วันความชื้นที่ระดับต่างๆ

4.2.6 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

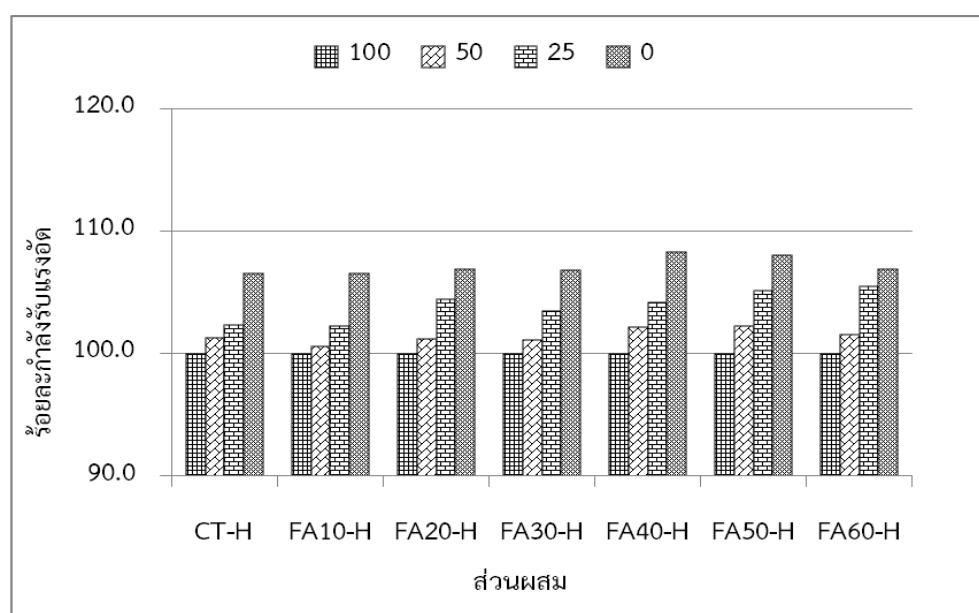
ค่าความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันก็จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันด้วย ดังภาพประกอบ 4.17 – 4.19 และได้แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีตควบคุม จะมีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่มากที่สุดทุกระดับความชื้น คือ 100 101.8 104.9 และ 110.3 ที่ความชื้นร้อยละ 100 50 25 และ 0 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.17 ส่วนปอชโซลานคอนกรีตจากการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่ร้อยละ 10 - 60 จะมีแนวโน้มลดลงตามลำดับการแทนที่ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุต้น และภาพประกอบ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน พบว่าปอชโซลานคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 จะมีค่าร้อยละของกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่ความชื้น 50 25 และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานที่เกิดขึ้น แต่ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 50 - 60 จะร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอชโซลานมีปริมาณเกินความเหมาะสมจึงทำให้ร้อยละกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทุกระดับความชื้น ภาพประกอบ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วัน พบว่าร้อยละค่ากำลังรับแรงอัดของปอชโซลานคอนกรีตที่แทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมจะคล้ายคลึงกับร้อยละกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน คือ การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 10 - 40 เมื่อความชื้นภายในก้อนตัวอย่างที่ร้อยละ 50 25 และ 0 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ที่ร้อยละ 50 และ 60 จะพบว่ามีค่าร้อยละกำลังรับแรงอัดที่ต่ำที่สุด หรือประมาณร้อยละ 95 ของ



คอนกรีตควบคุม กล่าวได้ว่าในช่วงอายุต้น คือ 7 วัน ความชื้นส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยชัดเจน ในทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน เมื่ออายุ 28 วัน คอนกรีตกำลังสูงความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตค่อนข้างน้อยทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่วนอายุ 90 วัน คอนกรีตกำลังสูงความชื้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตค่อนข้างน้อยทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน

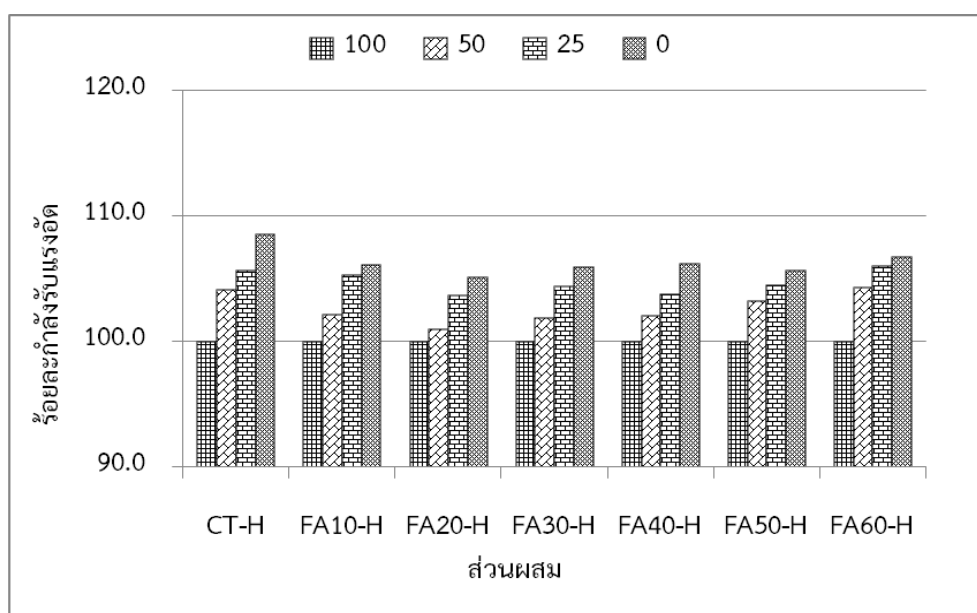


ภาพประกอบ 4.17 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ



ภาพประกอบ 4.18 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ





ภาพประกอบ 4.19 ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธีการ Regressions

การสังเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Regressions ได้รับความนิยมอย่างมากในอดีต สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์สมการเชิงเส้นชนิดหลายตัวแปรเพื่อใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่ระดับความชื้นต่างๆ ซึ่งรูปแบบของสมการที่ใช้แสดงดังสมการที่ (4.1)

$$CS = a_0 + a_1(Rp) + a_2(Ms) + a_3(W/B) \quad (4.1)$$

โดยที่

- CS คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
- RP คือ ปริมาณการแทนที่
- Ms คือ ความชื้น
- W/B คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
- AC คือ อายุการทดสอบ

จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนผสมและผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน จำนวน 84 ตัวอย่าง โดยแยกตามชนิดของระดับความชื้น ร้อยละแทนที่ของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนของวัสดุประสาน ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข ป้อนเข้าสู่โปรแกรม SPSS v.17 เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ โดยใช้วิธี Linear regressions ซึ่งผลการวิเคราะห์จะทำให้ได้แบบจำลองเชิงเส้นหลายตัวแปรหลายตัวแปรแสดงดังสมการที่ (4.2)

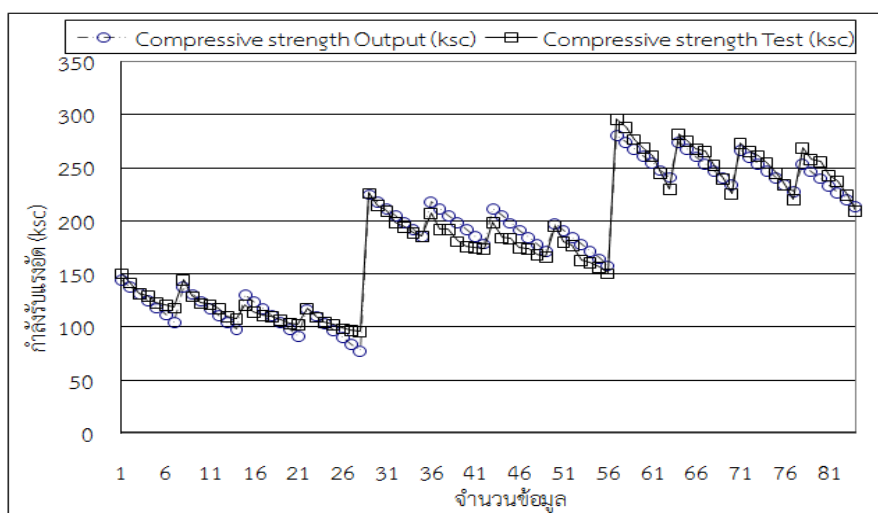


4.3.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน

$$CS_7 = 541.061 - 0.660(Rp) - 0.275(Ms) - 619.298(W/B) \quad (4.2)$$

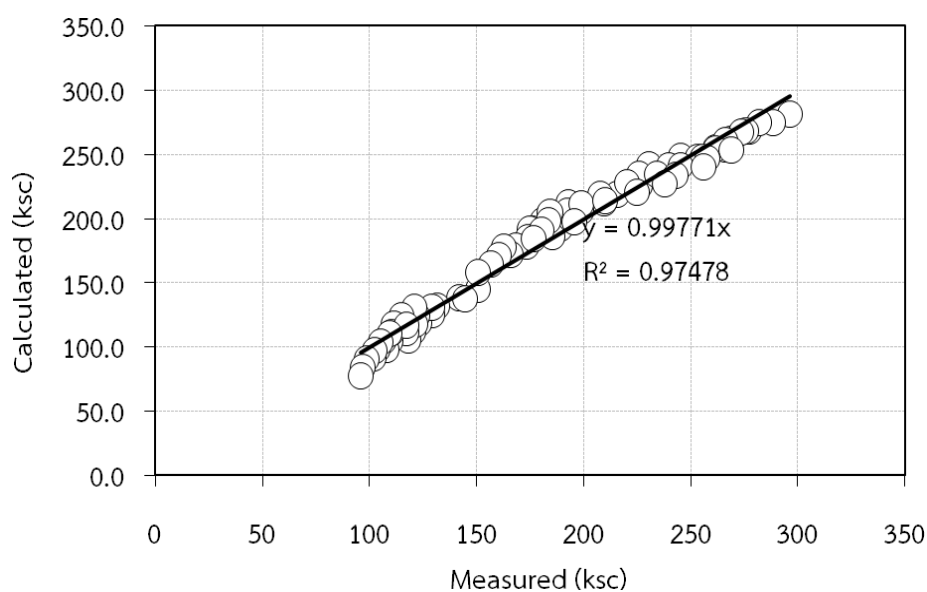
เมื่อ CS_7 คือ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 7 วัน

ได้รูปแบบสมการของแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Regressions ในการทดสอบ ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของแบบจำลองทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข ลงในสมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ภาพประกอบ 4.20 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดจากสมการทางคณิตศาสตร์และค่าจากการทดลองโดยเรียงตามระดับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของเถ้าถ่านหินกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน พบว่าค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และยังให้ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดอยู่ในระดับที่ดีมาก และภาพประกอบ 4.20 – 4.21 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9748 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตาราง 4.5 พบว่า ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันของข้อมูลที่มีค่า MBD เท่ากับร้อยละ 4.823 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 12.673 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.998 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ทั่วไปพบว่าเป็นค่าอยู่เกณฑ์ระดับที่ดีมาก คือ มีค่า MBD น้อยกว่าร้อยละ 10 และมีค่า R^2 สูงกว่า 0.95 และเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติต่าง ๆ แล้วพบว่าแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions โดยใช้ฟังก์ชันสมการเชิงเส้น linear regressions ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วันได้ดี



ภาพประกอบ 4.20 ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยแบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน





ภาพประกอบ 4.21 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน

ตาราง 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 วัน

Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	4.823
RMSD (%)	12.673
R^2	0.998



4.3.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน

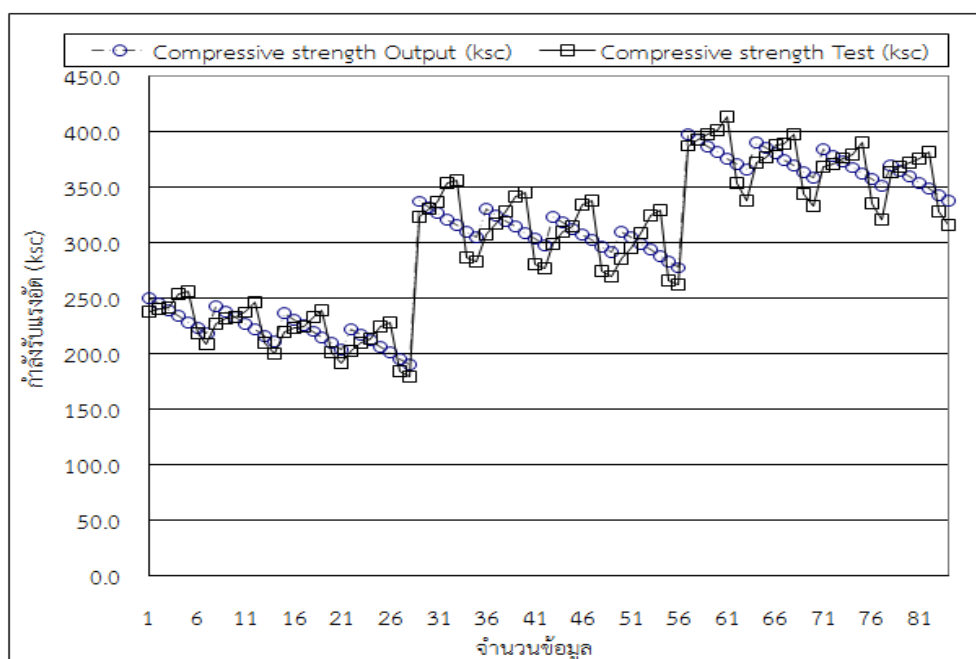
$$CS_{28} = 679.513 - 0.538(R_p) - 0.275(M_s) - 671.02(W/B)$$

เมื่อ CS_{28} คือ กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 28 วัน

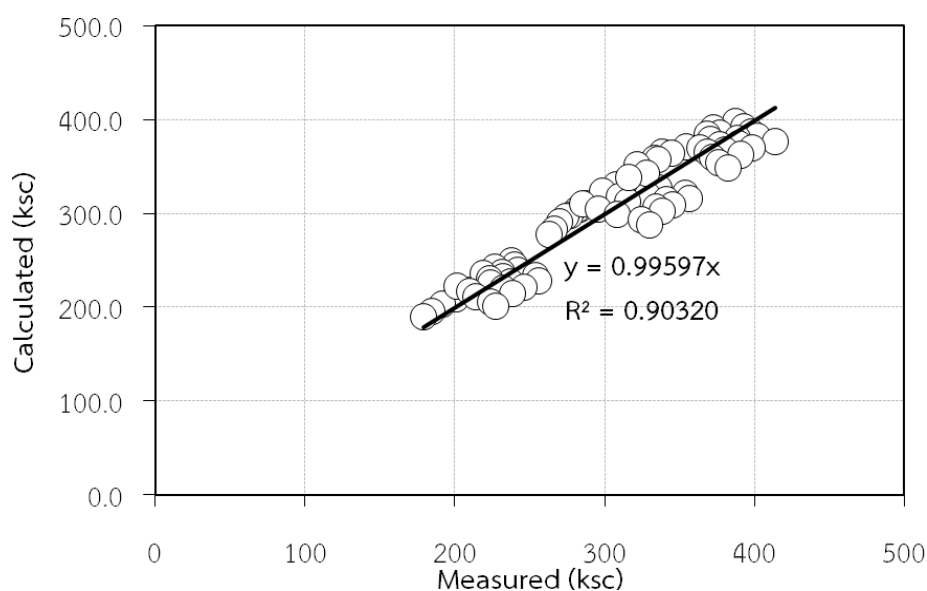
ได้รูปแบบสมการของแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Regressions ในการทดสอบ ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของแบบจำลองทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก ลงในสมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง

สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ภาพประกอบ 4.22 แสดงผลการทดสอบ ค่ากำลังรับแรงอัดจากสมการทางคณิตศาสตร์และค่าจากการทดลองโดยเรียงตามระดับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของเถ้าถ่านหินกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากคำนวณมีค่าที่อยู่ในระดับดี และยังให้ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดอยู่ในระดับที่ดีเช่นกัน และภาพประกอบ 4.23 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9032 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตาราง 4.6 พบว่า ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของข้อมูลที่มีค่า MBD เท่ากับร้อยละ 4.953 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 13.640 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9973 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ทั่วไปพบว่าเป็นค่าอยู่เกณฑ์ระดับที่ดี คือ มีค่า MBD น้อยกว่าร้อยละ 10 และมีค่า R^2 สูงกว่า 0.95 และเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติต่าง ๆ แล้วพบว่า แบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions โดยใช้ฟังก์ชันสมการเชิงเส้น linear regressions ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันได้ดี





ภาพประกอบ 4.22 ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินโดย
แบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51
และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน



ภาพประกอบ 4.23 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการ
ทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ
0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน



ตาราง 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 28 วัน

Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	4.953
RMSD (%)	13.640
R^2	0.9973

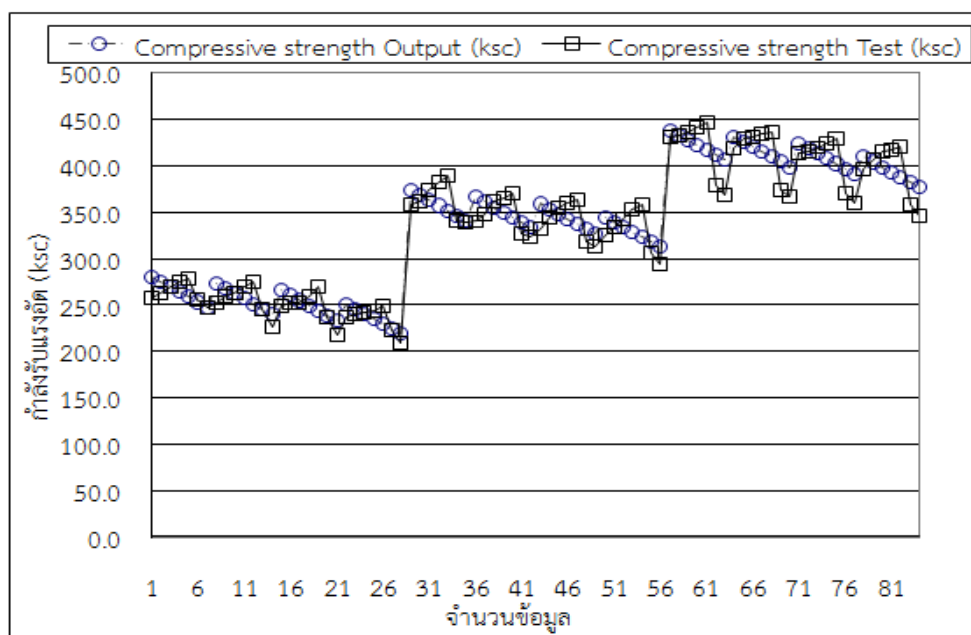
4.3.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน

$$CS_{90} = 738.243 - 0.531(R_p) - 0.284(M_s) - 716.13(W/B)$$

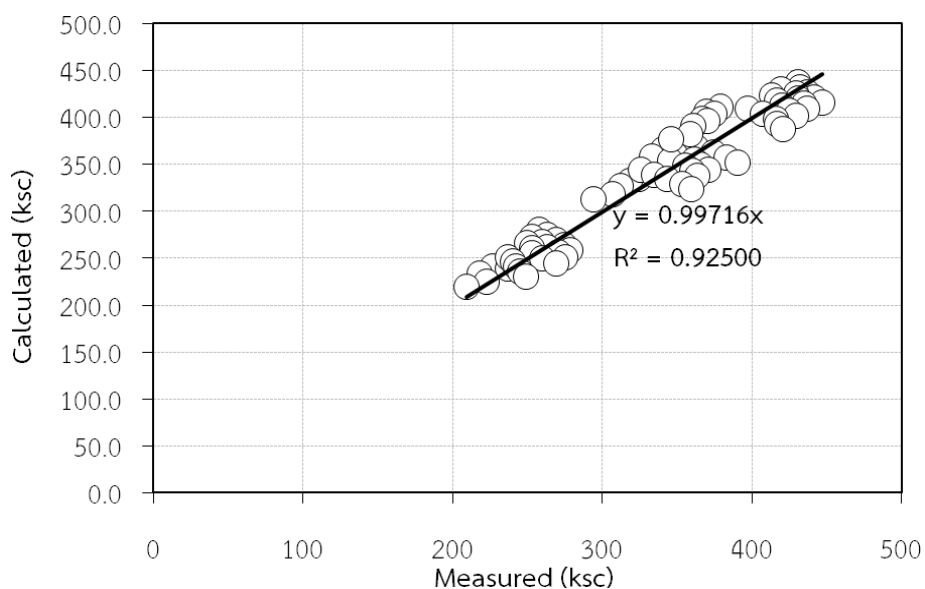
เมื่อ CS_{90} คือ กำลังของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 90 วัน

ได้รูปแบบสมการของแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Regressions ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของแบบจำลองทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก ลงในสมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ภาพประกอบ 4.24 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดจากสมการทางคณิตศาสตร์และค่าจากการทดลองโดยเรียงตามระดับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของเถ้าถ่านหินกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน พบว่าค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากคำนวณมีค่าที่อยู่ในระดับดีเช่นกัน และยังให้ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดอยู่ในระดับที่ดีคล้ายกับค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน และภาพประกอบ 4.25 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงโดยกำหนดให้เริ่มจากจุดตัดเริ่มต้นที่ (0,0) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9250 และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ซึ่งแสดงในตาราง 4.7 พบว่า ผลการทำนายกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันของข้อมูลที่มีค่า MBD เท่ากับร้อยละ 4.215 มีค่า RMSD เท่ากับร้อยละ 11.925 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9979 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ทั่วไปพบว่า เป็นค่าอยู่เกณฑ์ระดับที่ดี คือ มีค่า MBD น้อยกว่าร้อยละ 10 และมีค่า R^2 สูงกว่า 0.95 และเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติต่าง ๆ แล้วพบว่า แบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions โดยใช้ฟังก์ชันสมการเชิงเส้น linear Regressions ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันได้ดี





ภาพประกอบ 4.24 ประสิทธิภาพการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินโดย
แบบจำลองวิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการทดลอง W/B เท่ากับ 0.64 0.51
และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน



ภาพประกอบ 4.25 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions กับค่าที่ได้จากการ
ทดลองของข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ
0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน



ตาราง 4.7 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ MBD RMSD และ R^2 ของการทดสอบแบบจำลองที่ใช้
วิธี Regressions ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51
และ 0.42 ที่อายุ 90 วัน

Statistic Analysis	Data used in Testing the Models
	Testing Data
MBD (%)	4.215
RMSD (%)	11.925
R^2	0.9979



บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

การที่ก้อนตัวอย่างของคอนกรีตมีความชื้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดอาจไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้และอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการนำไปใช้ในงานจริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาปริมาณความชื้นที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของปอซโซลานคอนกรีตและเสนอค่าทางสถิติก่อนนำก้อนตัวอย่างไปใช้ทดสอบในงานจริง โดยสรุปเป็นหัวข้อดังนี้

5.1 สรุปผล

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 การพัฒนากำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

พบว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน คอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากในช่วงอายุต้น และจากการแทนที่วัสดุปอซโซลานทุกส่วนผสม กำลังรับแรงอัดจะยังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ที่อายุ 28 วัน จะพบว่าในอัตราการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณร้อยละ 10 – 40 เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในวัสดุปอซโซลาน จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ จึงได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพัฒนาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน อัตราการพัฒนา กำลังรับแรงอัดก็ยังคงสูงขึ้น

5.1.2 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินต่อระดับความชื้นต่างๆ

หากพิจารณาตามมาตรฐานการทดสอบก้อนตัวอย่างคอนกรีต ASTM C39 ได้ให้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดทันทีหลังจากครบสภาพการบ่มขึ้น จากส่วนผสม W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ทุกส่วนผสม พบว่าระดับความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบมีผลต่อกำลังรับแรงอัดตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ จากค่าความชื้นที่ทำการทดสอบ 4 ค่าคือร้อยละ 100, 50, 25 และ 0 พบว่าเมื่อความชื้นมีปริมาณลดลงค่ากำลังรับแรงอัดก็จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความชื้นจะแปรผกผันกับค่ากำลังรับแรงอัด และเมื่อก้อนตัวอย่างแห้งกำลังรับแรงอัดก็มีค่าที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) กับปริมาณความชื้นในตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

จากการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่มีค่าต่ำหรือเป็นคอนกรีตที่มีกำลังสูง ทำให้อัตราการคายความชื้นมีระยะเวลานานขึ้น เนื่องจากน้ำหนักก้อนตัวอย่างมีปริมาณมากและมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงรวมทั้งช่องว่างคอนกรีตมีน้ำจึงส่งผลให้การคายความชื้นมีระยะเวลานานขึ้นโดยวิธีการอบ



5.1.4 ความขึ้นต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

ในช่วงอายุต้น 7 วัน ความขึ้นจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน ในทุกการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ในช่วงอายุที่ 28 วัน ระดับความขึ้นจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังต่ำมากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูง ในช่วงอายุที่ 90 วัน ความขึ้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัดค่อนข้างน้อย

5.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

จากการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 0.51 และ 0.42 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน พบว่าในช่วงอายุที่ 7 วัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ผลการทดลองที่สูงมาก โดยที่ R^2 สถิติที่ใช้แบบจำลองมีค่าเท่ากับ 0.998 และในส่วนอายุ 28 และ 90 วัน มีค่าสถิติที่ใช้แบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.997 และ 0.997 ตามลำดับ จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายกำลังรับแรงอัด ทั้ง 3 ช่วงอายุ ให้ผลอยู่ในระดับที่ดีมาก และมีค่าความเชื่อมั่น (R^2) สูงกว่า 0.95 ซึ่งเป็นมาตรฐานการยอมรับทางสถิติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะสามารถพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปได้อีก และเป็นประโยชน์สำหรับนักวิจัยท่านอื่นที่สนใจในด้านนี้ต่อไป

5.2.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

5.2.1.1 ในการทดสอบก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ควรควบคุมอุณหภูมิในห้องทดสอบให้คงที่เสมอเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความชื้น

5.2.1.2 ควรใช้แผ่นเหล็กรองด้านล่างและบนของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อกระจายน้ำหนักขณะกดก้อนตัวอย่าง

5.2.1.3 สามารถนำการทดลองไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการทดสอบ BS-1881 ของก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์

5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะสามารถพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปได้อีก และเป็นประโยชน์สำหรับนักวิจัยท่านอื่นที่สนใจด้านนี้ต่อไป

5.2.2.1 สามารถใช้กับปอซโซลานชนิดอื่นๆ ได้เช่น เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน ฯลฯ

5.2.2.2 อาจทำการสร้างแบบต่างๆ เพื่อทำนายค่าความขึ้นที่เหมาะสมในการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เช่นระบบปัญญาประดิษฐ์ อาทิเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) อัลกอริทึมเชิงสุ่ม (stochastic) เป็นต้น โดยเป็นทฤษฎีในการหาค่าที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการหาค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดที่ออกแบบไว้



เอกสารอ้างอิง



เอกสารอ้างอิง

- คม บัวคลี่ และบุญไชย สถิตมั่นในธรรม. (2546). การผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย.
โยธาสาร, 15(2), 46-50, มีนาคม – เมษายน.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2537). การนำเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินมาใช้ในการ
คอนกรีต. ชั่วช่วง, 260, 59-64, ธันวาคม 2536-มกราคม 2537,
- ประจิต จิรปภา. (2523). การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ของซีเถ้าลอยจากการเผาถ่านในแม่เมาะใน
โรงไฟฟ้า. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการเทคโนโลยีเหมาะสม เพื่อการพัฒนาชนบท.
ระหว่างวันที่ 16-18 ตุลาคม 2523, เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 195-205.
- ปริญญญา จินดาประเสริฐ. (2546). ความคงทนของคอนกรีตผสมวัสดุปอชโซลาน. ใน: เอกสาร
ประกอบการสัมมนาวิชาการการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต.
มีนาคม – เมษายน 2546, กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี. หน้า 79-92.
- ปริญญญา จินดาประเสริฐ. (2547). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.
- ปริญญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2528). ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. ขอนแก่น:
สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พุทธิพงศ์ หะสิทธิ์ตันวัฒนา, Andeas Saxer และเอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ. (2546). ผลของโครงสร้างจุลภาค
ของซีเมนต์เฟลสต์ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลในสภาวะแข็งตัว. ใน: เอกสารประกอบการประชุม
วิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1, ระหว่างวันที่ 14 – 16 พฤษภาคม 2546, กรุงเทพฯ:
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม – ราชาูปถัมภ์. หน้า 294-299.
- วิฑิต พิชยธาราธร. (2538). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกา ซีเถ้าลอยและสารลดน้ำ
พิเศษ. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมชัย กกกำแหง. (2536). การนำซีเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน.
ใน: เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์.
กรุงเทพฯ: สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 4-1 ถึง 4-23.
- สมภพ สุวรรณรัฐ. (2548). การเลือกใช้สถิติให้เหมาะสมกับปัญหาวิจัย. ใน: เอกสารประกอบการอบรม
การแปลผลข้อมูลในการวิจัยเชิงปริมาณรุ่นที่ 2 สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ม.ป.ท.: ม.ป.พ. หน้า 26-34.



สุรพล พุกขานุกุล. (2546). *กรรมวิธีการผลิตและชนิดของเถ้าถ่านหินที่มีในประเทศไทย*.

ใน: เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต.

มีนาคม – เมษายน 2546, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 19-29.

American Society for Testing and Materials. (2001). *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete*. Philadelphia: s.n.

———. (2001). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. Philadelphia: s.n.

Aicin, P.C. and Laplant, P., Long-Term. (1990). Compressive Strength of Silica-Fume Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3(3), 164-170.

American Concrete Institute. (2000). *Guide for the Use of Silica Fume in concrete*, Michigan: s.n.

American Society for Testing and Materials. (2001). *Standard Specification for Use of Silica Fume as a Mineral Admixture in Hydraulic Cement Concrete*. Philadelphia: s.n.

American Society for Testing & Materials. (1997). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. s.l.: s.n.

Andrade L.B., Rocha, J.C., Cheriaf, M. (2006). Aspects of Moisture Kinetics of Coal Bottom Ash in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 231–241, November.

Binsheng Zhang, Nenad Bicanic, Christopher J. Pearce, David V. Phillips. (2002). Relationship Between Brittleness and Moisture Loss of Concrete Exposed to High Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 32, March, 363-371.

British Standard Institute. (1983). *Method of Making Test Cube from Fresh Concrete*. London: s.n.

Bouzoubaâ, N. and Lachemi, M. (2001). Self-compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F fly Ash :Preliminary Results. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 413-420.

Chai Jaturapitakkul, Kraiwood Kiattikomol, Vanchai Sata. and Theerarach Leekeeratikul. (2004). Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Silica Fume in Producing High Strength Concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 549-555.



- Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D. (1989). The Reaction of Fly Ash in Concrete. *A critical Examination, Cement and Concrete Research*, 19, 235-246.
- Hansen, T.C. (1990). Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes. *Cement and Concrete Research*, 20, 193-196.
- Hooton, R.D. (1993). Influence of silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing, and Alkali-Silica Reactivity. *ACI Materials Journal*, 90(2), 143-151.
- Kim J. and Leeb, C. (1999). Moisture Diffusion of Concrete Considering Self-desiccation at Early Ages. *Cement and Concrete Research*, 29(12), 1921–1927.
- Kukko H. and Paroll, H. (1997). Moisture Measurement in Concrete Constructions Exposed to Temperature and Moisture Variations. Nordic Mini-seminar of the Nordic Concrete Federation. Finland: Espoo.
- Lane, R.O. and Best, J.F. (1982). Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. *Concrete International : Design & Construction*, 4(7), 81-92.
- Linhua Jiang, Baoyu Lin, Yuebo Cai. (2000). A model for Predicting Carbonation of High-volume Fly ash Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(5), 669-702, January.
- Miyazawa S. and Monteiro J.M. (1996). Volume Change of High – strength Concrete in Moist conditions, *Cement and Concrete Research*, 26(4), 567-572.
- N. Mendes, Winkelmann, F.C., Lamberts, R.P., Philippi, C. (2003). Moisture Effects on Conduction Loads, *Energy and Buildings*, 35, 631–644.
- P.G. Ranjith, Jasinge, D., Song, J.Y., Choi, S.K. (2007). A Study of the Effect of Displacement Rate and Moisture Content on the Mechanical Properties of Concrete: Use of Acoustic Emission. *Mechanics of Materials*, 453–469, October.
- R.C.Gaur, Bansal, N.K. (2002). Effect of Moisture Transfer Across Building Components on Room Temperature, *Building and Environment*, 37, 11–17.
- Ryu D., Ko, J., Noguchi, T. (2011). Effects of Simulated Environmental Conditions on the Internal Relative Humidity and Relative Moisture Content Distribution of Exposed Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 142–153.



- Swamy R.N. and Mahmud, H.B. (1986). Mix Proportions and Strength Characteristics of Concrete. *Containing 50 Percent Low-Calcium Fly Ash*, 2(25), 6-8, February.
- Yin Jian, ZHOU Shi-qiong, XIE You-jin. (2002). Investigation on Commpunding and Application of C80-C100 High-performance. *Cement and Concrete Research*, 32, 173-177.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตผสมถ้ำถ่านหินที่ระดับความชื้นต่างๆ



ตาราง ภาคผนวก ก-1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-N	117.6	120.9	144.5	150.8	100.0	102.8	122.9	128.3	12
FA10-N	109.7	115.0	129.2	142.1	100.0	104.8	117.8	129.5	11.5
FA20-N	105.2	111.6	122.6	131.6	100.0	106.1	116.6	125.2	11.5
FA30-N	102.7	110.5	121.6	129.4	100.0	107.7	118.4	126.0	11
FA40-N	98.9	106.9	117.4	123.4	100.0	108.1	118.7	124.8	10.5
FA50-N	97.0	104.1	110.1	120.7	100.0	107.3	113.5	124.4	10.5
FA60-N	96.1	102.3	108.0	118.4	100.0	106.5	112.4	123.2	10
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
CT-N	201.6	218.7	226.1	237.6	100.0	108.5	112.2	117.9	12
FA10-N	209.4	223.0	231.4	239.9	100.0	106.5	110.6	114.6	11.5
FA20-N	213.5	223.7	232.3	241.7	100.0	104.8	108.8	113.2	11.5
FA30-N	223.6	232.2	237.0	253.6	100.0	103.9	106.0	113.4	11
FA40-N	227.3	238.5	246.3	255.6	100.0	104.9	108.3	112.4	10.5
FA50-N	184.2	200.9	209.5	218.5	100.0	109.1	113.7	118.6	10.5
FA60-N	178.9	191.2	199.9	208.1	100.0	106.9	111.7	116.3	10
	อายุ 90 วัน				อายุ 90 วัน				
CT-N	237.0	249.4	253.0	257.5	100.0	105.4	108.2	109.6	12
FA10-N	240.0	253.0	259.6	263.1	100.0	104.6	108.5	111.2	11.5
FA20-N	242.3	253.4	263.0	269.4	100.0	106.1	110.7	112.1	11.5
FA30-N	244.7	259.6	270.8	274.4	100.0	108.2	110.6	111.9	11
FA40-N	249.1	269.5	275.6	278.8	100.0	106.4	109.9	115.2	10.5
FA50-N	222.9	237.1	245.0	256.9	100.0	104.3	108.5	118.0	10.5
FA60-N	209.3	218.3	227.0	246.9	100.0	105.4	108.2	109.6	10



ตาราง ภาคผนวก ก-2 กำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-N2	195.5	199.0	207.8	226.4	100.0	101.8	106.3	115.8	12
FA10-N2	180.3	184.3	192.7	215.4	100.0	102.3	106.9	119.5	11.5
FA20-N2	176.8	183.5	192.6	209.4	100.0	103.8	108.9	118.5	11.5
FA30-N2	162.8	174.7	181.0	198.8	100.0	107.3	111.2	122.2	11
FA40-N2	160.6	174.1	176.3	194.7	100.0	108.4	109.8	121.2	10.5
FA50-N2	156.6	168.2	175.2	189.3	100.0	107.4	111.9	120.9	10.5
FA60-N2	150.8	166.1	173.6	185.4	100.0	110.2	115.1	122.9	10.5
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
CT-N2	285.2	298.4	307.3	322.7	100.0	104.6	107.8	113.1	12
FA10-N2	295.6	309.5	317.1	330.8	100.0	104.7	107.3	111.9	11.5
FA20-N2	308.5	315.1	328.4	336.2	100.0	102.1	106.5	109.0	11.5
FA30-N2	324.2	334.3	341.1	353.4	100.0	103.1	105.2	109.0	11
FA40-N2	329.8	337.9	344.9	356.2	100.0	102.5	104.6	108.0	10.5
FA50-N2	266.2	273.7	280.9	287.1	100.0	102.8	105.5	107.9	10.5
FA60-N2	262.5	269.9	276.9	283.2	100.0	102.8	105.5	107.9	10.5
	อายุ 90 วัน				อายุ 90 วัน				
CT-N2	325.9	333.0	340.3	358.5	100.0	102.2	104.4	110.0	12
FA10-N2	334.6	345.1	348.8	362.6	100.0	103.2	104.3	108.4	11.5
FA20-N2	343.2	355.4	361.2	374.0	100.0	103.6	105.2	109.0	11.5
FA30-N2	353.1	359.8	365.5	383.0	100.0	101.9	103.5	108.5	11
FA40-N2	359.3	363.8	371.1	390.5	100.0	101.2	103.3	108.7	10.5
FA50-N2	306.8	318.7	327.0	341.6	100.0	103.9	106.6	111.3	10.5
FA60-N2	294.2	312.6	324.3	339.3	100.0	106.3	110.3	115.3	10.5



ตาราง ภาคผนวก ก-3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)				ร้อยละกำลังรับแรงอัด				Slump (cm)
	อายุ 7 วัน				อายุ 7 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	268.6	273.5	281.7	296.1	100.0	101.8	104.9	110.3	12
FA10-H	257.8	268.9	271.5	278.2	100.0	104.3	105.3	107.9	11.5
FA20-H	255.9	261.6	268.3	277.1	100.0	102.2	104.9	108.3	11
FA30-H	243.0	255.4	265.9	269.4	100.0	105.1	109.4	110.9	11
FA40-H	237.7	245.1	253.1	261.6	100.0	103.1	106.4	110.0	10.5
FA50-H	225.0	234.0	239.5	245.0	100.0	104.0	106.4	108.9	10
FA60-H	209.9	220.1	225.9	230.2	100.0	104.8	107.6	109.6	10
	อายุ 28 วัน				อายุ 28 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	363.6	368.4	372.2	387.4	100.0	101.3	102.4	106.5	12
FA10-H	368.3	370.3	376.5	392.5	100.0	100.6	102.2	106.6	11.5
FA20-H	371.8	376.4	388.3	397.4	100.0	101.2	104.4	106.9	11
FA30-H	375.9	380.0	389.0	401.6	100.0	101.1	103.5	106.8	11
FA40-H	382.1	390.5	398.0	413.7	100.0	102.2	104.2	108.3	10.5
FA50-H	327.6	335.1	344.4	354.1	100.0	102.3	105.1	108.1	10
FA60-H	316.1	321.2	333.5	337.9	100.0	101.6	105.5	106.9	10
	อายุ 90 วัน				อายุ 90 วัน				
	100	50	25	0	100	50	25	0	
CT-H	397.3	413.5	419.7	431.1	100.0	104.1	105.7	108.5	12
FA10-H	407.6	416.4	429.2	432.4	100.0	102.2	105.3	106.1	11.5
FA20-H	416.0	420.1	431.1	437.1	100.0	101.0	103.6	105.1	11
FA30-H	416.9	424.8	435.2	441.5	100.0	101.9	104.4	105.9	11
FA40-H	420.8	429.5	436.8	447.0	100.0	102.0	103.8	106.2	10.5
FA50-H	358.7	370.4	374.7	378.9	100.0	103.3	104.4	105.6	10
FA60-H	346.2	361.0	366.9	369.4	100.0	104.3	106.0	106.7	10



ภาคผนวก ข

ตารางเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นต่างๆ



ตาราง ภาคผนวก ข-1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 7 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Compressive strength at (7 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (Linear)
1	0	0	0.64	150.8	144.71
2	10	0	0.64	142.1	138.11
3	20	0	0.64	131.6	131.51
4	30	0	0.64	129.4	124.91
5	40	0	0.64	123.4	118.31
6	50	0	0.64	120.7	111.71
7	60	0	0.64	118.4	105.11
8	0	25	0.64	144.5	137.84
9	10	25	0.64	129.2	131.24
10	20	25	0.64	122.6	124.64
11	30	25	0.64	121.6	118.04
12	40	25	0.64	117.4	111.44
13	50	25	0.64	110.1	104.84
14	60	25	0.64	108	98.24
15	0	50	0.64	120.9	130.96
16	10	50	0.64	115	124.36
17	20	50	0.64	111.6	117.76
18	30	50	0.64	110.5	111.16
19	40	50	0.64	106.9	104.56
20	50	50	0.64	104.1	97.96
21	60	50	0.64	102.3	91.36
22	0	100	0.64	117.6	117.21
23	10	100	0.64	109.7	110.61



ตาราง ภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Compressive strength at (7 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (Linear)
24	20	100	0.64	105.2	104.01
25	30	100	0.64	102.7	97.41
26	40	100	0.64	98.9	90.81
27	50	100	0.64	97	84.21
28	60	100	0.64	96.1	77.61
29	0	0	0.51	226.4	225.22
30	10	0	0.51	215.4	218.62
31	20	0	0.51	209.4	212.02
32	30	0	0.51	198.8	205.42
33	40	0	0.51	194.7	198.82
34	50	0	0.51	189.3	192.22
35	60	0	0.51	185.4	185.62
36	0	25	0.51	207.8	218.34
37	10	25	0.51	192.7	211.74
38	20	25	0.51	192.6	205.14
39	30	25	0.51	181	198.54
40	40	25	0.51	176.3	191.94
41	50	25	0.51	175.2	185.34
42	60	25	0.51	173.6	178.74
43	0	50	0.51	199	211.47
44	10	50	0.51	184.3	204.87
45	20	50	0.51	183.5	198.27
46	30	50	0.51	174.7	191.67
47	40	50	0.51	174.1	185.07
48	50	50	0.51	168.2	178.47
49	60	50	0.51	166.1	171.87



ตาราง ภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Compressive strength at (7 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (Linear)
50	0	100	0.51	195.5	197.72
51	10	100	0.51	180.3	191.12
52	20	100	0.51	176.8	184.52
53	30	100	0.51	162.8	177.92
54	40	100	0.51	160.6	171.32
55	50	100	0.51	156.6	164.72
56	60	100	0.51	150.8	158.12
57	0	0	0.42	296.1	280.96
58	10	0	0.42	288.2	274.36
59	20	0	0.42	277.1	267.76
60	30	0	0.42	269.4	261.16
61	40	0	0.42	261.6	254.56
62	50	0	0.42	245.0	247.96
63	60	0	0.42	230.2	241.36
64	0	25	0.42	281.7	274.08
65	10	25	0.42	275.5	267.48
66	20	25	0.42	268.3	260.88
67	30	25	0.42	265.9	254.28
68	40	25	0.42	253.1	247.68
69	50	25	0.42	239.5	241.08
70	60	25	0.42	225.9	234.48
71	0	50	0.42	273.5	267.21
72	10	50	0.42	265.9	260.61
73	20	50	0.42	261.6	254.01
74	30	50	0.42	255.4	247.41
75	40	50	0.42	245.1	240.81



ตาราง ภาคผนวก ข-1 (ต่อ)

Compressive strength at (7 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (Linear)
76	50	50	0.42	234.0	234.21
77	60	50	0.42	220.1	227.61
78	0	100	0.42	268.6	253.46
79	10	100	0.42	257.8	246.86
80	20	100	0.42	255.9	240.26
81	30	100	0.42	243.0	233.66
82	40	100	0.42	237.7	227.06
83	50	100	0.42	225.0	220.46
84	60	100	0.42	209.9	213.86

ตาราง ภาคผนวก ข-2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 28 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Compressive strength at (28 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
1	0	0	0.64	237.6	250.06
2	10	0	0.64	239.9	244.68
3	20	0	0.64	241.7	239.30
4	30	0	0.64	253.6	233.92
5	40	0	0.64	255.6	228.54
6	50	0	0.64	218.5	223.16
7	60	0	0.64	208.1	217.78
8	0	25	0.64	226.1	243.18
9	10	25	0.64	231.4	237.80
10	20	25	0.64	232.3	232.42
11	30	25	0.64	237	227.04



ตาราง ภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Compressive strength at (28 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
12	40	25	0.64	246.3	221.66
13	50	25	0.64	209.5	216.28
14	60	25	0.64	199.9	210.90
15	0	50	0.64	218.7	236.31
16	10	50	0.64	223	230.93
17	20	50	0.64	223.7	225.55
18	30	50	0.64	232.2	220.17
19	40	50	0.64	238.5	214.79
20	50	50	0.64	200.9	209.41
21	60	50	0.64	191.2	204.03
22	0	100	0.64	201.6	222.56
23	10	100	0.64	209.4	217.18
24	20	100	0.64	213.5	211.80
25	30	100	0.64	223.6	206.42
26	40	100	0.64	227.3	201.04
27	50	100	0.64	184.2	195.66
28	60	100	0.64	178.9	190.28
29	0	0	0.51	322.7	337.29
30	10	0	0.51	330.8	331.91
31	20	0	0.51	336.2	326.53
32	30	0	0.51	353.4	321.15
33	40	0	0.51	356.2	315.77
34	50	0	0.51	287.1	310.39



ตาราง ภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Compressive strength at (28 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
35	60	0	0.51	283.2	305.01
36	0	25	0.51	307.3	330.42
37	10	25	0.51	317.1	325.04
38	20	25	0.51	328.4	319.66
39	30	25	0.51	341.1	314.28
40	40	25	0.51	344.9	308.90
41	50	25	0.51	280.9	303.52
42	60	25	0.51	276.9	298.14
43	0	50	0.51	298.4	323.54
44	10	50	0.51	309.5	318.16
45	20	50	0.51	315.1	312.78
46	30	50	0.51	334.3	307.40
47	40	50	0.51	337.9	302.02
48	50	50	0.51	273.7	296.64
49	60	50	0.51	269.9	291.26
50	0	100	0.51	285.2	309.79
51	10	100	0.51	295.6	304.41
52	20	100	0.51	308.5	299.03
53	30	100	0.51	324.2	293.65
54	40	100	0.51	329.8	288.27
55	50	100	0.51	266.2	282.89
56	60	100	0.51	262.5	277.51
57	0	0	0.42	387.4	397.68
58	10	0	0.42	392.5	392.30



ตาราง ภาคผนวก ข-2 (ต่อ)

Compressive strength at (28 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
59	20	0	0.42	397.4	386.92
60	30	0	0.42	401.6	381.54
61	40	0	0.42	413.7	376.16
62	50	0	0.42	354.1	370.78
63	60	0	0.42	337.9	365.40
64	0	25	0.42	372.2	390.81
65	10	25	0.42	376.5	385.43
66	20	25	0.42	388.3	380.05
67	30	25	0.42	389.0	374.67
68	40	25	0.42	398.0	369.29
69	50	25	0.42	344.4	363.91
70	60	25	0.42	333.5	358.53
71	0	50	0.42	368.4	383.93
72	10	50	0.42	370.3	378.55
73	20	50	0.42	376.4	373.17
74	30	50	0.42	380.0	367.79
75	40	50	0.42	390.5	362.41
76	50	50	0.42	335.1	357.03
77	60	50	0.42	321.2	351.65
78	0	100	0.42	363.6	370.18
79	10	100	0.42	368.3	364.80
80	20	100	0.42	371.8	359.42
81	30	100	0.42	375.9	354.04
82	40	100	0.42	382.1	348.66
83	50	100	0.42	327.6	343.28
84	60	100	0.42	316.1	337.90



ตาราง ภาคผนวก ข-3 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน อายุ 90 วัน ที่ระดับความชื้นต่างๆ

Compressive strength at (90 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
1	0	0	0.64	257.5	279.92
2	10	0	0.64	263.1	274.61
3	20	0	0.64	269.4	269.30
4	30	0	0.64	274.4	263.99
5	40	0	0.64	278.8	258.68
6	50	0	0.64	256.9	253.37
7	60	0	0.64	246.9	248.06
8	0	25	0.64	253	272.82
9	10	25	0.64	259.6	267.51
10	20	25	0.64	263	262.20
11	30	25	0.64	270.8	256.89
12	40	25	0.64	275.6	251.58
13	50	25	0.64	245	246.27
14	60	25	0.64	227	240.96
15	0	50	0.64	249.4	265.72
16	10	50	0.64	253	260.41
17	20	50	0.64	253.4	255.10
18	30	50	0.64	259.6	249.79
19	40	50	0.64	269.5	244.48
20	50	50	0.64	237.1	239.17
21	60	50	0.64	218.3	233.86
22	0	100	0.64	237	251.52
23	10	100	0.64	240	246.21



ตาราง ภาคผนวก ข-3 (ต่อ)

Compressive strength at (90 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
24	20	100	0.64	242.3	240.90
25	30	100	0.64	244.7	235.59
26	40	100	0.64	249.1	230.28
27	50	100	0.64	222.9	224.97
28	60	100	0.64	209.3	219.66
29	0	0	0.51	358.5	373.02
30	10	0	0.51	362.6	367.71
31	20	0	0.51	374	362.40
32	30	0	0.51	383	357.09
33	40	0	0.51	390.5	351.78
34	50	0	0.51	341.6	346.47
35	60	0	0.51	339.3	341.16
36	0	25	0.51	340.3	365.92
37	10	25	0.51	348.8	360.61
38	20	25	0.51	361.2	355.30
39	30	25	0.51	365.5	349.99
40	40	25	0.51	371.1	344.68
41	50	25	0.51	327	339.37
42	60	25	0.51	324.3	334.06
43	0	50	0.51	333	358.82
44	10	50	0.51	345.1	353.51
45	20	50	0.51	355.4	348.20
46	30	50	0.51	359.8	342.89
47	40	50	0.51	363.8	337.58
48	50	50	0.51	318.7	332.27



ตาราง ภาคผนวก ข-3 (ต่อ)

Compressive strength at (90 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
49	60	50	0.51	312.6	326.96
50	0	100	0.51	325.9	344.62
51	10	100	0.51	334.6	339.31
52	20	100	0.51	343.2	334.00
53	30	100	0.51	353.1	328.69
54	40	100	0.51	359.3	323.38
55	50	100	0.51	306.8	318.07
56	60	100	0.51	294.2	312.76
57	0	0	0.42	431.1	437.47
58	10	0	0.42	432.4	432.16
59	20	0	0.42	437.1	426.85
60	30	0	0.42	441.5	421.54
61	40	0	0.42	447.0	416.23
62	50	0	0.42	378.9	410.92
63	60	0	0.42	369.4	405.61
64	0	25	0.42	419.7	430.37
65	10	25	0.42	429.2	425.06
66	20	25	0.42	431.1	419.75
67	30	25	0.42	435.2	414.44
68	40	25	0.42	436.8	409.13
69	50	25	0.42	374.7	403.82
70	60	25	0.42	366.9	398.51
71	0	50	0.42	413.5	423.27
72	10	50	0.42	416.4	417.96
73	20	50	0.42	420.1	412.65
74	30	50	0.42	424.8	407.34



ตาราง ภาคผนวก ข-3 (ต่อ)

Compressive strength at (90 days)					
No	Rp	Moisture	W/B	Com. (Test)	Com. (linear)
75	40	50	0.42	429.5	402.03
76	50	50	0.42	370.4	396.72
77	60	50	0.42	361.0	391.41
78	0	100	0.42	397.3	409.07
79	10	100	0.42	407.6	403.76
80	20	100	0.42	416.0	398.45
81	30	100	0.42	416.9	393.14
82	40	100	0.42	420.8	387.83
83	50	100	0.42	358.7	382.52
84	60	100	0.42	346.2	377.21



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ระดับความชื้นร้อยละ 100
การแทนที่ร้อยละ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน



ตาราง ภาคผนวก ค-1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64 ที่ระดับ
ความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²) W/B เท่ากับ 0.64	
	ที่อายุ 7 วัน	
	ระดับความชื้นร้อยละ 100 (ksc)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด
CT-N	117.6	100
FA10-N	109.7	93
FA20-N	105.2	89
FA30-N	102.7	87
FA40-N	98.9	84
FA50-N	97	82
FA60-N	96.1	82
	ที่อายุ 28 วัน	
CT-N	201.6	100
FA10-N	209.4	104
FA20-N	213.5	106
FA30-N	223.6	111
FA40-N	227.3	113
FA50-N	184.2	91
FA60-N	178.9	89
	ที่อายุ 90 วัน	
CT-N	237	100
FA10-N	240	101
FA20-N	242.3	102
FA30-N	244.7	103
FA40-N	249.1	105
FA50-N	222.9	94
FA60-N	209.3	88





ภาพประกอบ ภาคผนวก ค-1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.64

ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

ตาราง ภาคผนวก ค-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51 ที่ระดับความชื้น

ร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

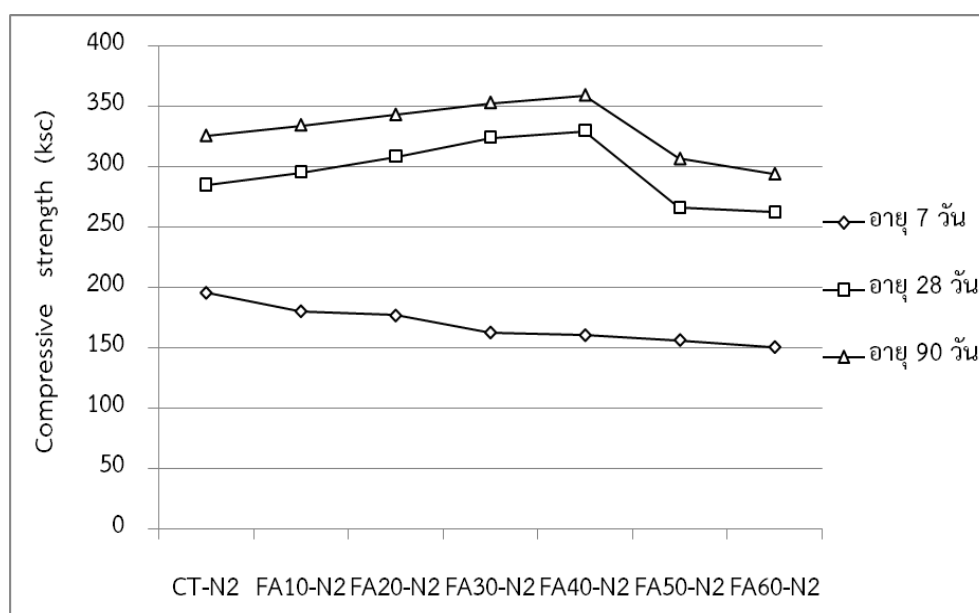
Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²) W/B เท่ากับ 0.51	
	ที่อายุ 7 วัน	
	ระดับความชื้นร้อยละ 100 (ksc)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด
CT-N2	195.5	100
FA10-N2	180.3	92
FA20-N2	176.8	90
FA30-N2	162.8	83
FA40-N2	160.6	82
FA50-N2	156.6	80
FA60-N2	150.8	77
	ที่อายุ 28 วัน	
CT-N2	285.2	100



ตาราง ภาคผนวก ค-2

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²) W/B เท่ากับ 0.51	
	ที่อายุ 7 วัน	
	ระดับความชื้นร้อยละ 100 (ksc)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด
FA10-N2	295.6	104
FA20-N2	308.5	108
FA30-N2	324.2	114
FA40-N2	329.8	116
FA50-N2	266.2	93
FA60-N2	262.5	92
	ที่อายุ 90 วัน	
CT-N2	325.9	100
FA10-N2	334.6	103
FA20-N2	343.2	105
FA30-N2	353.1	108
FA40-N2	359.3	110
FA50-N2	306.8	94
FA60-N2	294.2	90





ภาพประกอบ ภาคผนวก ค-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.51

ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

ตาราง ภาคผนวก ค-3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้น ร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²) W/B เท่ากับ 0.42	
	ที่อายุ 7 วัน	
	ระดับความชื้นร้อยละ 100 (ksc)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด
CT-H	268.6	100
FA10-H	257.8	96
FA20-H	255.9	95
FA30-H	243.0	90
FA40-H	237.7	88
FA50-H	225.0	84
FA60-H	209.9	78
	ที่อายุ 28 วัน	
CT-H	363.6	100
FA10-H	368.3	101



ตาราง ภาคผนวก ค-3 (ต่อ)

Mixture	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²) W/B เท่ากับ 0.42	
	ที่อายุ 7 วัน	
	ระดับความชื้นร้อยละ 100 (ksc)	ร้อยละกำลังรับแรงอัด
FA20-H	371.8	102
FA30-H	375.9	103
FA40-H	382.1	105
FA50-H	327.6	90
FA60-H	316.1	87
	ที่อายุ 90 วัน	
CT-H	397.3	100
FA10-H	407.6	103
FA20-H	416.0	105
FA30-H	416.9	105
FA40-H	420.8	106
FA50-H	358.7	90
FA60-H	346.2	87



ภาพประกอบ ภาคผนวก ค-3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน W/B เท่ากับ 0.42 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 100 การแทนที่ 0 – 60 ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน



ภาคผนวก ง
อักษรย่อและสัญลักษณ์



อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
W/B	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	-
FA	เถ้าถ่านหิน	-
MS	ความชื้น	-
RP	ปริมาณการแทนที่วัสดุปอซโซลาน	%
CS	กำลังอัดของคอนกรีต	ksc
α_i	ค่าคงที่	-
W	ปริมาณน้ำ	kg/m ³
C'	ปริมาณปูนซีเมนต์	kg/m ³
k	ค่าตัวคูณประสิทธิภาพ	-
RM	แบบจำลองที่ใช้วิธี Regressions	-
Training Data	ข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลอง	ตัวอย่าง
Testing Data	ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของแบบจำลอง	ตัวอย่าง
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
X	ตัวแปรนำเข้า X	-
Y	ตัวแปรนำเข้า Y	-
A ₁ , A ₂ , ... , A _n	เซตสมาชิกของตัวแปร X	-
B ₁ , B ₂ , ... , B _n	เซตสมาชิกของตัวแปร Y	-
k ₁ , k ₂ , ... , k _n	ค่าคงที่ของกฎฟัซซี่	-
$\mu(k)$	ระดับความเป็นสมาชิกจากการอนุมานของตัวแปร	-



สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
MBD	ค่าเบี่ยงเบนของความผิดพลาดเฉลี่ย (Mean Bias Deviation)	
	$MBD = \frac{1}{\bar{E}_{\text{measure}, i}} \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{prediction}, i} - E_{\text{measured}, i})}{N} \times 100$	%
RMSD	ค่าเบี่ยงเบนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Deviation)	
	$RMSD = \frac{1}{\bar{E}_{\text{measured}, i}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{prediction}, i} - E_{\text{measured}, i})^2}{N}} \times 100$	%
R^2	ค่า Coefficient of Determination	
	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{prediction}, i} - \bar{E}_{\text{prediction}, i})(E_{\text{measured}, i} - \bar{E}_{\text{measured}, i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (E_{\text{prediction}, i} - \bar{E}_{\text{prediction}, i})^2][\sum_{i=1}^N (E_{\text{measured}, i} - \bar{E}_{\text{measured}, i})^2]}}$	-
$E_{\text{measured}, i}$	ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือตำแหน่งที่ i	-
$E_{\text{predicted}, i}$	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองตำแหน่งที่ i	-
$\bar{E}_{\text{measured}}$	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ	-
$\bar{E}_{\text{predicted}}$	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้การทำนายโดยใช้แบบจำลอง	-
N	จำนวนชุดของข้อมูล	ตัวอย่าง



ภาคผนวก จ
รูปภาพประกอบการทดลอง



รูปภาพประกอบการทดลอง



ภาพประกอบ ภาคผนวก จ - 1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก



ภาพประกอบ ภาคผนวก จ - 2 ส่วนผสมคอนกรีต



ภาพประกอบ ภาคผนวก จ - 3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีต



ภาพประกอบ ภาคผนวก จ - 4 ตู้อบอุณหภูมิตัวอย่างคอนกรีต

ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นายกิจกุล ดีดวงพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520
จังหวัด และประเทศที่เกิด	จังหวัดมุกดาหาร ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2533 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านหนองแคน - นาจาน อำเภอเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2535 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมุกดาหาร อำเภอเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2540 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมุกดาหาร อำเภอเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2542 อนุปริญญาวิทยาศาสตร (อว.ท.) สาขาวิชาก่อสร้าง สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี พ.ศ. 2544 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยี อุตสาหกรรมแขนงวิชาก่อสร้าง สถาบันราชภัฏสุรินทร์ พ.ศ. 2557 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	นายช่างโยธา สำนักงานเทศบาลตำบลยางเย็น อำเภอเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร 49000
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 212 หมู่ 12 ตำบลยางเย็น อำเภอเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร 49000

