

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด  
Chloride induced corrosion of reinforced steel in ground rice husk ash  
concrete

ปริญญาานิพนธ์

ของ

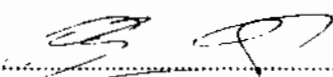
อนุชิต	บันลือทรัพย์	53010310248
สุรวิทย์	จันทศรี	54010310093

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม




คณะกรรมการสอบปริญญาโท ได้พิจารณาปริญญาโท ฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

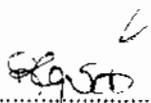
คณะกรรมการสอบปริญญาโท

  
.....  
(อาจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม)

ประธานกรรมการ

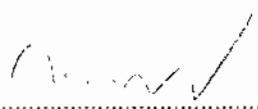
  
.....  
(อาจารย์ ดร.นพพล เสงี่ยมศักดิ์)

กรรมการ

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุขี ซีระโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้อนุมัติให้รับปริญญาโท ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกสร วงศ์เกษม)

หัวหน้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ และประธานกรรมการสอบ อาจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม อาจารย์ ดร.นพปฎล เสี่ยมศักดิ์ กรรมการสอบ ขอกราบขอบพระคุณ ไว้เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์และ เครื่องมือที่จำเป็น อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาในการใช้อุปกรณ์ และ เครื่องมือต่าง ๆ คุณมีศักดิ์ พัวพิทยธร พนักงานห้องปฏิบัติการที่ได้ช่วยเหลือและแนะนำเกี่ยวกับเทคนิค ต่าง ๆ ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ พนักงานรักษาความปลอดภัยประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ดูแลรักษา ห้องทำการทดลองของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ประโยชน์ที่ได้จากปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้หากมีเพียงใด ขอมอบแต่บิดา มารดา ผู้มีอุปการคุณทุก ท่านและมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อนุชิต บันลือทรัพย์  
สุรวิทย์ จันทศรี

ชื่อเรื่อง	การกักกรองของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด
ผู้วิจัย	นายอนุชิต บันลือทรัพย์ นายสุรวิทย์ จันทศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์
ปริญญา	วศ.บ. สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2558

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ นี้เป็นการศึกษาการกักกรองเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด โดยการนำเถ้าแกลบมาบดให้มีขนาดที่เล็กลงจนมีอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ออกแบบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.80, 0.62, 0.53, 0.50, 0.48 และ 0.45 จากนั้นทำการทดลองโดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายคลอไรด์ เพื่อวัดหาค่าการกักกรองของของเหล็กเสริมโดยวิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า

จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดสามารถลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ โดยเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ถึง 20 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อ W/B มีค่าลดลง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดสามารถช่วยลดการกักกรองเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในคอนกรีตได้

**TITLE** Chloride induced corrosion of reinforced steel in ground rice husk ash concrete

**AUTHOR** Mr. Anoochit Bunlusap  
Mr. Surawit Jansri

**ADVISOR** Asst.Prof. Raungrut Cheerarot, Ph.D

**DEGREE** B. Eng. (Civil Engineering)

**UNIVERSITY** Mahasarakham University YEAR 2015

### ABSTRACT

The aim of this project was to study chloride induced corrosion of reinforced steel mixed with ground rice husk ash. Rice husk ash was ground until the particle retained on sieve No. 325 less than 5 % by weight. Portland cement type I was replaced by the ground rice husk ash at 0, 10, 20, 30, and 40% by weight of binder. The control concretes specimens were designed to have compressive strength at W/B of 0.8, 0.62, 0.53, 0.50, 0.48, and 0.45. All specimens were immersed in chloride solution to determined the corrosion of reinforced steel by Half cell potential measurement.

From the result, it was found that the use of ground rice husk ash can reduce electric potential of concrete. The electric potential decreased when percent replacement of ground rice husk ash increased. The optimum of replacement by ground rice husk ash is 10 – 20 % W/B is decreased, the electric potential also decreased. It can be concluded that the use of ground rice husk as can reduce the chloride induced corrosion of reinforced steel.

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
การกักกรองของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	4
ปัจจัยที่มีผลต่อการกักกรอง.....	4
- อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	5
- อิทธิพลของชนิดและปริมาณวัสดุประสาน.....	5
เถ้าแกลบ.....	6
- การบดและลักษณะของเถ้าแกลบบดละเอียด.....	6
- ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ.....	6
- ความละเอียดของเถ้าแกลบ.....	6
- ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ.....	7
การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	7
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์.....	9
- แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	9
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	12
การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ.....	12
การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	13
การวัดหาค่าการกักกรองของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	15
การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	18

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลอง.....	20
ผลการทดสอบวัสดุ.....	20
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	21
- ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุม.....	21
- ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด.....	22
- การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	29
- การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตควบคุม.....	29
- การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด.....	30
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	37
สรุปผล.....	37
ข้อเสนอแนะ.....	37
บรรณานุกรม.....	39
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	42
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	46
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	51
ภาคผนวก ง ภาพประกอบ.....	57
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	64

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแกลบ .....	7
2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมถั่วถ่านหินและถั่วแกลบที่ W/B ต่างกัน.....	8
3 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม.....	13
4 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมถั่วแกลบบดละเอียด.....	14
5 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในคอนกรีตควบคุม.....	43
6 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีตผสมถั่วแกลบบดละเอียด.....	44
7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตควบคุม.....	47
8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมถั่วแกลบบดละเอียด.....	48
9 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรง.....	52
10 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูซึมของมวลรวมละเอียด (ทราย).....	53
11 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรง.....	54
12 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูซึมของมวลรวมหยาบ (หิน).....	55
13 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งของหิน และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม.....	56
14 ความถ่วงจำเพาะของถั่วแกลบ.....	56



## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก.....	8
2 ชุดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ( Half – Cell ).....	16
3 รูปตัดตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	17
4 การต่อวงจรศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	17
5 ตัวอย่างคอนกรีต.....	19
6 ค้อนกระแทก (Schmidt Hammer).....	19
7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุมในตัวอย่างที่แช่ในคลอไรด์.....	21
8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุมในตัวอย่างที่แช่ในน้ำ.....	22
9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในคลอไรด์.....	23
10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในน้ำ.....	23
11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แช่ในคลอไรด์.....	24
12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แช่ในน้ำ.....	24
13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แช่ในคลอไรด์.....	25
14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แช่ในน้ำ.....	25
15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แช่ในคลอไรด์.....	26
16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แช่ในน้ำ.....	26

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที W/B เท่ากับ 0.48 ที่ แซในคลอไรด์.....	27
18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที W/B เท่ากับ 0.48 ที่ แซในน้ำ.....	27
19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที W/B เท่ากับ 0.45 ที่ แซในคลอไรด์.....	28
20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที W/B เท่ากับ 0.45 ที่ แซในน้ำ.....	28
21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่แซในคลอไรด์.....	29
22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่แซในน้ำ.....	30
23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แซในคลอไรด์.....	31
24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แซในน้ำ.....	31
25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แซในคลอไรด์.....	32
26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แซในน้ำ.....	32
27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แซในคลอไรด์.....	33
28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แซในน้ำ.....	33
29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซในคลอไรด์.....	34
30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซในน้ำ.....	34

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่แช่ในคลอไรด์.....	35
32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่แช่ในน้ำ.....	35
33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.45 ที่แช่ในคลอไรด์.....	36
34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.45 ที่แช่ในน้ำ.....	36
35 ชุดเครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	58
36 ค้อนกระแทก.....	58
37 เตรียมแบบหล่อคอนกรีต .....	59
38 การเตรียมวัสดุ .....	59
39 การวัดการทรุดตัวของคอนกรีต.....	60
40 การใช้เครื่องเขย่าเพื่อให้คอนกรีตลงเต็มแบบหล่อ.....	60
41 การเทคอนกรีตใส่แบบหล่อ.....	61
42 การจัดวางเหล็กเสริมในแบบหล่อแบบทรงกระบอก.....	61
43 การวางเหล็กและจัดตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	62
44 การถอดแบบ.....	62
45 การแช่ตัวอย่างคอนกรีต.....	63
46 การทดสอบหากลำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก.....	63

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มาของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีราคาถูก และเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆได้ดีพอสมควร และในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากจะคำนึงถึงกำลังความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกแล้ว ยังควรคำนึงถึงความคงทนของโครงสร้างต่อสภาพแวดล้อมบริเวณใช้งาน โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล โครงสร้างเหล่านี้จะเกิดปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สิ่งเหล่านี้นับเป็นปัญหาหลักที่พบได้อย่างแพร่หลายทั่วไป และยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆเกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก จนนำมาสู่การสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในที่สุด

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม และทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ต่ำลง โดยเฉพาะโครงสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงแล้ว ปริมาตรของสนิมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแรงดันภายใน ดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายในรูปแบบต่างๆ เช่น แตกร้าว หลุดร่อน ทั้งยังเป็นสาเหตุให้โครงสร้างถึงขั้นวิบัติ ความรุนแรงของขบวนการดังกล่าวอาจใช้ระยะเวลาในการดำเนินการต่างกัน ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีต ความเข้มข้นของคลอไรด์และสภาพแวดล้อมที่มีความแห้ง-ชื้นต่างกัน การป้องกันสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตหรืออาศัยกระบวนการทางไฟฟ้า และการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานและสารเคมีเพิ่มเติม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างทนทานต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมจากคลอไรด์ได้มากกว่าขึ้น และช่วยยืดอายุของโครงสร้างคอนกรีตจากการเสื่อมสภาพลงไปได้

ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำโครงการจึงมีความสนใจในการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในคอนกรีต หลักการคือการวัดกระแสไฟฟ้าจากเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่ในคลอไรด์ โดยแต่ละตัวอย่างคอนกรีตจะมีอัตราส่วนการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานที่แตกต่างกันออกไป รวมทั้งอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์หรือกำลังของคอนกรีตที่ออกแบบไว้หลายขนาด เพื่อจะได้ศึกษาว่า ปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมมากที่สุด และเมื่อทราบปัจจัยหลักที่ทำให้การต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด จะสามารถช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างและการซ่อมแซมจะกระทำได้ดีกว่าเดิม ตลอดจนสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมโครงสร้างลงไปได้

### วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน โดยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
2. เพื่อศึกษาการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-บดละเอียดที่แตกต่างกัน โดยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

### ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้วัสดุเถ้าแกลบจากโรงสีข้าวทอง มหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม แล้วนำมาบดละเอียดให้มีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0 - 5
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง กำหนดค่ายุบตัวเป็น  $10 \pm 2$  เซนติเมตร
3. ส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบปริมาณในการแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก
4. อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.8, 0.62, 0.53, 0.50, 0.48, และ 0.45
5. ทราयीขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 โมดูลัสความละเอียดไม่ต่ำกว่า 2.5
6. มวลรวมหยาบมีขนาดคละตาม ASTM C 33 ขนาดใหญ่สุดเป็น 20 มิลลิเมตร
7. ใช้ไซเตียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก
8. ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายด้วยวิธีค้อนกระแทก
9. ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell-Potential) ตามมาตรฐาน ASTM C 876 - 91

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงกำลังของคอนกรีตและปริมาณการแทนที่ของเถ้ากลบในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการต้านทานการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีต
2. ได้ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบคอนกรีต เพื่อต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ทำให้ยืดอายุของโครงสร้างต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

งานวิจัยมากมายที่นำวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนนี้ด้วยเหตุผลก็เพื่อพยายามศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีน เพื่อหาทางป้องกันการกัดกร่อนตลอดทั้งหาวิธีออกแบบเพื่อให้คอนกรีตใช้งานได้อย่างยาวนาน เช่น การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตที่ผสมด้วยเส้นใยใยแก้วใยสังเคราะห์ใยคาร์บอนไฟเบอร์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 การวัดค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมใช้วิธีทางไฟฟ้า ที่มา: (สำเร็จ และคณะ,2549.)

#### 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นไอออนไฮดรอกไซด์และระดับค่า pH ของน้ำในโพรง หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเหมาะสมต่อการเกิดการกัดกร่อน และดังได้กล่าวมาแล้วว่าเหล็กเสริมคอนกรีตปกติจะถูกป้องกันการด้วยชั้นฟิล์มบางๆ ที่เคลือบผิวอยู่และมีสภาพความเป็นต่างของน้ำในโพรงสูง ที่มา: (สำเร็จ และคณะ,2549.)

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

1. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเลในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเนื่องจาก ผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้  
ที่มา: (ณัฐวุฒิ และณัฐพล,2549.)

### 2.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

น้ำเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนที่ความแตกต่างของอัตราส่วนของวัสดุประสาน ซึ่งนำไปหล่อเป็นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ทดสอบ ในการคิดอัตราส่วนผสมของน้ำมีแนวโน้มชี้ให้เห็นว่าส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้ W/B ที่ค่าต่ำๆ สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ W/B ที่มีค่าสูง เนื่องจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรือวัสดุประสานทำให้มีความพรุนของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อที่บแน่นมีค่ากำลังอัดที่สูง และสามารถลดการแพร่กระจายหรือลดการซึมผ่านได้

### 2.2.2 อิทธิพลของชนิดและปริมาณวัสดุประสาน

การกัดกร่อนเกิดขึ้นได้อันเนื่องมาจากกระบวนการแทรกซึมผ่านคาร์บอนเนชันหรือคลอไรด์ในคอนกรีตหรือมอร์ต้า ฉะนั้นหากต้องการหลีกเลี่ยงหรือป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชันหรือคลอไรด์ ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหรืออิทธิที่สอดคล้องหรือเหมือนกันกับอิทธิที่มีผลต่อการแทรกซึมคาร์บอนเนชันหรือคลอไรด์ในข้างต้นเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงหลักเบื้องต้นของการกัดกร่อนด้วยวัสดุพอลิโซลาน

## 2.3 ถ้ำกลบ

### 2.3.1 การบดและลักษณะของถ้ำกลบบดละเอียด

กลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจะยังคงรักษาความพรุนและโครงสร้างเซลล์ไว้ได้ กลบที่เผาแล้วมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานจึงต้องบดถ้ำกลบให้ละเอียด ให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดผงปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นความละเอียดที่นำมาใช้งานได้ดี การบดละเอียดถ้ำกลบนิยมใช้การบดแห้งเพราะบดง่ายและเร็ว ทั้งนี้การบดเปียกสามารถทำให้ถ้ำกลบมีอนุภาคละเอียดมากกว่าแต่ยุ่งยากมากกว่า

### 2.3.2 ความถ่วงจำเพาะของถ้ำกลบ

ความถ่วงจำเพาะของถ้ำกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา ถ้ำกลบที่เผาใหม่ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ไม่เผาไหม้ไม่หมดและคาร์บอนปนอยู่มากจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะถ้ำกลบที่เผาใหม่ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9 – 2.3 และยังขึ้นกับอุณหภูมิในการเผาด้วย

### 2.3.3 ความละเอียดของถ้ำกลบ

การวัดขนาดของอนุภาคของถ้ำกลบนิยมใช้พื้นที่ผิวจำเพาะ ความละเอียดของถ้ำกลบ นอกจากขึ้นอยู่กับเวลาและวิธีการบดแล้วยังขึ้นอยู่กับวิธีการเผาด้วยซึ่งในการวัดความละเอียดของถ้ำกลบจะนิยมใช้วิธีวัดของเบลนหรือวิธี BET ซึ่งให้ค่าแตกต่างกัน ความละเอียดของถ้ำกลบที่วัดโดยวิธีของเบลนอยู่ระหว่าง 7,000 – 14,000 ตารางเซนติเมตร/กรัม และ 20 – 150 ตารางเมตร/กรัม ดังนั้นการวัดความละเอียดโดยพื้นที่จำเพาะของกลบจึงต้องระบุวิธีการวัดให้ชัดเจน ถ้ำกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมักมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5 – 20 ไมครอน แต่ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยใหญ่ประมาณ 25 ไมครอน และขนาดที่เล็กเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน ก็มีการใช้อยู่

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ ที่มา: (ณัฐพล และณัฐวุฒิ,2549.)

สารประกอบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO <sub>2</sub>	88.33	89.95
K <sub>2</sub> O	2.76	1.49
Na <sub>2</sub> O	0.15	0.07
CaO	0.52	0.50
MgO	0.28	0.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.37	1.89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	NA	NA
SO <sub>3</sub>	0.12	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48	0.54
LOI	3.71	4.70

### 2.3.4 ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ

ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบสามารถวัดได้โดยการทดสอบค่าดัชนีตามกำลังมาตรฐาน ASTM C311 โดยการใช้ทดสอบกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือที่มีการหรือที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าดัชนีกำลังคือค่ากำลังที่ทดสอบได้เมื่อเปรียบกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน หากค่าดัชนีกำลังมีค่าสูงแสดงถึงความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเถ้าแกลบ  
ที่มา: (ณัฐวุฒิ และณัฐพล,2549.)

### 2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบบดกำลังอัดเป็นเป็นเรื่องสำคัญมาก เพราะเป็นการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้งาน รูปทรงของคอนกรีตที่นิยมใช้ในการทดสอบเพื่อหาบดกำลังอัดของคอนกรีตที่นิยมมี 2 แบบ คือ รูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอก สำหรับในประเทศไทยพบว่าใช้ทั้ง 2 ประเภท เนื่องมาจากอิทธิพลของบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาจากประเทศอังกฤษในระยะแรกที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปลูกบาศก์ และในระยะหลังที่บัณฑิตส่วนใหญ่จบการศึกษาจากสหรัฐอเมริกา แคนาดา และออสเตรเลีย ที่ใช้

ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกก่อนอื่นต้องขอแนะนำถึงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งขนาด วิธีการเตรียมการ ตลอดจนให้ผลของกำลังอัดที่แตกต่างกัน

ตาราง 2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่ W/B ต่างกัน  
ที่มา: (ณัฐพล และณัฐวุฒิ,2549.)

ส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : เถ้าถ่านหิน : เถ้าแกลบ	W/B	กำลังอัด (MPa)			
		3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
การยู่บตัว 30 – 60 มม.					
100 : 0 : 0	0.245	54.0	60.0	81.0	81.5
80 : 10 : 10	0.245	58.5	61.0	74.0	75.0
60 : 20 : 20	0.260	47.0	65.0	76.0	77.5
40 : 30 : 30	0.350	29.5	50.0	63.0	69.5

ในการทดสอบกำลังอัดก็มีวิธีการทดสอบอีกแบบหนึ่งคือการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบด้วยวิธีค้อนกระแทก (Schmidt Hammer Test)



ภาพประกอบ 1 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก (Schmidt Hammer)

ที่มา: (<http://www.hotfrog.com.au>)

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก (Schmidt Hammer Test) เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีตในโครงสร้างแบบไม่ทำลาย ตามมาตรฐาน ASTM C805 โดยประเมินค่ากำลังอัดประลัยหรือค่า  $F_c'$  ของคอนกรีตโดยอาศัยหลักการวัดค่าดัชนีสะท้อนกลับ (Rebound Number) ที่เกิดจากการกดแฉกการทดสอบ (Plunger) และกระบอกทดสอบ (Housing) ให้ตั้งฉากกับผิวคอนกรีต แรงกระแทกจากสปริงภายในจะทำให้แฉกทดสอบเกิดการสะท้อนกลับ มีค่าดัชนีตั้งแต่ 10 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับพลังงานของผิวคอนกรีต ผิวคอนกรีตที่มีความแข็งมากกว่าจะมีค่าดัชนีสะท้อนกลับสูงกว่า

## 2.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤติแล้วถ้ามีน้ำมันและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

### 2.5.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คอนกรีตและวัสดุ (2543) คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (De-icing Salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้นมาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอหรือไม่ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ที่มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตามได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ ในคอนกรีตสด ที่มา: (วสท. 1014 – 40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความต้านทานของคอนกรีต ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

1. การซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
2. การแพร่ของไอออนคลอไรด์จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาทั้งวันนั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหามากนัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุดมักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ ร่องลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลจะมีความเสี่ยงต่อการกร่อนของเหล็กเสริมน้อยมาก

ในกรณีของสภาพที่เปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่บริเวณคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมเช่นอุณหภูมิความชื้นและการไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ส่วนนี้อาจจะประสบภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งไอออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีปัญหาการกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตโครงสร้างอาคารหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกง โดยใช้สารเคลือบผิวป้องกันสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต 2 ผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันเหล็กเสริมคอนกรีต ในตัวอย่างแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นทำการกดให้แท่งตัวอย่างเกิดการแตกร้าวด้วยแรงกระทำ ประมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงกดประลัย แล้วนำไปไว้ในสภาวะที่มีการเร่งให้เกิดการผุกร่อน โดยนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.75, 1.50 และ 3.00 โดยน้ำหนัก แท่งตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปแช่ในน้ำจากอาคารหอหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกง ในภาวะความผันผวนของวงจรเปียก 1 สัปดาห์และแห้ง 2 สัปดาห์สลับกัน จากนั้นทำการทดสอบแท่งตัวอย่างที่อายุ 9, 15, 21, 27 และ 33 สัปดาห์ โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half Cell - Potential Measurement) ตามมาตรฐาน ASTM C 876

ชยพัทธ์ (2550) ผลการศึกษาพบว่าแท่งตัวอย่างเหล็กเสริมคอนกรีตที่แช่ในน้ำจากอาคารหอหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกงมีแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตมากกว่าแท่งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นอยู่ระหว่างร้อยละ 1.50 ถึง 3.00 ที่สภาวะเดียวกัน ทุกกรณีและปฏิกิริยาการเกิดสนิมมีค่าผันแปรตามความเข้มข้นของคลอไรด์ การแตกร้าวของคอนกรีตระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง และสารเคลือบผิวป้องกันสนิม นอกจากนั้นแล้วสารเคลือบผิวป้องกันสนิมมีผลช่วยชะลอการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ได้เล็กน้อย

สิริศิลป์ และคณะ (2555) การทดสอบการเกิดสนิมเหล็กโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ วิธีนี้เป็นวิธีการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่เริ่มได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะนอกจากจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนแล้วยังทำให้ทราบแนวโน้มการเกิดสนิมก่อนที่สนิมจะปรากฏบนผิวคอนกรีตอีกด้วย แต่การใช้งานเครื่องมือชนิดนี้ในหลายๆ ครั้งพบว่า เครื่องมือจะมีความไม่แน่นอนสูง อันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเครื่องมือ งานวิจัยนี้ได้พูดถึงการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความไม่แน่นอนของผลการทดสอบ โดยได้มีการศึกษาปัจจัยของปริมาณสารคลอไรด์ในบริเวณที่ทดสอบ ระยะหุ้มจากคอนกรีตถึงเหล็กเสริมกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และการเคลือบสารอีพอกซีที่เหล็กเสริม และผลการศึกษาพบว่าค่าความต่างศักย์มีค่าลบที่สูงขึ้นหากปริมาณสารคลอไรด์ที่ผสมมีปริมาณมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าความต่างศักย์มีค่าลบที่ต่ำลงหากระยะหุ้มคอนกรีตและกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่วนในเรื่องการเคลือบสารอีพอกซีพบว่า เหล็กเสริมที่มีการเคลือบสารอีพอกซีให้ค่าความต่างศักย์ที่เป็นลบต่ำกว่าเหล็กที่ไม่ได้เคลือบ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2550 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ไม่จับตัวเป็นก้อน
2. ทราย เป็นทรายเม็ดละเอียด ที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 0 – 5
3. ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ โดยเตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)
4. หิน ใช้หินขนาดใหญ่ที่สุด 20 มิลลิเมตร โดยเตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD)
5. น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ใช้น้ำประปา ทั้งขั้นตอนการทำตัวอย่างคอนกรีตให้อิ่มตัวด้วยน้ำและการเตรียมสารละลาย
6. สารลดน้ำพิเศษ ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C 494-92

#### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ดังนี้

1. การกระจายขนาดของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 136 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายตามมาตรฐาน ASTM C 128 Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate
2. การกระจายขนาดของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 136 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินตามมาตรฐาน ASTM C 127 Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate หน่วยน้ำหนักมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 29 Standard test method for unit weight and voids in aggregate

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต ออกแบบโดยใช้วิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) โดยคอนกรีตมีทั้งหมด 30 ส่วนผสม ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของวัสดุต่างๆ ดังแสดงในตาราง 4 และ 5

ตาราง 3 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม ที่มา: (ณัฐพล และณัฐวดี,2549.)

NO.	Type of Concrete	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )					$\frac{w}{C}$	SP (g)	Slum (cm.)
		Water	Cement	RHA	Sand	Stone			
1.	CC-0.80	195	244	0	798	1024	0.80	0	10.20
2.	CC-0.62	195	315	0	740	1024	0.62	0	11.20
3.	CC-0.48	195	406	0	667	1024	0.48	0	11.60
4.	CC-0.41	180	439	0	670	1024	0.41	76	9.00
5.	CC-0.35	170	485	0	658	1024	0.35	84	8.80
6.	CC-0.30	160	533	0	644	1024	0.30	100	8.50

CC = Control concrete of ordinary Portland cement (type I)

RHA = Small size of Rice husk ash (Retained on sieve No. 325 between 0 - 5%)

ตาราง 4 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกสบบดละเอียด ที่มา: (ณัฐพล และณัฐวดี, 2549.)

NO.	Type of Concrete	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )					w C + RHA	SP (g)	Slum (cm.)
		Water	Cement	RHA	Sand	Stone			
7.	10-RHA-0.80	195	220	24	794	1024	0.80	0	8.30
8.	20-RHA-0.80	195	195	49	790	1024	0.80	0	8.70
9.	30-RHA-0.80	195	171	73	786	1024	0.80	0	10.20
10.	40-RHA-0.80	195	146	98	782	1024	0.80	0	8.50
11.	10-RHA-0.62	195	284	32	735	1024	0.62	0	9.80
12.	20-RHA-0.62	195	252	63	730	1024	0.62	0	8.70
13.	30-RHA-0.62	195	221	95	725	1024	0.62	0	10.30
14.	40-RHA-0.62	195	189	126	720	1024	0.62	0	9.50
15.	10-RHA-0.53	257	437	49	650	1024	0.53	81	12.00
16.	20-RHA-0.53	257	388	97	642	1024	0.53	72	11.50
17.	30-RHA-0.53	257	340	146	634	1024	0.53	91	9.50
18.	40-RHA-0.53	257	291	194	627	1024	0.53	130	10.50
19.	10-RHA-0.50	267	480	53	635	1024	0.50	57	9.30
20.	20-RHA-0.50	267	426	107	627	1024	0.50	72	10.50
21.	30-RHA-0.50	267	373	160	618	1024	0.50	91	8.50
22.	40-RHA-0.50	267	320	213	610	1024	0.50	130	10.20
23.	10-RHA-0.48	195	365	41	660	1024	0.48	0	11.20
24.	20-RHA-0.48	195	325	81	654	1024	0.48	0	10.70
25.	30-RHA-0.48	195	284	122	647	1024	0.48	0	9.20
26.	40-RHA-0.48	195	244	162	641	1024	0.48	0	8.50
27.	10-RHA-0.45	198	395	44	663	1024	0.45	86	11.00
28.	20-RHA-0.45	198	351	88	656	1024	0.45	91	10.20
29.	30-RHA-0.45	198	307	132	649	1024	0.45	98	8.50
30.	40-RHA-0.45	198	263	176	642	1024	0.45	120	8.80

2. การผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 192/C192M-95 Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory

3. การทดสอบค่าการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 143/90a Standard test method for slump of hydraulic cement concrete

4. ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร และคอนกรีตรูปลูกบาศก์ ขนาด 150x150x150 มิลลิเมตร

5. การทดสอบกำลังอัดด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยค้อนกระแทก

### 3.4 การวัดหาค่าการกักความร้อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ตัวอย่างในการใช้ทดสอบหาค่าการกักความร้อน ใช้คอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ที่มีการใส่เหล็กเสริมขนาด 12 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตจะถูกแช่ไว้ในคลอรีนรอยละ 3.5 ของน้ำหนัก และแช่ในน้ำธรรมดา

#### วิธีการทำเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า

##### วัสดุที่ใช้

1. ท่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว
2. ฝาปิดท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว จำนวน 2 ฝา
3. เพลาทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร
4. สายไฟ
5. ฟองน้ำ
6. สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตอิ่มตัว

##### วิธีการทำ

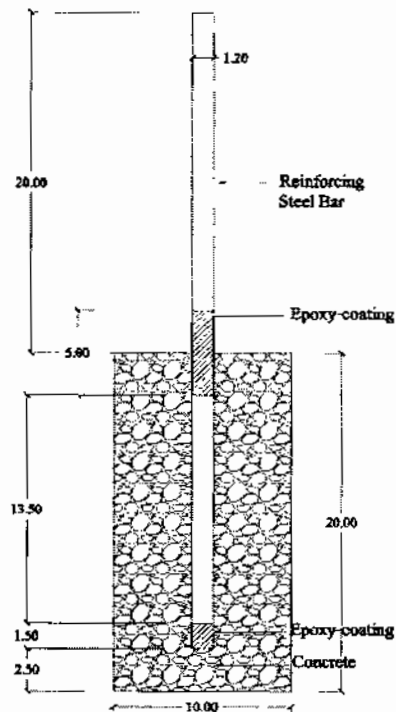
1. ตัดท่อท่อ PVC ที่มีขนาด 1 นิ้ว ยาว 20 เซนติเมตร
2. ใช้เพลาทองแดงขนาด 9 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ความยาว 15 เซนติเมตร
3. ใช้ฝาปิดท่อ ปิดที่ท่อ PVC ก่อนหนึ่งด้าน แล้วทำการเจาะรูที่ฝาท่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นปิดรูด้วยฟองน้ำ
4. ใช้เพลาทองแดงต่อกับสายไฟ แล้วนำไปต่อกับฝาปิดท่ออีกด้านทากาวให้ติดแน่น
5. เตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตอิ่มตัว แล้วก็นำมาใส่กับอุปกรณ์ที่เตรียมไว้

### ขั้นตอนการวัดมีดังนี้

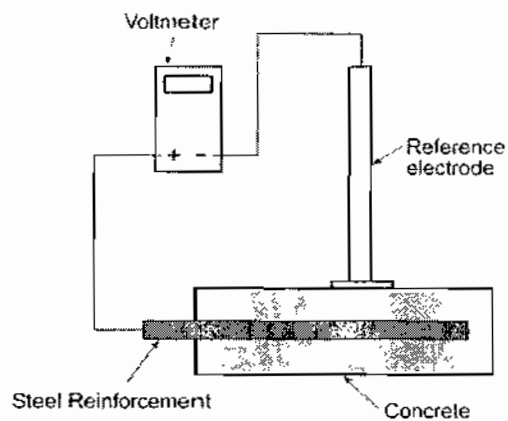
1. ต่อสายไฟฟ้ากับเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยค่าความต้านทานของรอยต่อต้องต่ำเพียงพอและไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานของทั้งวงจร โดยควรขัดผิวเหล็กเสริมและสายไฟฟ้าก่อนเชื่อมต่อและสายไฟฟ้าที่ต่อจากเหล็กเสริมต้องเชื่อมกับขั้วบวกของมาตรวัดศักย์ไฟฟ้า
2. เชื่อมต่อสายไฟเข้าระหว่างครึ่งเซลล์ และเครื่องมือวัดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยเชื่อมต่อปลายด้านหนึ่งของสายไฟฟ้ากับครึ่งเซลล์ และปลายอีกด้านหนึ่งเข้ากับขั้วลบของมาตรวัดศักย์ไฟฟ้า
3. วัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยค่าความต่างศักย์ครึ่งเซลล์ที่อ่านได้ต้องมีความละเอียดในระดับ 0.01 โวลต์ และทำการวัดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง



ภาพประกอบ 2 ชุดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3 รูปตัดตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพประกอบ 4 การต่อวงจรศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ที่มา: ([http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/ctu\\_sc\\_n18](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/ctu_sc_n18))

### 3.5 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

เตรียมตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์มีขนาด  $15 \times 15 \times 15$  เซนติเมตร ซึ่งทำการหล่อคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 192 ที่ได้กำหนดให้หล่อคอนกรีตลงแบบมาตรฐานเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรคอนกรีตเท่าๆกัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 61 เซนติเมตร โดยชั้นที่ 2 และ 3 ต้องกระทุ้งให้ทะลุลงไปยังชั้นที่ต่ำกว่าประมาณ 2.5 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องเมื่อครบทั้ง 3 ชั้นแล้วจึงทำการปาดหน้าผิวของคอนกรีตให้เรียบและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่รบกวนจนคอนกรีตแข็งตัว ทำการถอนแบบเมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่ในน้ำที่ผสมคลอรีไรต์ และแซ็ในน้ำธรรมดา เมื่อครบกำหนด 1 สัปดาห์จึงทำการทดสอบกำลังด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) มีวิธีการใช้งานดังนี้

1. ทำการกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าการสะท้อน โดยควรเป็นบริเวณผิวคอนกรีตที่ไม่มีรอยแตกร้าวหรือการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต และทำการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยก้อนหินขัด

ข้อแนะนำ ในกรณีที่โครงสร้างมีชั้นปูนฉาบให้ทำการสกัดชั้นปูนฉาบออกก่อนทำการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยหินขัด

2. ตรวจสอบแท่งเหล็กของค้อนกระแทกให้ยื่นในลักษณะพร้อมทดสอบ

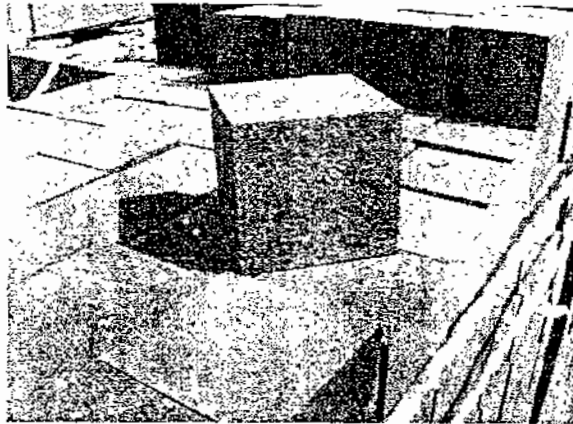
3. จับค้อนกระแทกอย่างมั่นคงให้แกนของค้อนกระแทกตั้งฉากกับผิวคอนกรีต

4. ค่อยๆกดค้อนกระแทกเข้าหาผิวคอนกรีต จนกระทั่งมีการสะท้อนของก้อนเหล็กภายในค้อนกระแทกแท่งเหล็กจะถูกผลักโดยอัตโนมัติ

5. อ่านค่าการสะท้อน (Rebound Number) จากมาตรวัดของค้อนกระแทก โดยให้อ่านค่าจำนวนเต็มทีใกล้เคียงมากที่สุด

6. สำนวจดูความเสียหายของผิวคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกระแทกของค้อนกระแทก กรณีพบความเสียหายอันเชื่อได้ว่ามาจากข้อบกพร่องของคอนกรีต ณ บริเวณที่ทดสอบ เช่น ฟองอากาศขนาดใหญ่ เป็นต้น ให้บันทึกรายละเอียดเพิ่มเติม หรือยกเลิกการใช้ค่าการสะท้อนที่วัดได้ ณ ตำแหน่งนี้

7. บันทึกค่าการกระแทกที่วัดได้ และทดสอบจุดต่อไปโดยให้มีระยะห่างระหว่างจุดที่ทดสอบไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างคอนกรีต

ที่มา: (<http://www.4shared.com/web/preview/doc/hpCsDwfK>)



ภาพประกอบ 6 ค้อนกระแทก (Schmidt Hammer)

ที่มา: (<http://ar.aliexpress.com>)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ผลการวัดค่าการกักความร้อนเหล็กเสริมจากคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบในอัตราส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

##### เถ้ากลบ

ใช้เถ้ากลบที่นำมาจากโรงสีข้าวทองมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม แล้วนำมาทดสอบพบว่าปริมาณที่ค้ำงบนตระแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3.48 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.27

##### ทราย

ใช้ทรายที่มีขนาดละเอียด ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 136 และอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ผลการทดสอบทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73

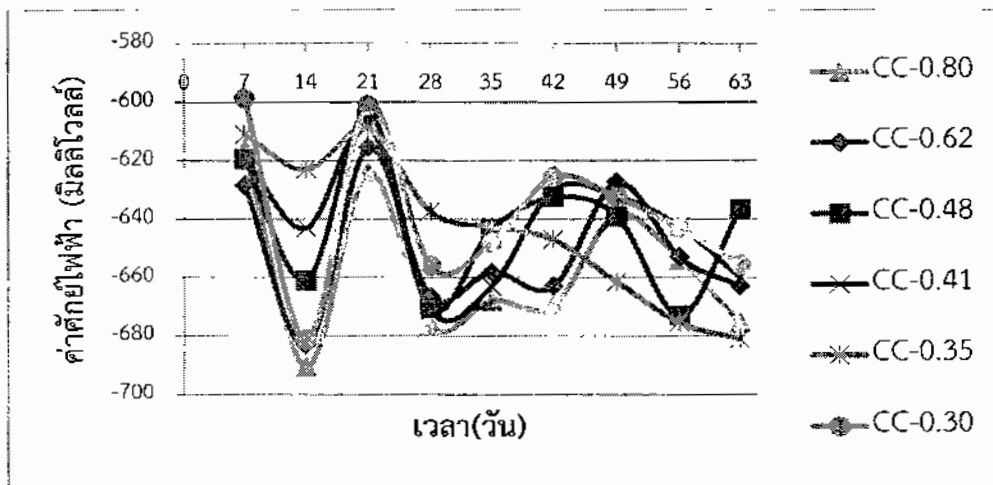
##### หิน

ใช้หินขนาดใหญ่ที่สุด 20 มม. ซึ่งมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.15 การกระจายขนาดของหินตามมาตรฐาน ASTM C 136 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินตามมาตรฐาน ASTM C 128 ซึ่งพบว่าหินมีความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72 มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.63 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งเท่ากับ 1632.22 และปริมาณช่องว่างมวลรวมร้อยละ 39.85

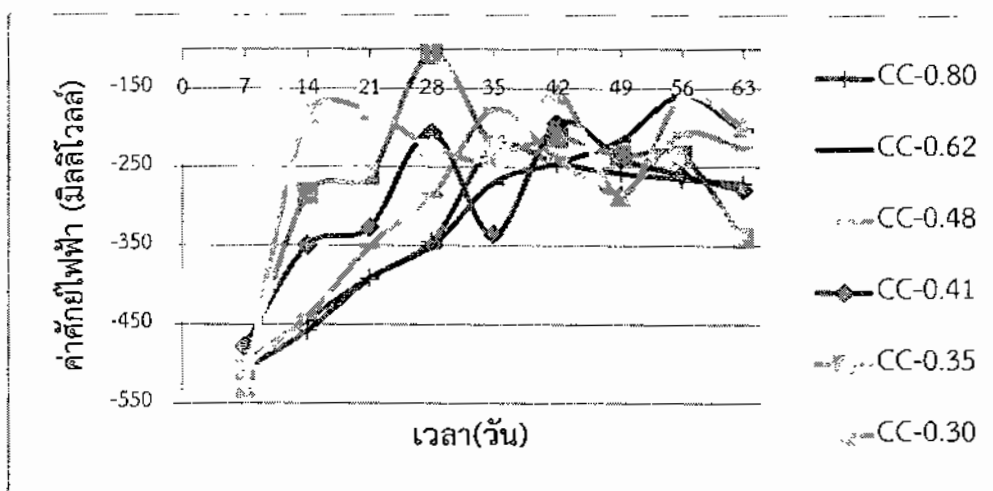
## 4.2 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

### 4.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุม

ในคอนกรีตควบคุมที่มี W/C เท่ากับ 0.80, 0.62, 0.48, 0.41, 0.35 และ 0.30 มีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 63 วัน คอนกรีตที่แช่คลอไรด์แสดงในภาพประกอบ 7 และ คอนกรีตที่แช่น้ำแสดงในภาพประกอบ 8 พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงแรกจะมีค่าที่ยังไม่ถึง เนื่องจากความชื้นในก้อนตัวอย่างแต่พอหลังจาก 35 วัน พบว่าค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าจะค่อนข้างคงที่ และไปในทิศทางเดียวกัน และจะเห็นว่าคอนกรีตที่ W/C เท่ากับ 0.30 จะมีค่าความต่างศักย์ที่น้อยกว่า คอนกรีตที่ W/C อัตราส่วนอื่น ซึ่งกรณีที่ก้อนตัวอย่างแช่คลอไรด์จะมีค่าความต่างศักย์มากกว่าก้อน ตัวอย่างที่แช่ในน้ำเพราะว่าคลอไรด์มีการกัดกร่อนมากกว่าน้ำ และพบว่าแนวโน้มของค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อค่า W/C ลดลง



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุมในตัวอย่างที่แช่ในคลอไรด์

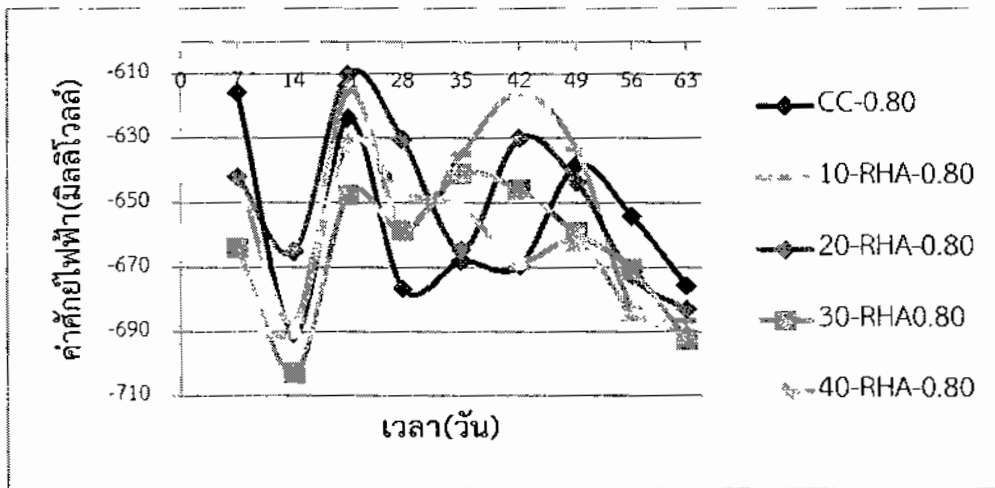


ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตควบคุมในตัวอย่างที่แช่ในน้ำ

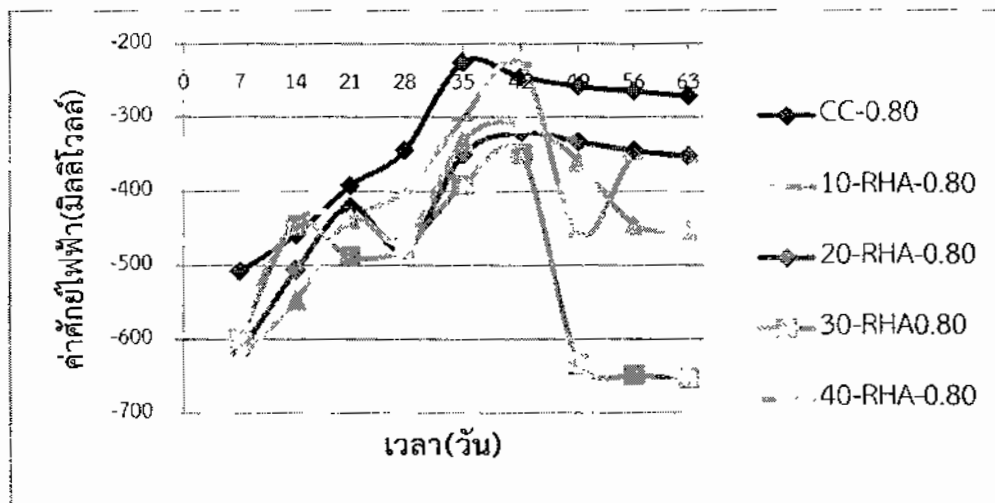
#### 4.2.2 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

ในกรณีนี้เป็นการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีต ที่มีการผสมเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.80, 0.62, 0.23, 0.50, 0.48 และ 0.45 ซึ่งคอนกรีตจะถูกแชไว้ในคลอไรด์และในน้ำ เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบที่สูงกว่าจะให้ความต่างศักย์ที่สูงกว่าโดยคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10-20 จะสามารถลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ดีและมีค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 9 – 20 เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของกราฟตัวอย่างคอนกรีตค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีตที่แช่ในคลอไรด์จะมีค่าค่อนข้างมากกว่าคอนกรีตที่แช่ในน้ำ เพราะน้ำมีการกัดกร่อนน้อยกว่าคลอไรด์

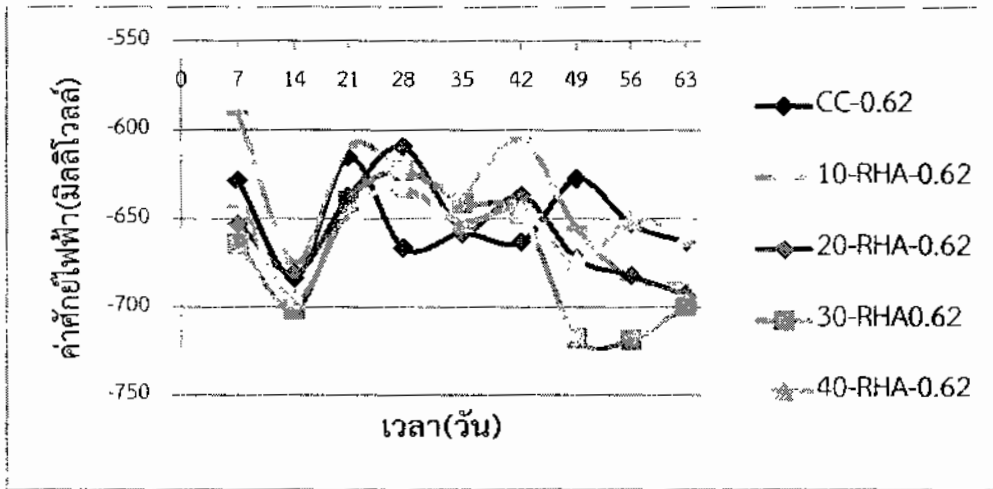
คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีความสามารถในการลดค่าความต่างศักย์ได้ดีที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 19 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 10-RHA-0.45 และเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมจะเห็นว่า ส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่างนี้ สามารถลดความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมอีกด้วย เพราะเถ้าแกลบมีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์



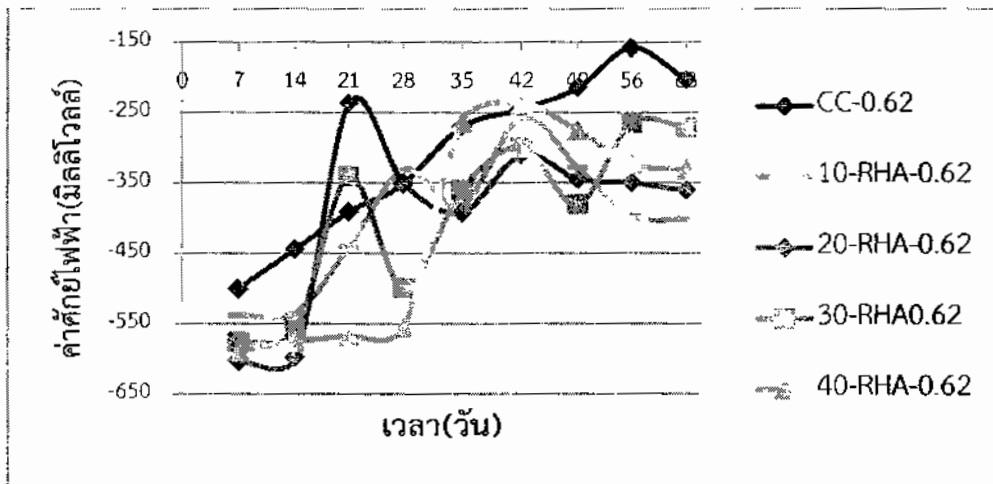
ภาพประกอบ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในคลอไรด์



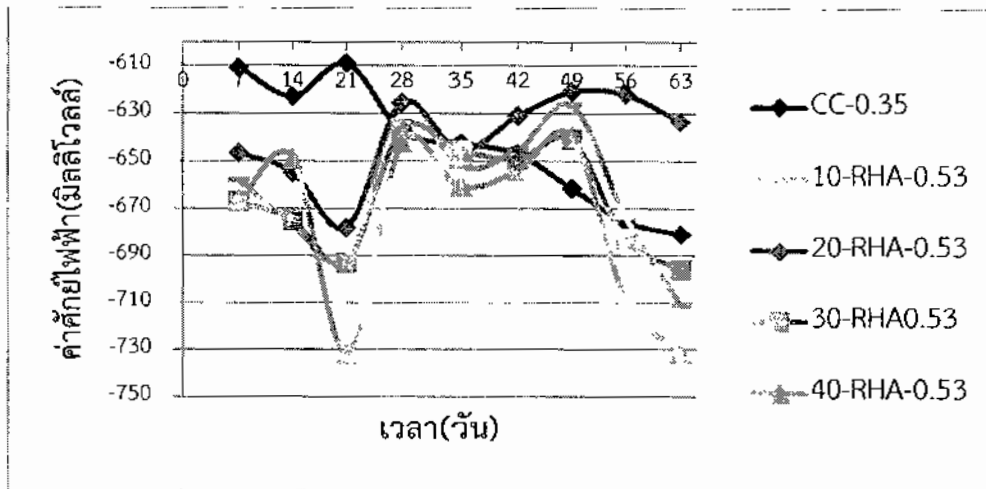
ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในน้ำ



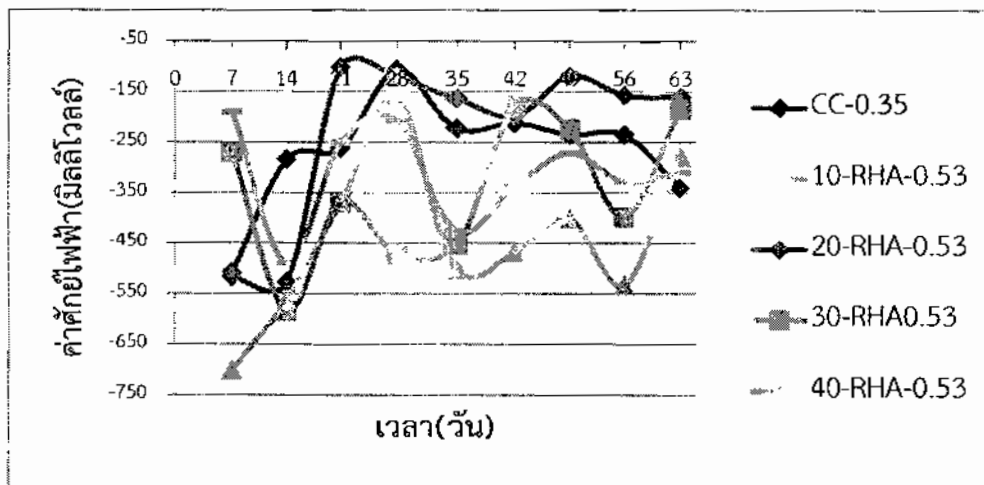
ภาพประกอบ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่ แชนในคลอไรด์



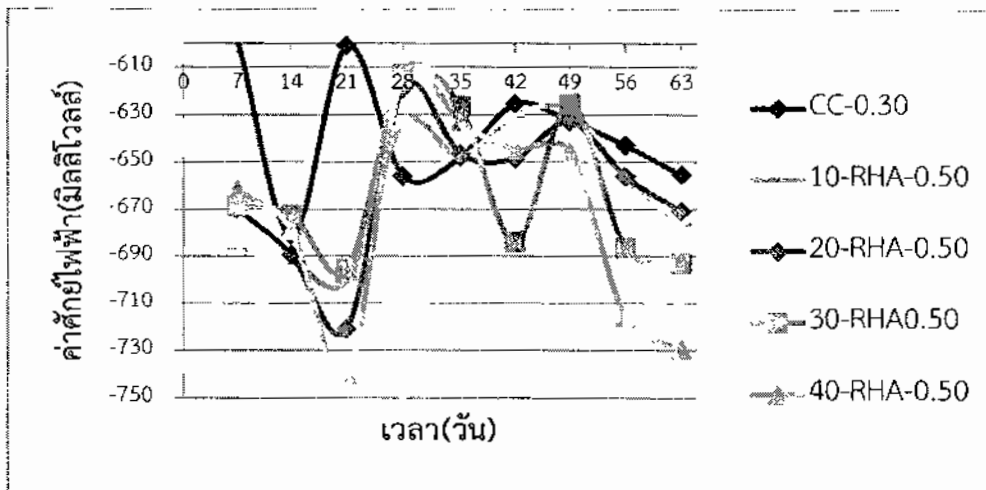
ภาพประกอบ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่ แชนในน้ำ



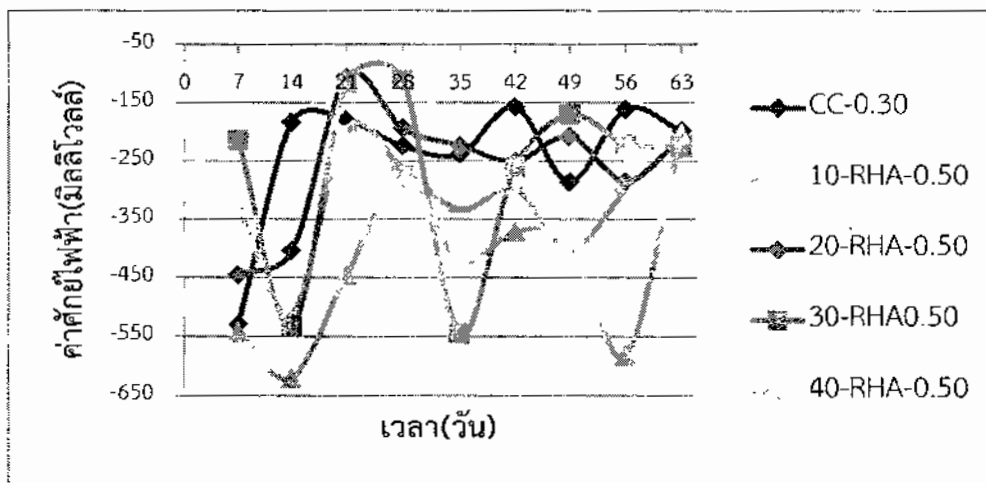
ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แซนไคลอไรด์



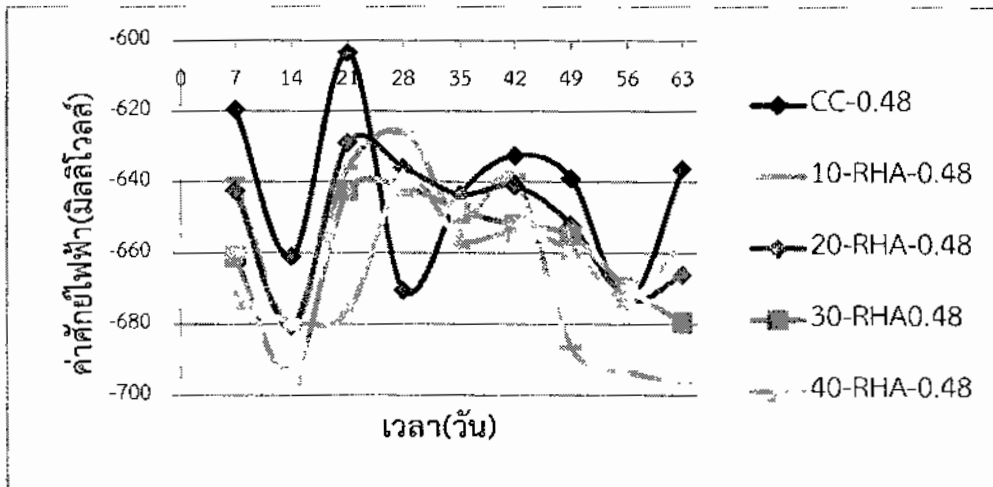
ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แซนน้ำ



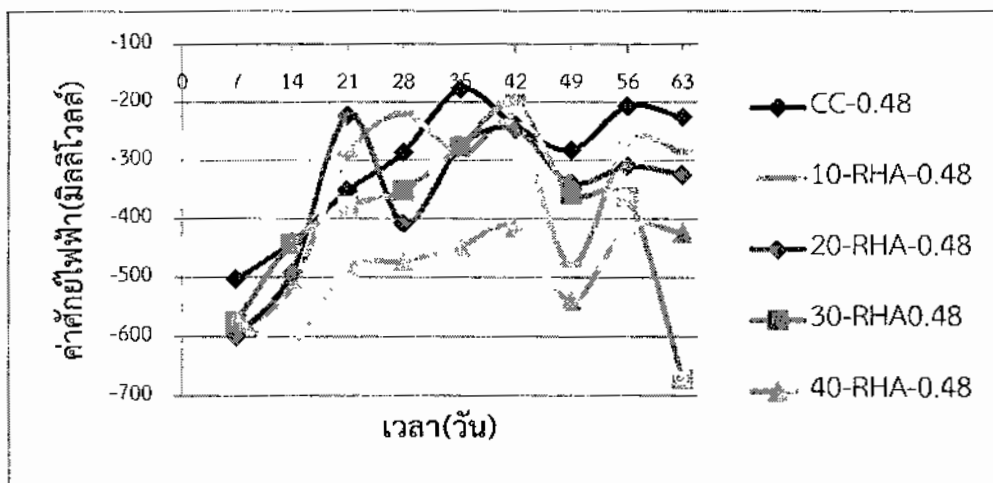
ภาพประกอบ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซในคลอไรด์



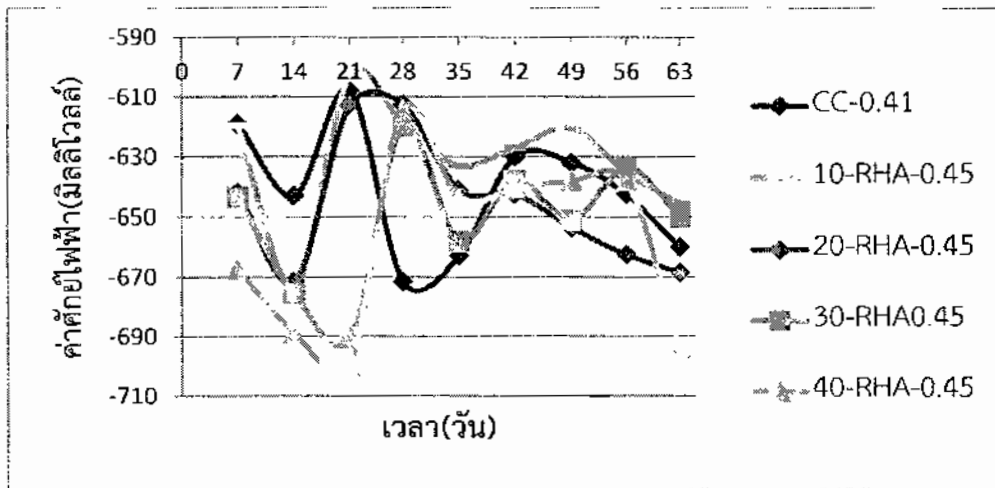
ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซในน้ำ



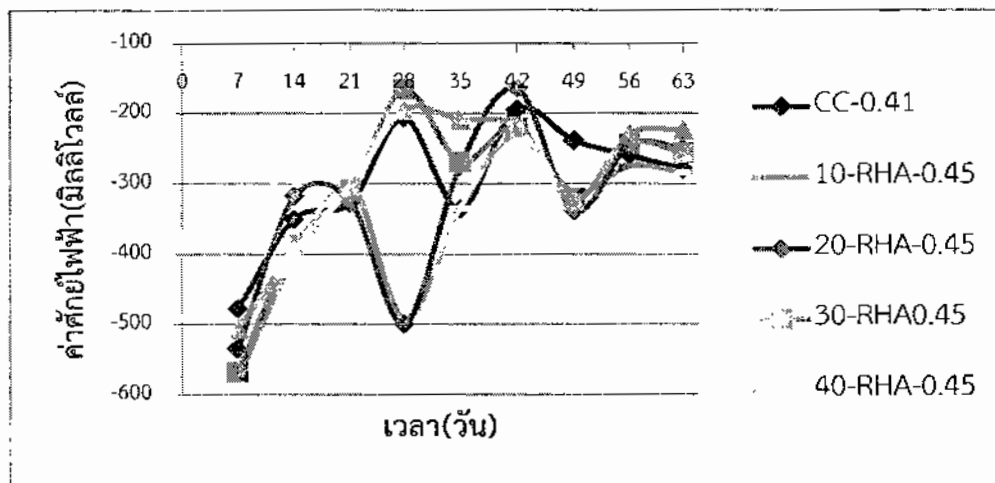
ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่ แห้งในคลอไรด์



ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่ แห้งในน้ำ



ภาพประกอบ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ที่ แห้งในคลอไรด์



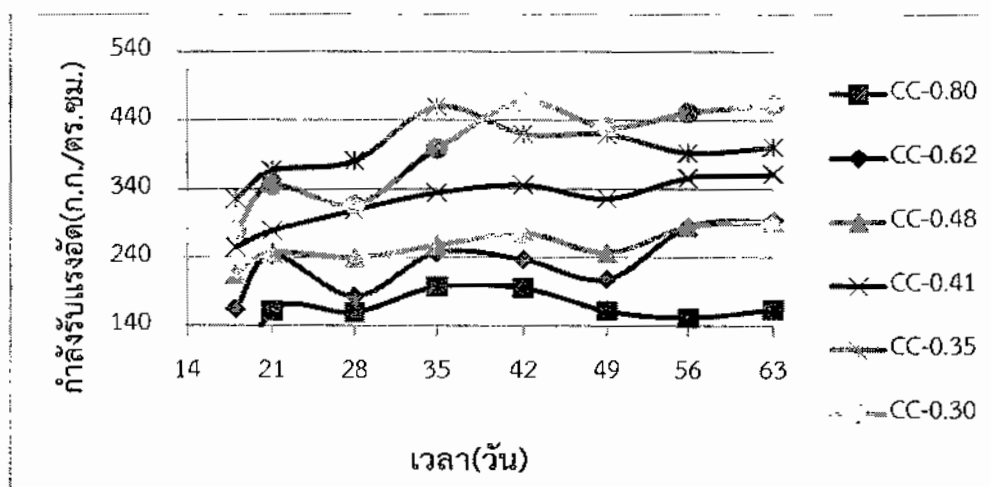
ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าในตัวอย่างที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ที่ แห้งในน้ำ

### 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

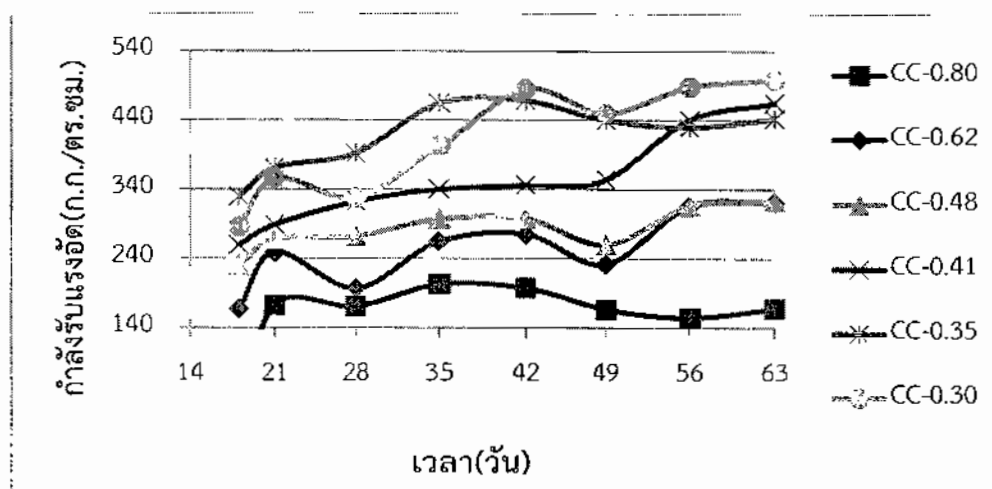
#### 4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม

เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแช่ในคลอไรด์และแช่ในน้ำในภาพประกอบ 21 - 32 พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลา 35 วัน และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแช่ในน้ำจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่แช่ในคลอไรด์ เนื่องจากคอนกรีตที่แช่ในคลอไรด์จะถูกความเป็นกรดของคลอไรด์กัดกร่อนผิวคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดที่ผิวคอนกรีตลดลง

ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตค่อนข้างจะมีผลกับความสามารถในการลดค่าความต่างศักย์ เพราะเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 7 จะเห็นว่า เมื่อกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้นค่าความต่างศักย์จะมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่แช่ในคลอไรด์



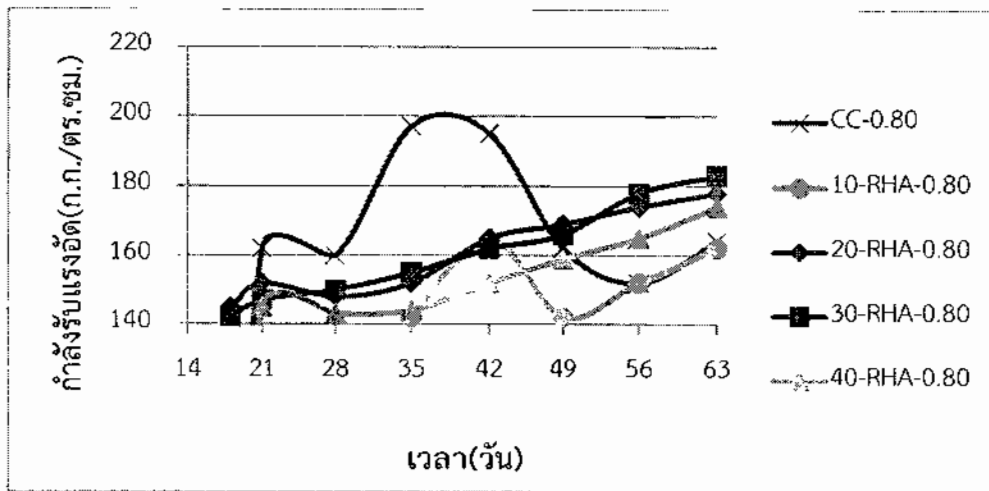
ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุมที่แช่น้ำ

#### 4.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

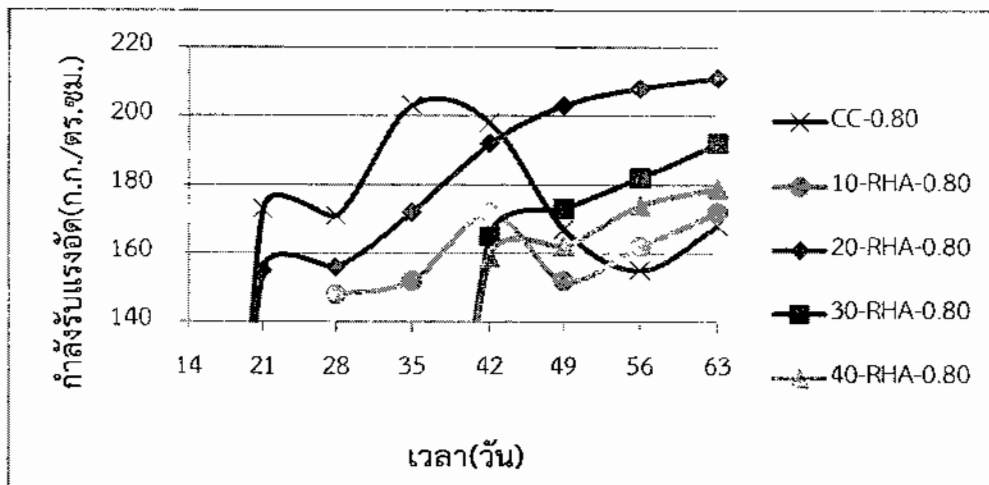
ในการวัดกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 23 ในการวัดค่ากำลังรับแรงอัดนี้ทำโดยวิธีค้อนกระแทก ซึ่งจะเป็นการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในบางครั้งค่าที่ได้อาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากค่าความชื้นในก้อนคอนกรีตที่ไม่เท่ากันจึงทำให้ค่าของกำลังรับแรงอัดแตกต่างกันมาก ดังภาพประกอบ 33

เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมจะเห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทั้งสองกรณีมีค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในร้อยละการแทนที่เท่ากับ 10 – 20 จะได้กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ดังภาพประกอบ 33

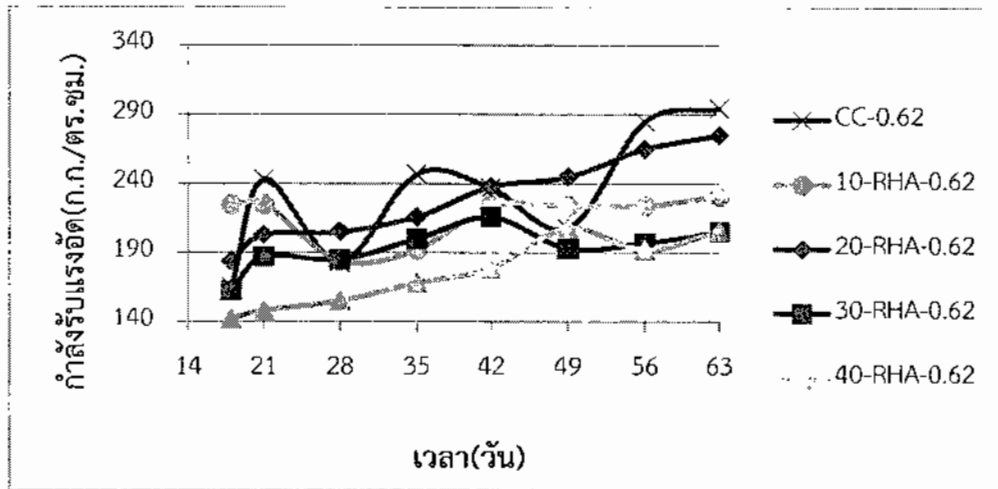
ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีผลต่อความสามารถในการลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ เพราะเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่ามากขึ้นค่าความต่างศักย์จะลดลง เมื่อพิจารณาในภาพประกอบ 23 พบว่า ที่อัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบร้อยละ 20 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุด และมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำที่สุดเช่นกัน ดังภาพประกอบ 9



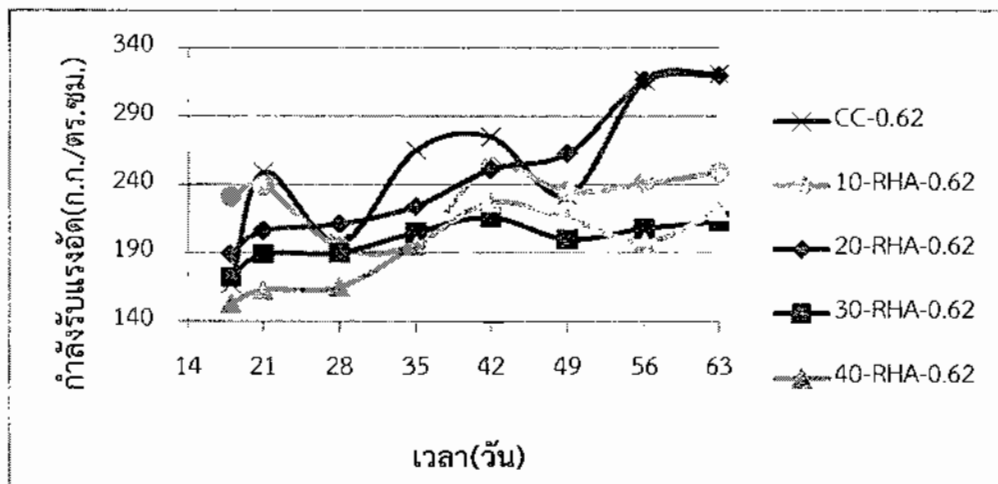
ภาพประกอบ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในคลอไรด์



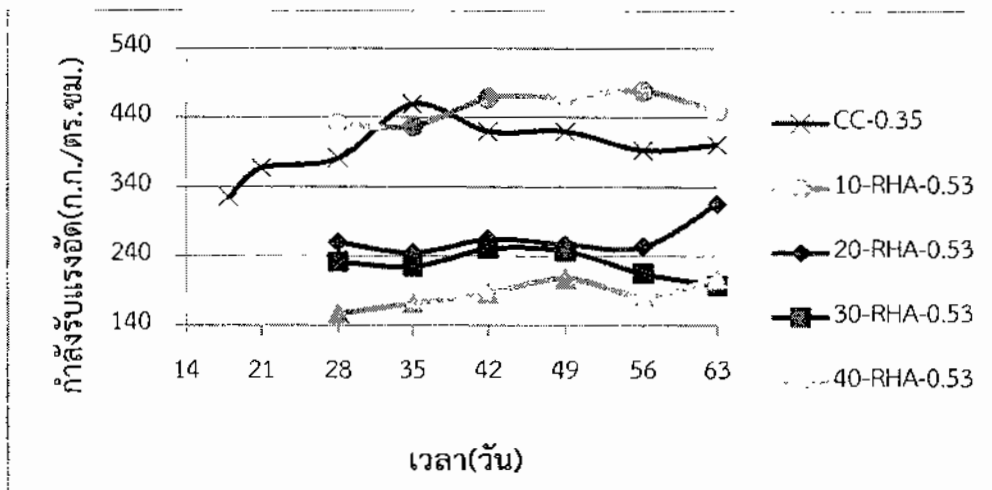
ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.80 ที่แช่ในน้ำ



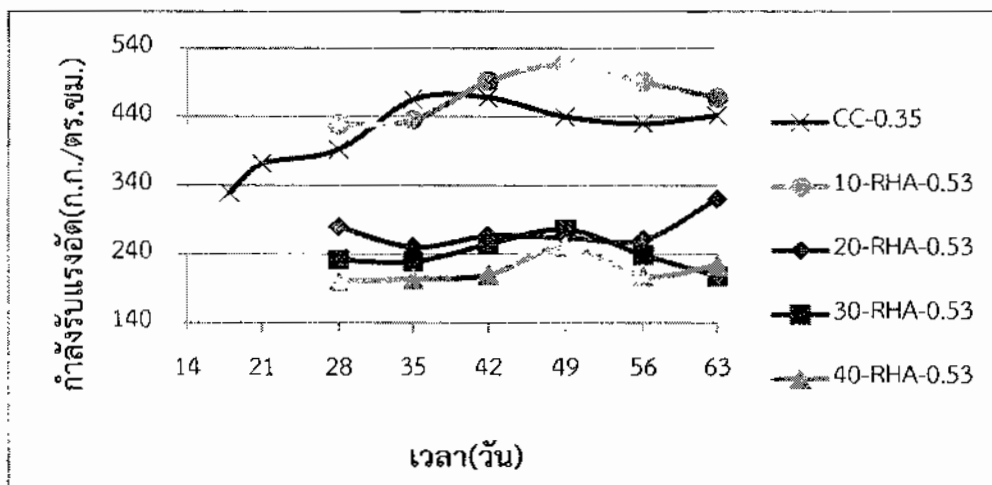
ภาพประกอบ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แช่ในคลอรีด



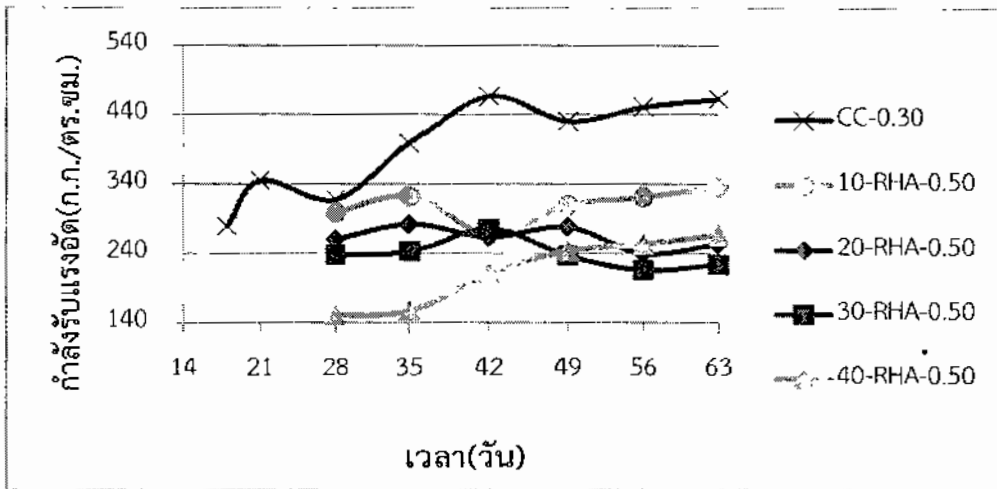
ภาพประกอบ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.62 ที่แช่ในน้ำ



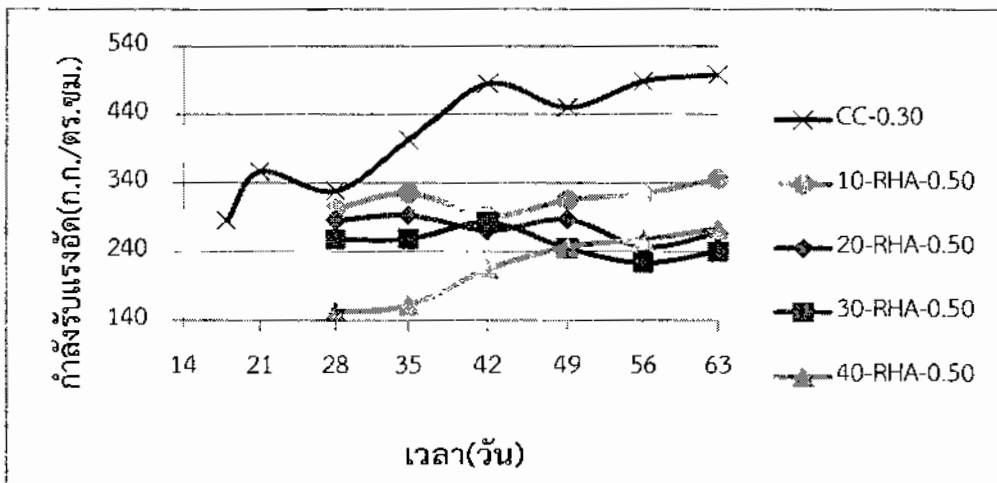
ภาพประกอบ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แช่ในคลอไรด์



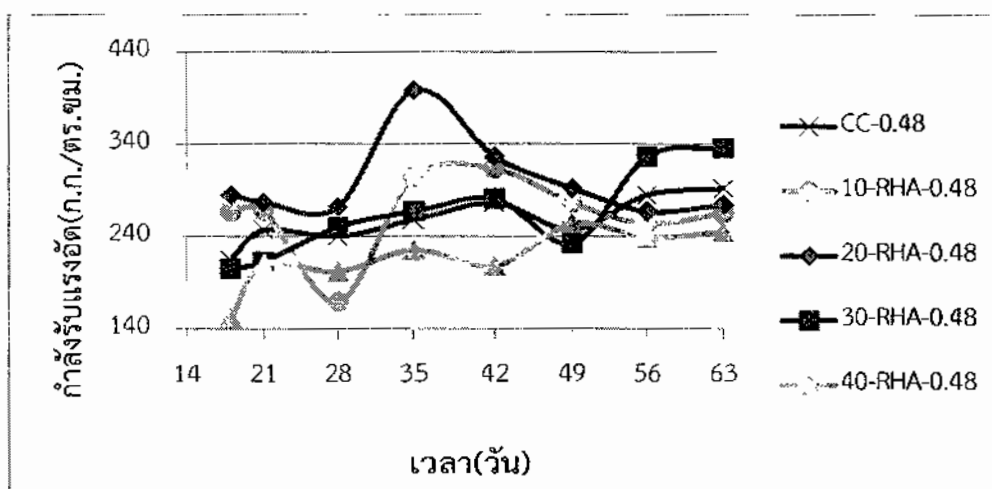
ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.53 ที่แช่ในน้ำ



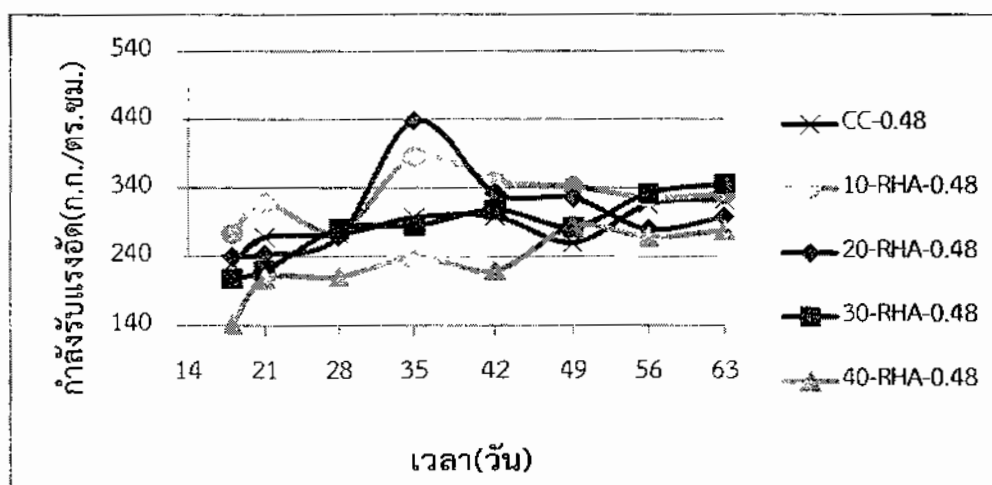
ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา curing กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซนคลอไรด์



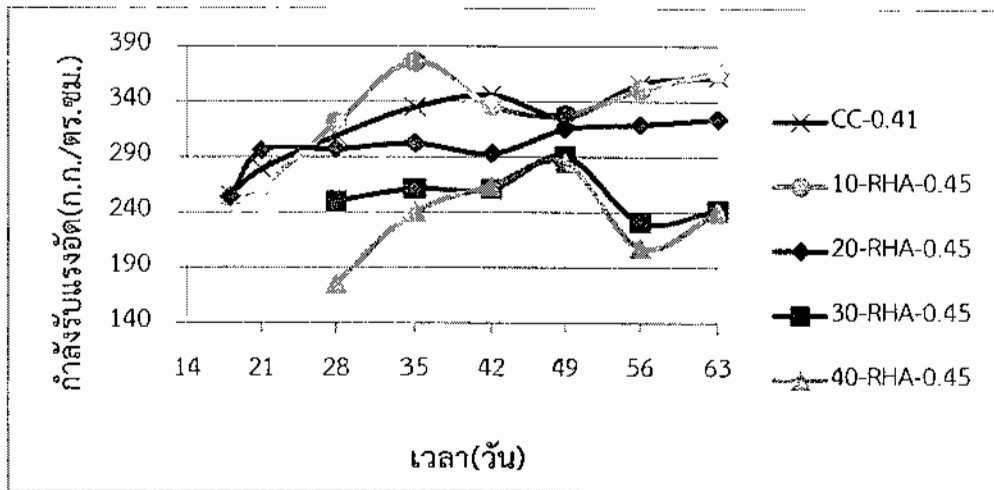
ภาพประกอบ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา curing กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.50 ที่แซนน้ำ



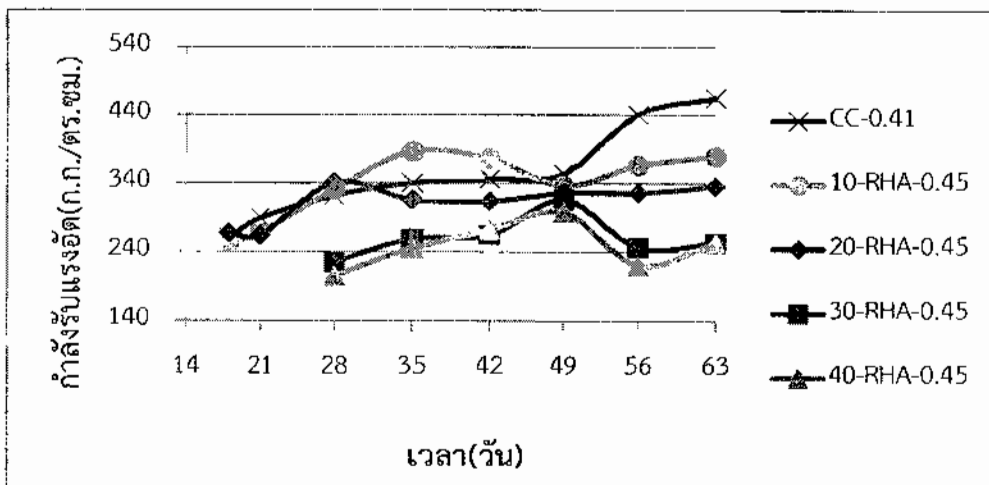
ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่แช่ในคลอไรด์



ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาบ่มกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.48 ที่แช่ในน้ำ



ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.45 ที่แช่ในคลอไรด์



ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่ W/B เท่ากับ 0.45 ที่แช่ในน้ำ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ผลการทดสอบการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากตัวอย่างคอนกรีตที่มีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.80, 0.62, 0.53, 0.50, 0.48, 0.45 ทำการทดสอบในระยะเวลา 63 วัน มีผลสรุปดังนี้

1. เมื่ออัตราส่วน W/C ลดลง ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงด้วย โดยปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 ถึง 20 มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด และอัตราส่วนที่มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดคือ 10 RHA 0.53 รับกำลังอัดได้ 428 – 516 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยตัวอย่างที่แช่ด้วยคลอไรด์มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่าตัวอย่างที่แช่ด้วยน้ำ

3. เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 ถึง 20 ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำที่สุด คืออยู่ระหว่าง 580 – 965 มิลลิโวลต์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบการวัดความต่างศักย์ของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่แช่ในคลอไรด์ควรใช้น้ำสะอาดล้างก้อนคอนกรีตก่อนทำการวัดทุกครั้ง และควรใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดมากพอหรือโวลต์มิเตอร์ที่สามารถวัดค่าได้ในหน่วยมิลลิโวลต์

2. ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก ตำแหน่งที่ใช้ค้อนควรให้มีระยะห่างประมาณ 2.5 เซนติเมตร เพราะผิวคอนกรีตบริเวณที่กดไปแล้วจะสูญเสียกำลังรับแรงอัด อาจทำให้ค่าที่วัดคลาดเคลื่อนได้ และแนะนำให้คอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน ก่อนทำการลงแช่ในคลอไรด์และน้ำสะอาด เพื่อกำลังรับแรงอัดจะใกล้เคียงตามที่ยกแบบไว้

3. ควรเลือกวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นมาเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ และวัดการกัดกร่อนเหล็กเสริมจากคลอไรด์เปรียบเทียบกับข้อดีข้อเสียของแต่ละชนิด

4. ควรเลือกวิธีการวัดการกักความร้อนเหล็กเสริมจากคลอไรด์วิธีอื่นๆ เปรียบเทียบกับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เพื่อให้ผลการทดลองมีความชัดเจนยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- ชยพัทธ์ ทิพย์โพธิ์. *การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตและการป้องกันโดยใช้สารเคลือบผิวกันสนิมของโครงสร้างอาคารหล่อเย็นโรงไฟฟ้าบางปะกง*. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- ณัฐพล เพ็ญธนาลัย และณัฐวุฒิ ธนศรีวัฒนา. *การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมแก้วกลบ*. วิทยานิพนธ์ วศ.บ. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2549.
- มาตรฐานการโยธาและผังเมือง. *มยผ. 1502-มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย*. วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2557; ได้จาก [http://eservices.dpt.go.th/eservice\\_5/standard/data/sdw/1501/1502.pdf](http://eservices.dpt.go.th/eservice_5/standard/data/sdw/1501/1502.pdf).
- มาตรฐานการโยธาและผังเมือง. *มยผ 1506-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย*. วิธีทดสอบหาค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม (Half-Cell Potential) สืบค้นเมื่อ วันที่ 28 ตุลาคม 2557; ได้จาก [http://eservices.dpt.go.th/eservice\\_5/standard/data/sdw/1501/1506.pdf](http://eservices.dpt.go.th/eservice_5/standard/data/sdw/1501/1506.pdf)
- สิริศิลป์ กัลป์ยานกุล และคณะ. *ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่ง-เซลล์*. วิศวกรรมสาร มข. พ.ศ.2539 กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.
- สำเร็จ รักซ้อน และปริญญา จินดาประเสริฐ. *การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต*. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม 2557; ได้จาก <http://www.scribd.com/doc/19109096/การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต>
- American Society for Testing and Materials. *ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM C 876-91. Philadelphia, 1999 สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2557; ได้จาก <http://www.astm.org/Standards/C876.htm>

## ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

## ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ตาราง 5 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในคอนกรีตควบคุม

NO.	Type of Concrete	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ (mV)								
			7	14	21	28	35	42	49	56	63
1	CC-0.80	1	-616	-691	-624	-677	-668	-670	-639	-654	-676
		2	-508	-458	-392	-345	-225	-245	-258	-265	-271
2	CC-0.62	1	-629	-683	-616	-667	-658	-663	-628	-653	-663
		2	-500	-444	-391	-351	-270	-245	-215	-158	-203
3	CC-0.48	1	-620	-661	-604	-671	-644	-633	-639	-673	-637
		2	-503	-440	-351	-286	-177	-240	-282	-207	-226
4	CC-0.41	1	-619	-643	-608	-672	-663	-630	-632	-643	-660
		2	-478	-350	-327	-207	-336	-195	-239	-260	-279
5	CC-0.35	1	-611	-623	-609	-638	-643	-647	-662	-676	-681
		2	-508	-284	-261	-107	-222	-212	-235	-235	-340
6	CC-0.30	1	-599	-681	-601	-656	-648	-626	-633	-643	-656
		2	-530	-183	-179	-224	-238	-157	-286	-161	-198

หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 1 แซ่คลอไรด์ และตัวอย่างที่ 2 แซ่น้ำ

ตาราง 6 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

NO.	Type of	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ (mV)								
			7	14	21	28	35	42	49	56	63
7	10-RHA-0.80	1	-642	-687	-616	-658	-635	-616	-634	-683	-687
		2	-576	-440	-427	-400	-302	-228	-459	-354	-359
8	20-RHA-0.80	1	-642	-665	-610	-631	-665	-630	-644	-673	-683
		2	-618	-506	-420	-480	-350	-321	-333	-345	-352
9	30-RHA-0.80	1	-664	-703	-648	-659	-641	-646	-659	-671	-693
		2	-598	-445	-488	-476	-391	-350	-634	-649	-653
10	40-RHA-0.80	1	-685	-689	-632	-647	-652	-668	-662	-684	-691
		2	-624	-547	-437	-467	-332	-307	-360	-445	-452
11	10-RHA-0.62	1	-591	-675	-609	-623	-633	-606	-656	-684	-687
		2	-538	-535	-441	-331	-382	-258	-328	-397	-402
12	20-RHA-0.62	1	-653	-681	-638	-610	-656	-637	-673	-682	-693
		2	-603	-598	-236	-350	-392	-310	-345	-350	-361
13	30-RHA-0.62	1	-664	-701	-640	-623	-641	-647	-718	-719	-699
		2	-576	-559	-341	-499	-360	-299	-380	-265	-271
14	40-RHA-0.62	1	-638	-696	-646	-633	-652	-645	-674	-651	-660
		2	-589	-575	-567	-555	-264	-237	-275	-323	-331
15	10-RHA-0.53	1	-658	-677	-691	-625	-652	-645	-627	-674	-711
		2	-191	-490	-250	-207	-425	-336	-271	-328	-309
16	20-RHA-0.53	1	-647	-655	-678	-626	-645	-631	-621	-622	-634
		2	-518	-527	-102	-122	-164	-199	-119	-157	-161
17	30-RHA-0.53	1	-667	-675	-693	-637	-646	-649	-641	-683	-696
		2	-270	-585	-367	-473	-452	-179	-224	-398	-185
18	40-RHA-0.53	1	-666	-649	-732	-642	-661	-654	-640	-708	-732
		2	-701	-562	-370	-163	-502	-467	-400	-533	-278

ตาราง 6 ผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (ต่อ)

NO.	Type of	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ (mV)								
			7	14	21	28	35	42	49	56	63
19	10-RHA-0.50	1	-688	-693	-701	-634	-648	-631	-628	-657	-677
		2	-330	-511	-195	-262	-333	-299	-403	-300	-210
20	20-RHA-0.50	1	-670	-690	-721	-619	-647	-649	-633	-656	-671
		2	-445	-404	-105	-194	-223	-250	-208	-284	-211
21	30-RHA-0.50	1	-669	-673	-696	-613	-627	-684	-626	-687	-693
		2	-215	-534	-115	-112	-545	-260	-170	-220	-226
22	40-RHA-0.50	1	-662	-679	-740	-613	-633	-645	-646	-716	-730
		2	-542	-620	-446	-277	-423	-371	-387	-582	-203
23	10-RHA-0.48	1	-640	-680	-636	-626	-651	-639	-687	-694	-696
		2	-595	-515	-290	-221	-289	-240	-477	-270	-285
24	20-RHA-0.48	1	-643	-681	-629	-636	-644	-641	-652	-673	-666
		2	-600	-492	-223	-408	-276	-247	-338	-310	-324
25	30-RHA-0.48	1	-661	-695	-643	-642	-648	-652	-655	-670	-680
		2	-574	-442	-378	-352	-276	-204	-358	-363	-672
26	40-RHA-0.48	1	-673	-679	-677	-639	-656	-654	-659	-673	-657
		2	-573	-612	-483	-472	-447	-414	-539	-415	-423
27	10-RHA-0.45	1	-620	-673	-603	-619	-633	-627	-621	-636	-646
		2	-575	-405	-298	-492	-335	-230	-312	-275	-284
28	20-RHA-0.45	1	-642	-672	-613	-613	-641	-643	-654	-663	-669
		2	-535	-318	-324	-500	-275	-165	-338	-245	-250
29	30-RHA-0.45	1	-644	-676	-691	-620	-658	-638	-651	-634	-650
		2	-568	-386	-309	-166	-269	-220	-320	-243	-256
30	40-RHA-0.45	1	-668	-689	-700	-614	-644	-641	-638	-638	-694
		2	-506	-396	-305	-195	-209	-219	-324	-230	-224

หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 1 แซ่คลอไรด์ และตัวอย่างที่ 2 แซ่หน้า

ภาคผนวก ข  
ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



## ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ตาราง 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตควบคุม

NO.	Type of Concrete	ตัวอย่าง ที่	กำลังรับแรงอัด ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )							
			18	21	28	35	42	49	56	63
1	CC-0.80	1	-	162	160	197	195	162	152	164
		2	-	173	171	203	198	167	155	168
2	CC-0.62	1	165	243	183	247	237	208	285	294
		2	167	249	197	265	275	232	316	321
3	CC-0.48	1	215	247	240	258	276	247	285	292
		2	230	268	272	297	298	260	316	323
4	CC-0.41	1	255	279	309	335	346	326	356	362
		2	260	289	322	340	346	354	441	465
5	CC-0.35	1	325	367	381	459	420	420	393	401
		2	329	371	392	465	468	440	430	442
6	CC-0.30	1	279	345	317	399	466	430	451	462
		2	285	356	328	403	485	450	488	498

**หมายเหตุ** ตัวอย่างที่ 1 แซ่คลอไรด์และตัวอย่างที่ 2 แซ่น้ำ

ช่องที่มีเครื่องหมาย - แสดงว่า ค้อนกระแทกแสดงค่ากำลังรับแรงอัดไม่ได้ เนื่องจากกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าค่ากราฟที่อ่านจากค้อนกระแทก

ตาราง 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

NO.	Type of Concrete	ตัวอย่าง ที่	กำลังรับแรงอัด ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )							
			18	21	28	35	42	49	56	63
7	10-RHA-0.80	1	-	-	-	142	165	142	152	162
		2	-	-	148	152	172	152	162	172
8	20-RHA-0.80	1	145	152	148	152	165	169	174	178
		2	-	155	156	172	192	203	208	211
9	30-RHA-0.80	1	142	147	150	155	162	166	178	183
		2	-	-	-	-	165	173	182	192
10	40-RHA-0.80	1	-	145	143	144	152	159	165	174
		2	-	-	-	-	159	162	174	179
11	10-RHA-0.62	1	225	225	184	192	224	224	224	231
		2	231	239	194	197	253	235	241	249
12	20-RHA-0.62	1	184	203	205	216	238	245	265	275
		2	189	206	211	224	251	263	316	320
13	30-RHA-0.62	1	162	187	185	200	216	193	197	205
		2	172	189	190	205	216	200	208	213
14	40-RHA-0.62	1	142	148	155	168	179	208	192	206
		2	153	163	165	195	227	215	198	221
15	10-RHA-0.53	1	-	-	431	427	468	470	478	450
		2	-	-	428	435	492	516	491	468
16	20-RHA-0.53	1	-	-	260	245	265	257	254	316
		2	-	-	280	250	267	264	261	321
17	30-RHA-0.53	1	-	-	232	225	251	247	215	198
		2	-	-	232	229	255	276	239	208
18	40-RHA-0.53	1	-	-	157	172	187	208	183	208
		2	-	-	200	204	210	251	208	224

ตาราง 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (ต่อ)

NO.	Type of Concrete	ตัวอย่าง ที่	กำลังรับแรงอัด ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )							
			18	21	28	35	42	49	56	63
19	10-RHA-0.50	1	-	-	298	322	268	310	321	336
		2	-	-	302	325	292	315	325	346
20	20-RHA-0.50	1	-	-	260	282	264	278	240	254
		2	-	-	285	293	271	287	247	267
21	30-RHA-0.50	1	-	-	238	243	276	237	216	224
		2	-	-	258	259	283	245	224	240
22	40-RHA-0.50	1	-	-	151	157	211	244	254	267
		2	-	-	153	162	215	247	258	274
23	10-RHA-0.48	1	267	268	169	304	313	276	254	265
		2	273	318	276	386	349	342	326	331
24	20-RHA-0.48	1	285	277	272	398	326	292	267	274
		2	240	243	269	438	332	325	280	298
25	30-RHA-0.48	1	205	213	250	267	281	232	326	336
		2	208	220	281	285	308	283	332	346
26	40-RHA-0.48	1	152	210	202	225	208	254	239	245
		2	142	208	211	239	220	285	269	278
27	10-RHA-0.45	1	254	263	321	376	336	328	351	367
		2	254	268	331	386	376	336	366	379
28	20-RHA-0.45	1	254	296	297	302	293	315	319	324
		2	267	264	341	316	314	326	326	336
29	30-RHA-0.45	1	-	-	250	261	261	291	231	242
		2	-	-	225	259	265	316	247	254
30	40-RHA-0.45	1	-	-	175	240	264	285	208	240
		2	-	-	205	245	273	298	221	253

**หมายเหตุ** ตัวอย่างที่ 1 แซ่คลอไรด์และตัวอย่างที่ 2 แซ่น้ำธรรมดา

ช่องที่มีเครื่องหมาย - แสดงว่า ค้อนกระทกแสดงค่ากำลังรับแรงอัดไม่ได้ เนื่องจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำเกินกว่าค้อนกระทกจะอ่านค่าได้

ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

## ตาราง 9 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรง

น้ำหนักตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ 500 กรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กรัม)	น.น. ตะแกรง + น.น. ค้าง (กรัม)	น้ำหนักค้างบน ตะแกรง(กรัม)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ร้อยละค้าง สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน ตะแกรง
4	528.26	532.52	4.26	0.85	0.85	100
8	467.93	493.29	25.36	5.07	5.92	94
16	447.20	540.33	93.13	18.63	24.55	75
30	410.01	598.19	188.18	37.64	62.19	38
50	400.22	496.69	96.47	19.29	81.48	19
100	394.31	476.48	82.17	16.43	97.91	2
ถาดรอง	378.89	389.32	10.43	2.10	100	0
รวม			500	โมดูลัสความละเอียด 2.73		

ตาราง 10 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด (ทราย)

รายการ	ตัวแปร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักขวด (กรัม)	G	162.89	160.49
น้ำหนักขวด + น้ำหนักน้ำ (กรัม)	B	657.55	659.93
น้ำหนักตัวอย่างอิมตัวผิวแห้ง (กรัม)	S	500.00	500.00
น้ำหนักน้ำ + น้ำหนักตัวอย่าง + น้ำหนักขวด (กรัม)	C	964.74	967.11
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	A	493.58	494.42
ความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง)		2.56	2.56
ความถ่วงจำเพาะ (อิมตัวผิวแห้ง)		2.59	2.59
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ		2.65	2.64
ร้อยละการดูดซึ่ม		1.30	1.13
ความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง) เฉลี่ย	$A / [B+S-C]$	2.56	
ความถ่วงจำเพาะ (อิมตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย	$S / [B+S-C]$	2.59	
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย	$A / [B+A-C]$	2.64	
ร้อยละการดูดซึ่ม เฉลี่ย	$[S-A / A]*100$	1.21	

## ตาราง 11 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรง

น้ำหนักตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ 10 กิโลกรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.ก.)	น.น. ตะแกรง + น.น. ค้าง (ก.ก.)	น้ำหนักค้างบน ตะแกรง(ก.ก.)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง	ร้อยละค้าง สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน ตะแกรง
1 "	5.34	5.34	0	0	0	100
3/4 "	5.65	6.16	0.51	5.14	5.14	95
1/2 "	5.71	9.97	4.26	42.61	47.75	52
3/8 "	5.82	8.25	2.43	24.30	72.05	28
# 4	5.67	8.03	2.36	23.65	95.70	4
# 8	5.75	6.07	0.32	3.20	98.90	1
ถาดรอง	5.13	5.24	0	0	100	0
<b>รวม</b>				<b>โมดูลัสความละเอียด 7.15</b>		

ตาราง 12 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมนองมวลรวมหยาบ (หิน)

รายการ	ตัวแปร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	B	3995	3876
น้ำหนักถัง (กรัม)		624	624
น้ำหนักถัง + น้ำหนักตัวอย่างชั่งในน้ำ (กรัม)		3140	3072
น้ำหนักหินตัวอย่างในน้ำ (กรัม)	C	2516	2448
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	A	3982	3861
ความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง)		2.69	2.70
ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง)		2.70	2.71
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ		2.72	2.73
ร้อยละการดูดซึมนอง		0.33	0.39
ความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง) เฉลี่ย	$A / [B-C]$	2.70	
ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย	$B / [B-C]$	2.71	
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย	$A / [A-C]$	2.72	
ร้อยละการดูดซึมนอง เฉลี่ย	$[B-A / A]*100$	0.36	

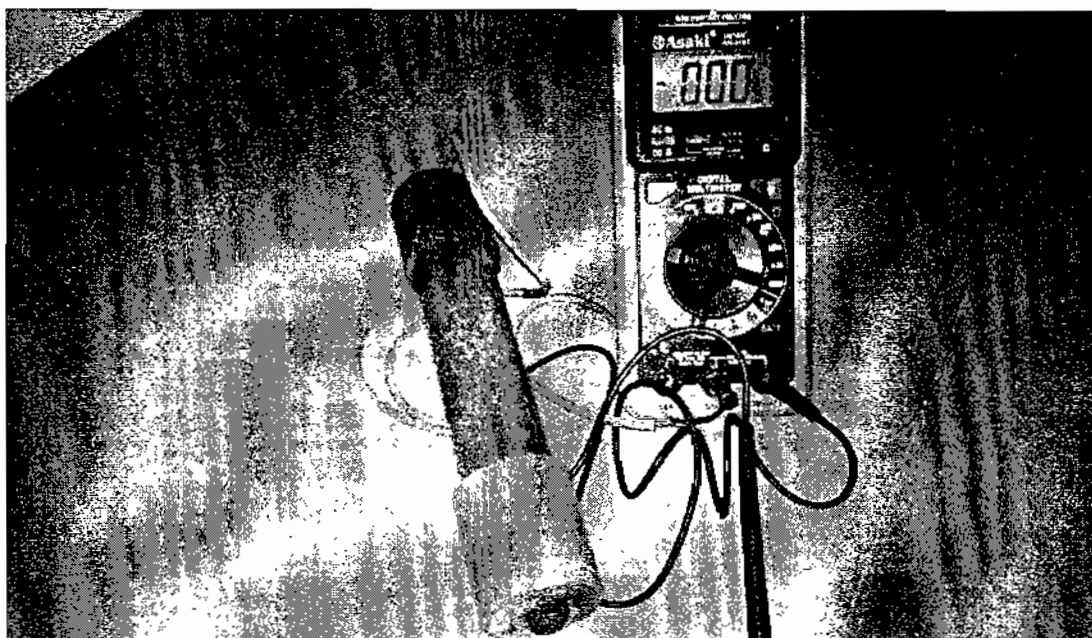
ตาราง 13 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งของหิน และปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม

รายการ	ตัวแปร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักถึง (ก.ก.)	T	3.53	2.75
น้ำหนักถึง + น้ำหนักน้ำ (ก.ก.)		6.32	5.4
น้ำหนักน้ำ (ก.ก.)		2.795	2.65
ปริมาตรของถึง (ลบ.ม.)	V	0.0028	0.0027
น้ำหนักถึง + น้ำหนักหิน (ก.ก.)	G	7.95	7.20
น้ำหนักหินตัวอย่าง (ก.ก.)		4.43	4.45
หน่วยน้ำหนักอัดแน่น (ก.ก.), M	$(G-T) / V$	1579.29	1675.11
หน่วยน้ำหนักอัดตัวผิวแห้ง (ก.ก.), $M_{SSD}$	$M*(1+A/100)$	1584.98	1679.47
ความถ่วงจำเพาะ (สภาพแห้ง)	S	2.70	2.70
ร้อยละของปริมาณช่องว่าง	$((S-W)-M/(S-W))*100$	41.36	37.81
หน่วยน้ำหนักเฉลี่ย (ก.ก.)		1632.22	
ร้อยละของปริมาณช่องว่างเฉลี่ย		39.58	

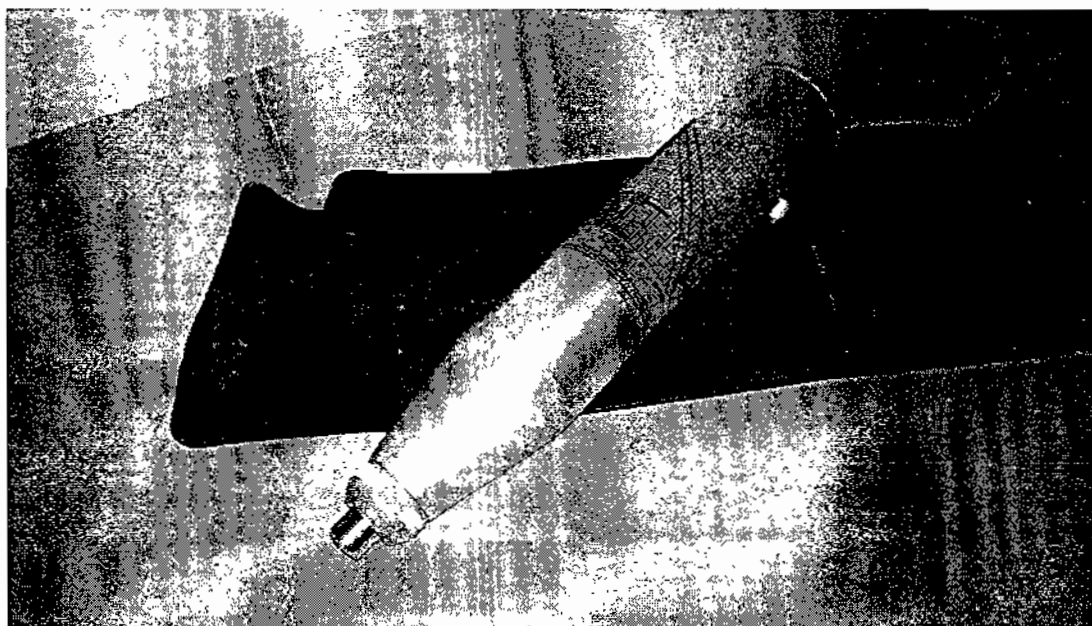
ตาราง 14 ความถ่วงจำเพาะของเก้าแกลบ

รายการ	ตัวแปร	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักน้ำมันก๊าด	V 1	319.39	340.89
น้ำหนักน้ำมันก๊าด + น้ำหนักเก้าแกลบ	V 2	367.55	387.56
ปริมาตรน้ำมันก๊าด	N 1	0.3	1.8
ปริมาตรน้ำมันก๊าด + ปริมาตรเก้าแกลบ	N 2	20.5	23.5
ความถ่วงจำเพาะ	$(V2-V1) / (N2-N1)$	2.38	2.15
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย =		2.27	

ภาคผนวก ง  
ภาพประกอบ



ภาพประกอบ 35 ชุดเครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 36 ค้อนกระแทก



ภาพประกอบ 37 เตรียมแบบหล่อคอนกรีต



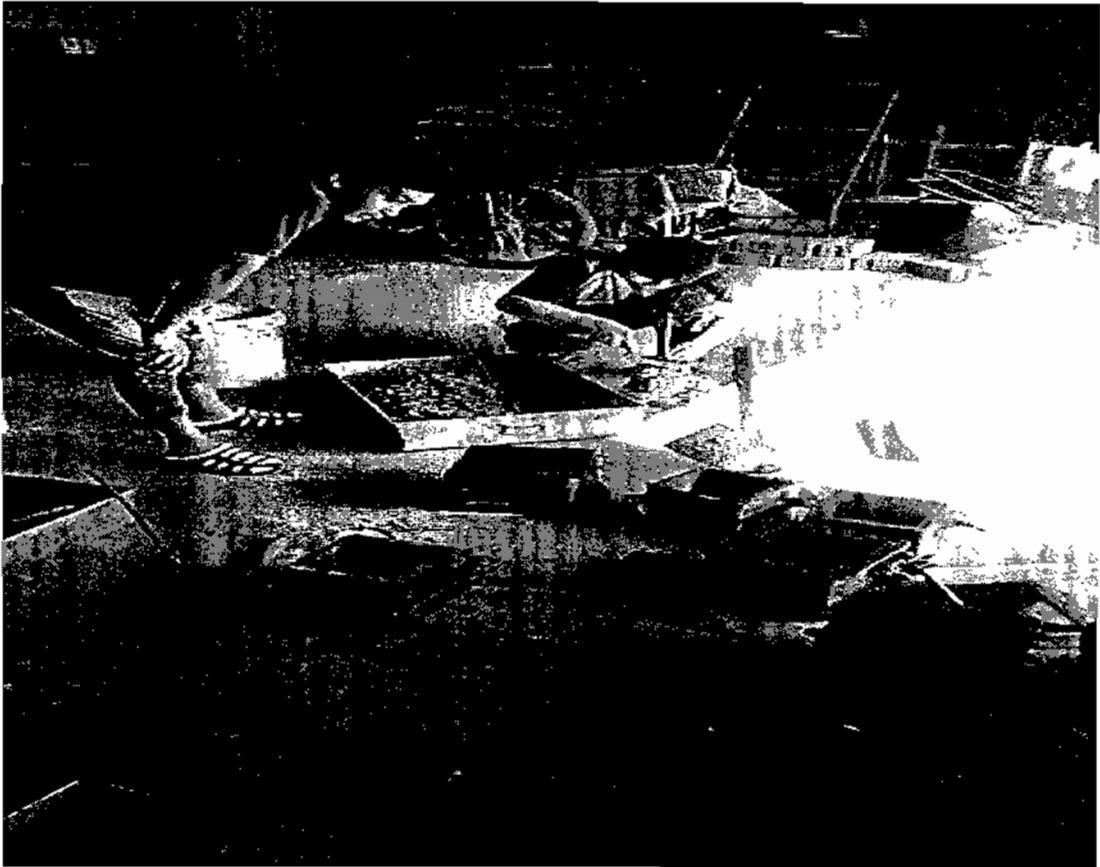
ภาพประกอบ 38 การเตรียมวัสดุ



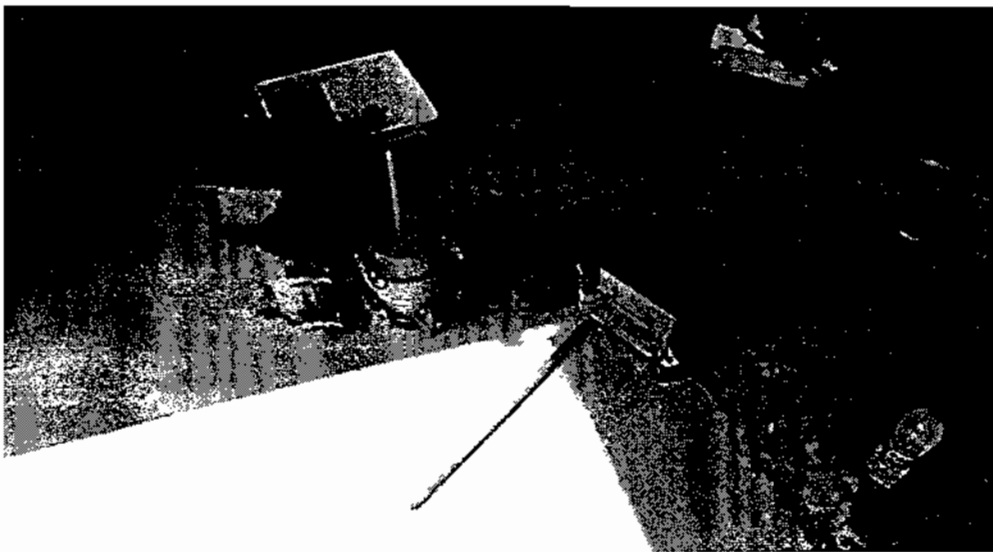
ภาพประกอบ 39 การวัดการหดตัวของคอนกรีต



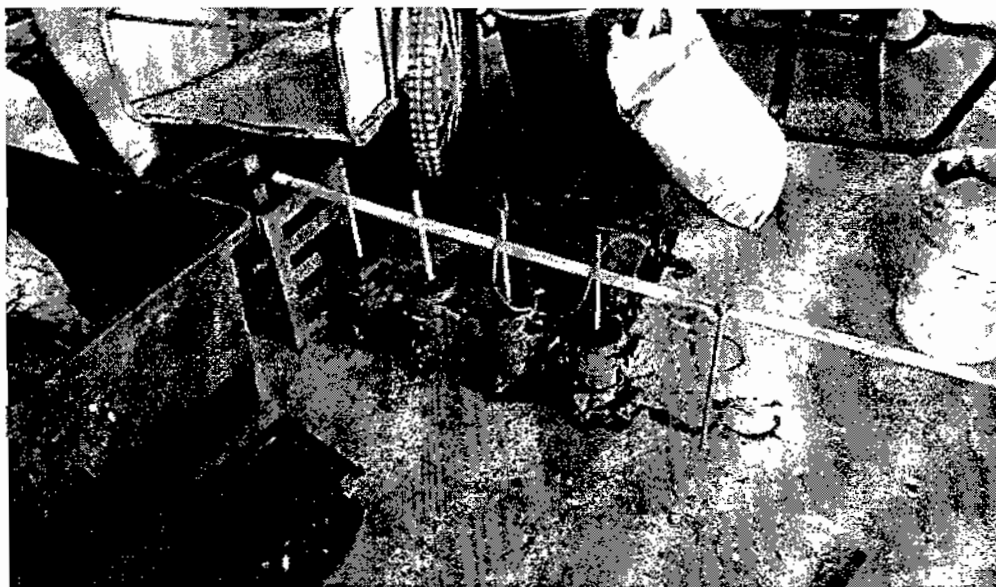
ภาพประกอบ 40 การใช้เครื่องเขย่าเพื่อให้คอนกรีตลงเต็มแบบหล่อ



ภาพประกอบ 41 การเทคอนกรีตใส่แบบหล่อ



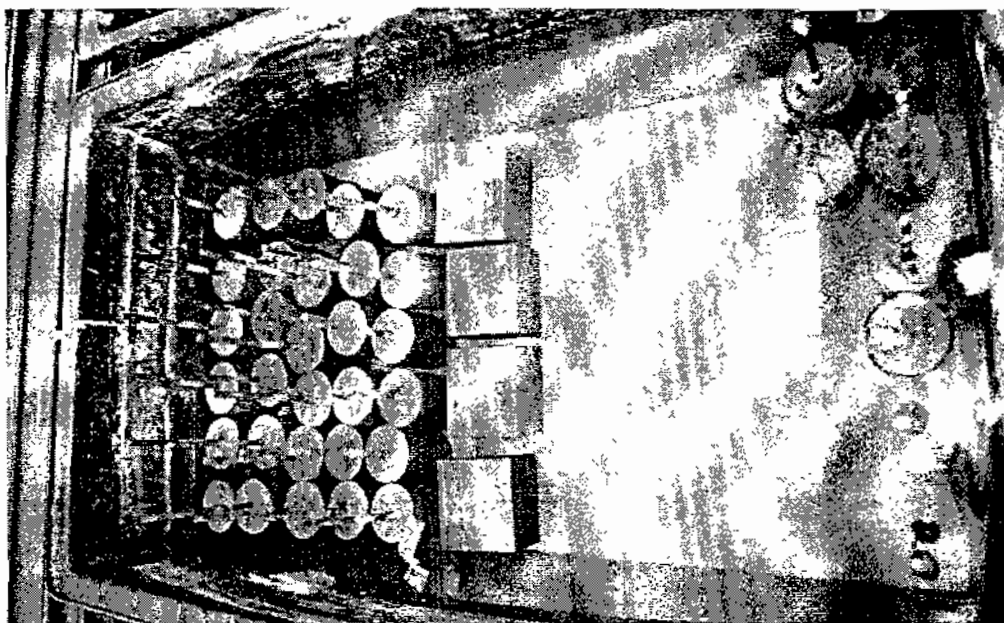
ภาพประกอบ 42 การจัดวางเหล็กเสริมในแบบหล่อแบบทรงกระบอก



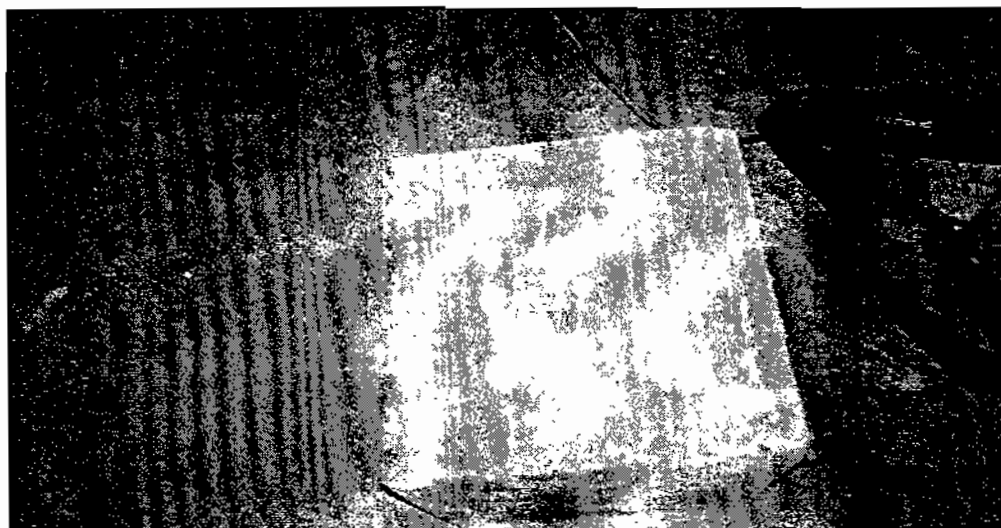
ภาพประกอบ 43 การวางเหล็กและจัดตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต



ภาพประกอบ 44 การถอดแบบ



ภาพประกอบ 45 การเซ็ตตัวอย่างคอนกรีต



ภาพประกอบ 46 การทดสอบหากำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

## ประวัติย่อผู้วิจัย

### ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล นายอนุชิต บันลือทรัพย์  
 วันเกิด วันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2534  
 สถานที่เกิด บ้านเลขที่ 193 หมู่ที่ 2 ตำบลหนองเรือ อำเภอชุมพลบุรี  
 จังหวัดสุรินทร์ รหัสไปรษณีย์ 32190  
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 193 หมู่ที่ 2 ตำบลหนองเรือ อำเภอชุมพลบุรี  
 จังหวัดสุรินทร์ รหัสไปรษณีย์ 32190

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนท่าตูมประชาเสรมวิทย์  
 อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์  
 พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนท่าตูมประชาเสรมวิทย์  
 อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์  
 พ.ศ. 2557 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นายสุรวิทย์ จันทร์ศรี
วันเกิด	วันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535
สถานที่เกิด	บ้านเลขที่ 69 หมู่ที่ 3 ตำบลกกสะทอน อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42120
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 69 หมู่ที่ 3 ตำบลกกสะทอน อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42120

## ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านน้ำเย็น อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
พ.ศ. 2554	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีสองรักวิทยาลัย อำเภอด่านซ้าย จังหวัดเลย
พ.ศ. 2557	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม