

ผลกระทบของซีเด้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

นายวิศว จักรไพศาล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-635-098-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

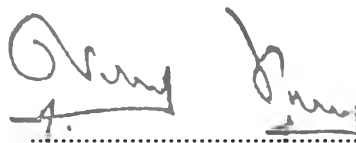
EFFECTS OF FLY ASH IN POZZOLANIC REACTION
ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Mr. Wissawa Chakpaisam

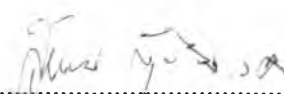
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996
ISBN 974-635-098-6


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของซีเอ็นเอในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของ
คอนกรีตสมรรถนะสูง
โดย นายวิศวะ จักรไพศาล
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม สุริยะมงคล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)


..... กรรมการ
(ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

วิชา วิศวกรรมโยธา : ผลกระทบของซีเมนต์ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต
สมรรถนะสูง (EFFECTS OF FLY ASH IN POZZOLANIC REACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF
HIGH PERFORMANCE CONCRETE) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ, 87 หน้า .
ISBN 974-635-098-6

ปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำซึ่งเรียกกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ผลผลิตคือแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และเมื่อมีซีเมนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์ สารเคมีในซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออกจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์มากขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตามอายุของปฏิกิริยาทางเคมี โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วยการวัดความร้อนภายใต้แรงสุญญากาศ, Thermogravimetry Analysis (TGA) แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ ซึ่งคำนวณจากมวลโมเลกุลของสมการเคมี เพื่ออธิบายผลกระทบของซีเมนต์ต่อกำลังและพฤติกรรมทางกายภาพ ทั้งนี้จะเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาทางเคมีของซีเมนต์เพสตรรมา ในการทดสอบหาแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้วิธี TGA จะต้องเผาซีเมนต์เพสที่อุณหภูมิประมาณ 450-600°C ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สลายตัวจนน้ำหนักหายไปจึงสามารถตรวจวัดในส่วนนี้ได้ การวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และนำไปคำนวณหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์โดยใช้การทดแทนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ปริมาณ 15-35% ด้วยส่วนผสมของคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ 500 กก./ลบ.ม. และศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตามอายุ

ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพส แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอายุจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่เมื่อผสมซีเมนต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากซีเมนต์ โดยน้ำหนักจะลดลงประมาณ 0.6-0.8% ที่อายุ 28 วัน และประมาณ 1.38-1.56% ที่อายุ 56 วัน ซีให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลา และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ผสมซีเมนต์จะลดลงต่ำกว่าในซีเมนต์เพสตรรมาที่อายุประมาณ 2 สัปดาห์ และเมื่อเพิ่มซีเมนต์ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ผสมซีเมนต์ จะมีปริมาณมากกว่าในซีเมนต์เพสตรรมาประมาณ 5% ที่อายุ 28 วัน และประมาณ 10% ที่อายุ 56 วัน แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นตามเวลา ส่งผลให้คอนกรีตผสมซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว และกำลังอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม ซึ่งกำลังอัดจะลดลงในอัตราเดียวกันกับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ จากผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงประมาณ 10% จากการแทนที่ด้วยซีเมนต์ทุก ๆ 10% การผสมซีเมนต์ในซีเมนต์สามารถปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด โดยค่ายุบตัวจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม นั่นคือค่ายุบตัวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ของการแทนที่ 10% ด้วยซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมหากพิจารณาจากความอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ 25% และหากพิจารณาจากกำลังอัดปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15% และหากพิจารณาจากความสามารถทำงานได้ ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 35% ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาและจะมีค่ามากกว่า ACI Committee 363 ประมาณ 35-40% และมอร์ต้าผสมซีเมนต์จะมีการหดตัวมากกว่ามอร์ต้าธรรมดาประมาณ 2-10%

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโครงสร้าง
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต วิชา วิศวกรรมโยธา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 45
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C715428 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD:

FLY ASH / HYDRATION REACTION / POZZOLANIC REACTION / THERMOGRAVIMETRY ANALYSIS

WISSAWA CHAKPAISARN : EFFECTS OF FLY ASH IN POZZOLANIC REACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE. THESIS ADVISER : PROF. EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. 87 pp. ISBN 974-635-098-6

A chemical reaction between cement and water known as "hydration reaction" produces calcium silicate hydrate and calcium hydroxide. Using fly ash substitution of cement in concrete, chemical components in fly ash will react with calcium hydroxide to produce calcium silicate hydrate by means of pozzolanic reaction. Matrix of the paste will condensed by calcium silicate hydrate from hydration reaction and pozzolanic reaction, so that compressive strength of concrete will be increased. This study, calcium hydroxide has been tested and determined by Thermogravimetry Analysis (TGA), and calcium silicate hydrate can be calculated and determined by molecular weight of chemical composition. Strength and physical properties have been tested to compare with thus chemical reactions. The thermogravimetry analysis can determine amount calcium hydroxide in cementitious phase by thermal heating up to 450-600 °C for decomposition as that weight loss of calcium hydroxide. The study has considering fly ash substitution at 15-35 % for concrete mixes at 500 kg./m³ cement content. Essential concrete property in fresh and harden states had been determined along with age respectively.

The amount of calcium hydroxide in cement paste is tested to be increased by age of hydration reaction. Fly ash substitution in cement will reduce amount of calcium hydroxide by means of pozzolanic reaction by 0.6-0.8 % at 28 days and 1.38-1.56 % at 56 days. Reduction of calcium hydroxide in the paste has proved the pozzolanic reaction to be increased by age and the amount of calcium hydroxide in cement paste with fly ash tends to overcome the one of cement paste around 2 weeks of age. Total amount of calcium hydroxide in cement paste substituted by fly ash is proportioned to the amount of cement in the paste. The amount of calcium silicate hydrate in cement paste with fly ash has shown larger amount about 5 % at 28 days and 10 % at 56 days over the ordinary cement. It is proved that the pozzolanic reaction is increased with age. Then long term strength compression had indicated direct proportion to the amount of calcium silicate hydrate in concrete. The strength increase rate has shown at 10 % of fly ash substitution. Workability of fresh concrete can also be improved by means of fly ash in term of slump at every 10 % substitution. The appropriate replacement of fly ash should be around 25 % for soundness, 15 % for compressive strength and 35 % for workability. Modulus of elasticity of concrete with fly ash is tested to greater values than that the prediction by ACI Comittee 363 in the range of 35-40 %. Mortar with fly ash had indicated more shrinkage than mortar of ordinary mortar about 2-10 %.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโครงสร้าง.....
ปีการศึกษา..... 2539.....

ลายมือชื่อนิสิต..... วิชา วิศวกรรมโยธา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 45.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอน้อมระลึกและสำนึกถึงพระคุณของคุณพ่อและคุณแม่ ผู้ซึ่งคอยอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนตลอดมา คุณประโยชน์อันใดอันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ผู้ที่มีพระคุณที่สุดของผู้เขียนทั้งสองท่าน

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ผู้เขียนในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางในการค้นคว้าวิจัย อีกทั้งผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม สุริยะมงคล และ อาจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาตรวจ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณสมชัย กกกำแหง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทดลอง และให้ความอนุเคราะห์ใช้ถ้ำลอย จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณกิตติกร ดันเปาว์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบ และอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท น้ำแข็งคอนกรีต (1992) จำกัด และ บริษัท WR. GRACE จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเกี่ยวกับการทดสอบ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในท้องทดสอบคอนกรีต และเจ้าหน้าที่ในศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างจริงใจเสมอมา

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่และเพื่อน ๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้, ผู้เขียนขอขอบคุณคุณคุณสมภพ สุวรรณกวิน เพื่อนที่ทำการทดสอบด้วยกัน และให้คำปรึกษา เสมอเพื่อนที่ดีตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตารางประกอบ	ฅ
รายการรูปประกอบ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	6
1.5 การดำเนินการวิจัย	6
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมซีเมนต์ลอย	
2.1 ซีเมนต์ลอย	8
2.1.1 นิยาม และแหล่งที่มา	8
2.1.2 ชนิดของซีเมนต์ลอย	8
2.1.3 ส่วนประกอบทางเคมี	9
2.1.4 คุณสมบัติทางกายภาพ	10
2.2 ปฏิกริยาทางเคมีของคอนกรีตผสมซีเมนต์ลอย	12
2.2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน	12
2.2.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	14
2.3 การนำซีเมนต์ลอยมาผสมในคอนกรีต	14
2.4 อิทธิพลของซีเมนต์ลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด	15
2.5 อิทธิพลของซีเมนต์ลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง.....	16
2.6 การหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ผสมซีเมนต์ลอย	17
2.6.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน	17
2.6.2 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	18
2.6.3 โครงสร้างของซีเมนต์เฟสสถานะแข็ง	18
2.6.4 ประเภทของน้ำในซีเมนต์เฟสสถานะแข็ง	19
2.6.5 หลักการของวิธี Thermogravimetry Analysis (TGA)	19

2.6.6 การวิเคราะห์และประเมินค่า	21
2.7 การหาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในซีเมนต์พิเศษผสมซีเมนต์.....	23
บทที่ 3 การทดสอบและผลการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตสมรรถนะสูง	
3.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผสมในคอนกรีต	25
3.2 วิธีการผสมคอนกรีต	26
3.3 การทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	27
3.4 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด	28
3.5 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็ง	29
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
4.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีในซีเมนต์พิเศษผสมซีเมนต์.....	49
4.2 การหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	49
4.3 การหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	52
4.4 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	55
4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	56
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	88
ประวัติผู้เขียน	

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ	9
2.2 ปริมาณสารประกอบในซีเมนต์	10
2.3 แสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี	20
3.1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด	33
3.2 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	34
3.3 ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบหาค่าหดตัว	34
3.4 ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่ทำการทดสอบหาค่าความคงตัว	35
3.5 ส่วนผสมคอนกรีตตามรายการทดสอบ	36
3.6 ผลการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	37
3.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมซีเมนต์	38
3.8 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	39
ด้วยซีเมนต์ = 0%	
3.9 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	39
ด้วยซีเมนต์ = 15%	
3.10 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	40
ด้วยซีเมนต์ = 20%	
3.11 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	40
ด้วยซีเมนต์ = 25%	
3.12 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	41
ด้วยซีเมนต์ = 30%	
3.13 กำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ เมื่อแทนที่ซีเมนต์.....	41
ด้วยซีเมนต์ = 35%	
3.14 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมซีเมนต์	42
3.15 ผลการทดสอบหาความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมซีเมนต์	43
3.16 ผลการทดสอบหาการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมซีเมนต์	43
4.1 ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในซีเมนต์เพสต์ผสมซีเมนต์	59
4.2 ปริมาณ Ca(OH) ₂ และ CSH ที่ได้จากการคำนวณเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น	60
อย่างสมบูรณ์	
4.3 ปริมาณ Ca(OH) ₂ และ CSH ที่เกิดขึ้นเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อ	60
ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์	
4.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิก	61

รายการประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของซีเมนต์ลดยขยาย 900 เท่า	11
2.2 ลักษณะของซีเมนต์ลดยขยาย 3,900 เท่า	11
2.3 ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Thermogravimetry Analysis	22
3.1 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต	44
3.2 การทดสอบค่าการไหลของคอนกรีต	44
3.3 การเก็บตัวอย่างคอนกรีต	45
3.4 การบ่มคอนกรีต	45
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	46
3.6 การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	46
3.7 การทดสอบหาค่าการหดตัวของมอร์ต้าผสมซีเมนต์ลดย	47
3.8 การทดสอบหาค่าความอยู่ตัวของซีเมนต์เฟส	47
ผสมซีเมนต์ลดยด้วยเครื่องอบไอน้ำ Autoclave	
3.9 การชั่งตัวอย่างทดสอบ เพื่อนำไปหาปริมาณ	48
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	
3.10 การทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	48
ด้วยเครื่องมือ Thermal Analysis	
4.1 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเมนต์ลดย	62
เท่ากับ 0% และ 15%	
4.2 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเมนต์ลดย	62
เท่ากับ 0%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35%	
4.3 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณซีเมนต์ลดย	63
4.4 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ลดยเทียบกับ	64
ซีเมนต์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเมนต์ลดยเท่ากับ 0%, 15%, 25% และ 35%	
4.5 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ลดยเทียบกับ	65
ซีเมนต์ตามเวลาเมื่อปริมาณซีเมนต์ลดยเท่ากับ 0%, 20% และ 30%	
4.6 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามเวลา	66
4.7 กราฟแสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไป	67
ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามเวลา เมื่อปริมาณซีเมนต์ลดยเท่ากับ 15%	
4.8 กราฟแสดงปริมาณ CSH เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์ลดยกับซีเมนต์	68
ตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มซีเมนต์ลดย	
4.9 กราฟแสดงปริมาณ CSH ตามเวลา เมื่อปริมาณซีเมนต์ลดยเท่ากับ 15 %	69
4.10 กราฟแสดงปริมาณ CSH เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมซีเมนต์ลดย	70

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามปริมาณซีเมนต์ที่ W/C = 0.26	71
4.12 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามปริมาณซีเมนต์ที่ W/C = 0.29	71
4.13 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามปริมาณซีเมนต์ที่ W/C = 0.32	72
4.14 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามเวลาที่ W/C = 0.26	73
4.15 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามเวลาที่ W/C = 0.29	73
4.16 กราฟแสดงค่ากำลังอัดตามเวลาที่ W/C = 0.32	74
4.17 กราฟแสดงค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio	75
4.18 กราฟแสดงค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio	75
4.19 กราฟแสดงค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio	76
4.20 กราฟแสดงค่ากำลังอัดที่อายุ 56 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio	76
4.21 กราฟแสดงค่ากำลังอัดที่อายุ 91 วัน เทียบกับค่า W/C Ratio	77
4.22 กราฟแสดงค่ายุบตัวตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มซีเมนต์ที่ W/C	78
4.23 กราฟแสดงค่าการไหลตามสัดส่วนวัสดุผสมเพิ่มซีเมนต์ที่ W/C	78
4.24 กราฟแสดงผลการทดสอบความคงตัวของซีเมนต์ผสมเพิ่มซีเมนต์ที่ W/C	79
4.25 กราฟแสดงการหดตัวของมอร์ต้าตามเวลา	80
4.26 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน	81