การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

นายธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2547

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

.... กรรมการ
(ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล)

.... กรรมการ
(รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

ISBN 974-183-911-1

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
	รศ.ดร.ไกรวุฒิ เกียรติโกมล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ขนาดหยาบ) และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดจนค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 (ขนาดละเอียดปานกลาง) และน้อยกว่าร้อยละ 5 (ขนาดละเอียดมาก) โดยน้ำหนัก จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ปรับปริมาณน้ำของคอนกรีตเพื่อให้มีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกบ่มในน้ำประปา ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน และกลุ่มที่ 2 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน นอกจากนี้ทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม. เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 364 วัน

ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของคอนกรีตนานขึ้นและนานมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่สูงขึ้น ส่วนการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่หยาบกว่า ในด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการแทนที่มากขึ้นกำลังอัดยิ่งมีค่าลดลง ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม

น้ำมันหลังบดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมาก ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลางและขนาดละเอียดมากในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน สามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 270 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตเริ่มมีค่าลดลง ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทุกความละเอียดในปริมาณสูง (ร้อยละ 40) มีการลดลงของกำลังอัดค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมากแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน

ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้แท่งคอนกรีตมีค่าการขยายตัวต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมากทุกอัตราการแทนที่มีการขยายตัวที่อายุ 364 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 40 การขยายตัวมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยผิวของแท่งคอนกรีตยังไม่เกิดการสึกกร่อน มีเพียงบริเวณขอบและมุมเท่านั้นที่เกิดการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตเพียงเล็กน้อย

คำสำคัญ : เถ้าปาล์มน้ำมัน / วัสดุปอซโซลาน / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังอัด / การขยายตัว / คอนกรีต

Thesis Title	A Study of Properties of Concrete Mixed with Palm Oil Fuel Ash
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Tirasit Saeting
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
	Assoc. Prof. Dr. Kraiwood Kiattikomol
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2547

Abstract

This research intends to develop the Palm Oil Fuel Ash (POFA) as a pozzolanic material for making concrete. Original POFA (Coarse POFA) from palm oil mills was ground to improve the quality until the particle sizes retained on a sieve No. 325 were 15-20 (fine POFA) and less than 5 percent (very fine POFA) by weight. Then, Portland cement type I was partially replaced by ground or unground POFA at the rate of 10, 20, 30 to 40 percent by weight of binder to produce concretes. The mixing water was adjusted to obtain slump of concretes between 5-10 cm. Setting times of fresh concrete were investigated. Compressive strengths of concretes were determined by using cylindrical concrete of 10x20 cm. All concretes were separated into 2 groups, the first group was cured in water and tested for the compressive strength at the ages of 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270, and 360 days. The second group was immersed in 5 percent of magnesium sulfate solution and was tested to determine the compressive strength at the ages of 60, 90, 180, 270 and 360 days. Concrete bars of 7.5x7.5x28.5 cm containing POFA immersed in 5 percent of magnesium sulfate solution were tested for expansion until 364 days.

The results revealed that the initial and final setting times of concretes mixed with POFA were increased with the increase of POFA replacement. After grinding, the use of ground POFA reduced setting time as compared to that of unground POFA. Concretes mixed with original POFA had the compressive strength lower than that of Portland cement type I concrete and decreased as the increase of POFA replacement. However, the concretes mixed with fine and very fine POFA at 10

and 20 percent, respectively gave the compressive strength as high as that of Portland cement type I concrete at the age of 90 days. For concretes immersed in magnesium sulfate solution, the compressive strengths of all concretes were as high as those of concretes cured in water and reduced after 360 days. The strength loss of POFA concretes in magnesium sulfate solution was increased with the increase of POFA replacement. However, the compressive strength of concrete mixed with 10 percent of very fine POFA was higher than that of Portland cement type V concrete although it was immersed in magnesium sulfate solution for 360 days.

The expansions of concrete bars containing high fineness POFA were less than those of concrete bars containing low fineness POFA and decreased as the increase of POFA replacement. The expansions of all concrete bars containing very fine POFA at the age of 364 days were less than that of concrete bar made from Portland cement type I. Additionally, at 40 percent replacement of high fineness of POFA, the expansion was less than that of concrete bar made from Portland cement type V. The POFA concrete bars showed less corrosion, with only small spalling at the edge of samples.

Keywords : Palm Oil Fuel Ash / Pozzolanic Material / Setting Time / Compressive Strength / Expansion / Concrete

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณ รศ.ดร.ไกรวุฒิ เกียรติโกมล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และขอขอบคุณกรรมการสอบทุกท่าน ได้แก่ ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล และ รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.) ประจำปี 2545 ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย และขอขอบคุณบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฌ
รายการรูปประกอบ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	4
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**5**
2.1 วัสดุปอซโซลาน	5
2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน	6
2.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน	7
2.4 กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	9
2.5 แนวทางการป้องกันการทำลายเนื่องจากซัลเฟต	11
2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา	12
3. วิธีการทดสอบ	**14**
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	14
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	14
3.3 วิธีการศึกษา	15

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล **23**

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ 23

4.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ 28

4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต 30

4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต 31

4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา 33

4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 44

4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา และที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 53

4.8 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต 62

5. สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ **72**

5.1 สรุปผลการทดสอบ 72

5.2 ข้อเสนอแนะ 73

เอกสารอ้างอิง **75**

ภาคผนวก **83**

ก ตารางและรูปแสดงการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน 83

ข ตารางและรูปแสดงการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต 85

ค ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 100

ง ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต 129

ประวัติผู้วิจัย **144**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618	6
2.2	เกณฑ์กำหนดในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต	12
3.1	อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ายุบตัว ของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	18
4.1	ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ	27
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	29
4.3	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่ายุบตัว และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	32
4.4	กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา	34
4.5	กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	45
4.6	ค่าผลต่างกำลังอัดและค่าแฟกเตอร์การเสื่อมกำลังเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	54
4.7	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 364 วัน	63
ก.1	ผลการทดลองหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Blaine Air Permeability ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	84
ข.1	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต CT1	86
ข.2	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต CT5	87
ข.3	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP10	88
ข.4	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP20	89
ข.5	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP30	90
ข.6	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP40	91
ข.7	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P10	92
ข.8	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P20	93
ข.9	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P30	94
ข.10	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P40	95
ข.11	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P10	96
ข.12	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P20	97
ข.13	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P30	98
ข.14	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P40	99

ค.1	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1W ที่บ่มในน้ำประปา	101
ค.2	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5W ที่บ่มในน้ำประปา	102
ค.3	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10W ที่บ่มในน้ำประปา	103
ค.4	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20W ที่บ่มในน้ำประปา	104
ค.5	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP30W ที่บ่มในน้ำประปา	105
ค.6	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP40W ที่บ่มในน้ำประปา	106
ค.7	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10W ที่บ่มในน้ำประปา	107
ค.8	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20W ที่บ่มในน้ำประปา	108
ค.9	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30W ที่บ่มในน้ำประปา	109
ค.10	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40W ที่บ่มในน้ำประปา	110
ค.11	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10W ที่บ่มในน้ำประปา	111
ค.12	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20W ที่บ่มในน้ำประปา	112
ค.13	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30W ที่บ่มในน้ำประปา	113
ค.14	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40W ที่บ่มในน้ำประปา	114
ค.15	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	115
ค.16	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	116
ค.17	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	117
ค.18	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	118
ค.19	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP30S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	119
ค.20	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP40S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	120
ค.21	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	121
ค.22	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	122
ค.23	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	123

ค.24	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	124
ค.25	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	125
ค.26	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	126
ค.27	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	127
ค.28	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	128
ง.1	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1	130
ง.2	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT5	131
ง.3	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP10	132
ง.4	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP20	133
ง.5	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP30	134
ง.6	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP40	135
ง.7	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P10	136
ง.8	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P20	137
ง.9	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P30	138
ง.10	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P40	139
ง.11	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P10	140
ง.12	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P20	141
ง.13	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P30	142
ง.14	ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P40	143

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	กองเส้นใยจากทะลายปาล์มและผลปาล์ม	7
2.2	กองกะลาปาล์ม	8
2.3	กองเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา	8
3.1	อุปกรณ์ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 403	17
3.2	แบบหล่อและตัวอย่างแท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบการขยายตัว	21
3.3	เครื่องวัดการขยายตัวของคอนกรีต (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490	21
4.1	สีและลักษณะทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	24
4.2	ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	25
4.3	ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	25
4.4	ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	25
4.5	ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	25
4.6	ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	25
4.7	การกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	28
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	39
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	39
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	40
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	40
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	41
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	41

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP 42
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P 43
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P 43
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S 49
4.18 คอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 360 วัน 49
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP 50
4.20 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 360 วัน 50
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P 51
4.22 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 360 วัน 51
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P 52
4.24 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 360 วัน 52
4.25 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 58
4.26 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 59
4.27 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 60
4.28 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่บ่มในน้ำและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 61
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 67

4.30 แท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน 67

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP 68

4.32 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน 68

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P 69

4.34 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน 69

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P 70

4.36 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน 70

4.37 เปรียบเทียบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุมกับแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 71

ก.1 การหาค่าคงที่ b ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของ Blaine ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน 84

ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีตควบคุม CT1 86

ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีตควบคุม CT5 87

ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP10 88

ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP20 89

ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP30 90

ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP40 91

ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P10 92

ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P20 93

ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P30 94

ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P40 95

ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P10 96

ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P20 97

ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P30 98

ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P40 99

บทที่ 1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของเถ้าปาล์มน้ำมัน, วัตถุประสงค์ของการศึกษา, ขอบเขตของการศึกษา และแนวทางในการศึกษาของการทำวิจัยนี้

1.1 ความเป็นมา

จากสถานการณ์ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศในปริมาณมาก ทำให้ต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศประมาณร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด และเนื่องจากราคาน้ำมันมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษเพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ทำให้มีหลายหน่วยงานได้ทำการวิจัยและพัฒนาการใช้พลังงานภายในประเทศ ซึ่งได้แก่ ไบโอดีเซล และพลังงานชีวมวล เป็นต้น โดยไบโอดีเซลเป็นการนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์มาใช้ผสมน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่างๆ เพื่อทดแทนการนำเข้าน้ำมันดีเซล ส่วนพลังงานชีวมวลเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีผลผลิต คุณภาพ และราคาต้นทุนดีกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น จึงเหมาะสมในการนำมาผลิตไบโอดีเซล แต่ในการผลิตต้องคำนึงถึงปริมาณและความต้องการใช้น้ำมันในการบริโภคและในอุตสาหกรรมด้วย โดยในปี 2545 ประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมัน 4 ล้านตัน หรือน้ำมันปาล์ม 68000 ตันต่อเดือน ตลาดมีความต้องการใช้ 55000 ตันต่อเดือน [1] จะเหลือน้ำมันปาล์มที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ไม่มากนัก แม้ว่าจะมีการปลูกปาล์มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งจากการคาดการณ์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [2] ในปี 2547 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1.87 ล้านไร่ ผลผลิตประมาณ 5.23 ล้านตัน แต่ยังคงไม่เพียงพอต่อความต้องการของโรงงานผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นรัฐบาลจึงมีการส่งเสริมให้มีการปลูกปาล์มเพิ่มขึ้น โดยมีเป้าหมายขยายพื้นที่ปลูกปาล์มให้ได้ 10 ล้านไร่ภายในปี 2572 และมีผลผลิต 25.88 ล้านตัน โดยในช่วง 5 ปีแรกปลูกเพิ่มกว่า 3 ล้านไร่ [3] และสนับสนุนการจัดตั้งอุตสาหกรรมต่อเนื่องและอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็นทะลายปาล์ม เปลือกปาล์มและกะลาปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยในอนาคตจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการจัดการกับวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้กากปาล์มไปเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิด

ไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณประมาณ 3.29 ล้านตันในปี 2547 อย่างไรก็ตามหลังจาก การเผายังคงเหลือเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณสูงถึง 0.17 ล้านตัน (หรือประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของกากปาล์ม) เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เพิ่มขึ้น ในแต่ละปี บางส่วนนำไปใช้เป็นปุ๋ย แต่ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด การขนส่ง รวมถึงการจัดหาสถานที่ในการทิ้ง และเนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหากสามารถนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ก็สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งในอดีตเคยเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สร้างปัญหาให้กับสภาวะแวดล้อม แต่ต่อมาได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้ดี และจาก การศึกษาเบื้องต้นพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่ามีออกไซด์ของซิลิกาสูง และมีศักยภาพเพียงพอสามารถ นำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้เช่นกัน [4] ทำให้มีแนวคิดถึงการศึกษาการนำเอาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และเป็นการ นำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจะส่งผลดีต่อทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ในอนาคตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมแทนที่บางส่วนใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. เพื่อศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เมื่อบ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3. เพื่อศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

4. เพื่อศึกษาผลของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อใช้ผสมแทนที่ บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการต้านทานซัลเฟตและให้กำลังอัดของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาเริ่มจากการนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 หลังจากนั้นทำการปรับปรุงคุณภาพของถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 โดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้นอีก 2 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก รวมขนาดที่ไม่ได้บดเป็น 3 ขนาด แล้วจึงทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละขนาด ได้แก่ ลักษณะรูปร่าง ความละเอียด การกระจายตัวของอนุภาค และค่าความถ่วงจำเพาะ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมี

ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 310 กก/ซม^2 และมีค่าการยุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. และปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อให้มีค่าการยุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. เมื่อหล่อคอนกรีตเสร็จแล้วทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกบ่มในน้ำสะอาดตลอดเวลา ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เริ่มทดสอบกำลังอัดที่อายุ 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน ตามลำดับ และทำการศึกษาผลของความละเอียดและการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในรูปของค่าผลต่างกำลังอัด (Difference of Compressive Strength) ของคอนกรีต และค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลัง (Sulfate Deterioration Factor : SDF) ซึ่งเป็นค่าร้อยละของผลต่างกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันเมื่อบ่มในน้ำประปากับที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

การศึกษาการขยายตัวของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. โดยใช้อัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำเช่นเดียวกับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากหล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตครบ 1 วัน ทำการถอดแบบและวัดค่าความยาวเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และทำการวัดค่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทุก 14 วัน จนถึง 364 วัน

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต และแนวทางการป้องกันการทำลายเนื่องจากซัลเฟต ตลอดจนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา การเตรียมตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ รวมทั้งวิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด และวิธีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตลอดจนวิธีการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาและการนำเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าปาล์มน้ำมัน กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต และแนวทางการป้องกันการทำลายเนื่องจากซัลเฟต ตลอดจนงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

2.1 วัสดุปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618 [5] ให้คำจำกัดความของ "วัสดุปอซโซลาน" (Pozzolanic Materials) ไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากพอและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น และวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น [6]

วัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5] แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท F, ประเภท C และประเภท N โดยแบ่งจากคุณสมบัติทางด้านเคมีเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 วัสดุปอซโซลานประเภท F โดยปกติมักได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซท์ (Antharcite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำกว่าร้อยละ 10 ประเภท C โดยปกติได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือสับ-บิทูมินัส (subbituminous) และมักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วนประเภท N เป็นวัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง หรือนำมาผ่านกระบวนการเผาจนมีคุณสมบัติตามที่ต้องการก่อน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านการรับกำลังอัด ความทนทานต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละ

ชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่อยู่ในรูปไม่เป็นผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน คือ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [7]

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5]

คุณสมบัติ	ประเภท F	ประเภท C	ประเภท N
SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3, น้อยที่สุดร้อยละ	70.0	50.0	70.0
SO_3 , มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0	4.0
ปริมาณความชื้น, มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0	10.0
ดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน, น้อยที่สุดร้อยละ	75.0	75.0	75.0

2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกมา และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O$ หรือ C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)

$$2(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$2(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.2)$$

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O \quad (2.3)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}ySiO_2{\cdot}zH_2O \quad (2.4)$$

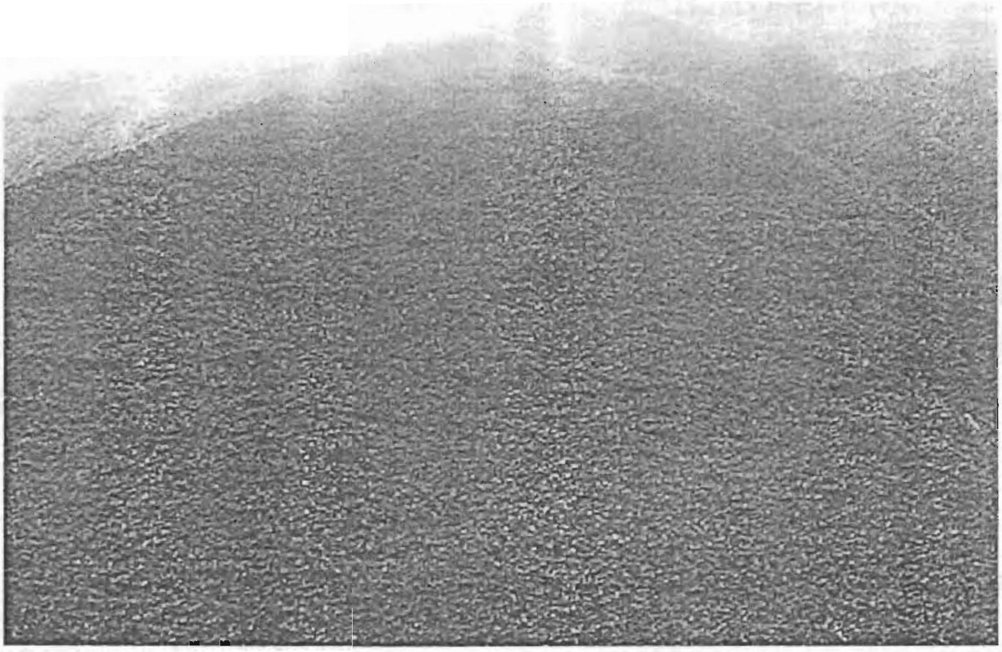
$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}yAl_2O_3{\cdot}zH_2O \quad (2.5)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [8] และทำปฏิกิริยาต่อไปแม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม [9]

2.3 เถ้าปาล์มน้ำมัน

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็นทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล จะนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการตีให้เป็นเส้นใย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นใยและกะลาปาล์ม (รูปที่ 2.1 และ 2.2) ไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 700-1000°C หลังจากการเผายังคงเหลือเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมาก (รูปที่ 2.3) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ทั้งด้านการขนส่งและการจัดหาสถานที่ในการทิ้ง นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

รูปที่ 2.1 กองเส้นใยจากทะลายปาล์มและผลปาล์ม



รูปที่ 2.2 กองกะลาปาล์ม

รูปที่ 2.3 กองเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผา

2.4 กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

ซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล โดยอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งจะก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด [10] อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่จะมีอำนาจรุนแรงขึ้นเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน สารละลายซัลเฟตจะซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับสารประกอบเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้

ในน้ำทะเลพบว่าความเสียหายของคอนกรีตเกิดขึ้นโดยการกัดกร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางธรรมชาติ สารเคมีส่วนใหญ่ที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) [11, 12, 13] ส่วนเกลือแกง (NaCl) กับเกลือโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งพบมากในน้ำทะเลเช่นกัน มีผลต่อคอนกรีตค่อนข้างน้อย [14] แต่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ง่าย หากคอนกรีตมีค่าการซึมผ่าน (Permeability) สูง ในน้ำใต้ดินที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) มักจะมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปแล้วดินจะมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01-0.05 ของน้ำหนัก แต่จะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งจะเกิดสารประกอบที่ส่งผลทำลายต่อคอนกรีต โดยมีกลไกของการทำลายดังนี้ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ($3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O$) หรือ Ettringite แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($3Mg(OH)_2$) หรือ Brucite และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($2Al(OH)_3$) ซึ่งแสดงตามสมการที่ (2.6) [13]

$$2(3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 12H_2O)+3(MgSO_4\cdot 7H_2O) \longrightarrow$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O+2Al(OH)_3+3Mg(OH)_2+8H_2O \qquad (2.6)$$

แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือยิบซั่ม (Gypsum) ตามสมการที่ (2.7)

$$Ca(OH)_2+MgSO_4\cdot 7H_2O \longrightarrow CaSO_4\cdot 2H_2O+Mg(OH)_2+5H_2O \qquad (2.7)$$

แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือยิบซั่ม (Gypsum) ที่ได้จากสมการที่ (2.7) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือ Ettringite ดังสมการที่ (2.8)

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 12H_2O+3(CaSO_4\cdot 2H_2O)+13H_2O \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O \qquad (2.8)$$

นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือยิบซั่ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) หรือ Brucite และซิลิกาเจล ($SiO_2\cdot nH_2O$) ดังสมการที่ (2.9)

$$3CaO\cdot 2SiO_2\cdot nH_2O+MgSO_4\cdot 7H_2O \longrightarrow CaSO_4\cdot 2H_2O+Mg(OH)_2+SiO_2\cdot nH_2O \qquad (2.9)$$

แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือยิบซั่ม ที่เกิดขึ้นในสมการที่ (2.9) ยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือ Ettringite ตามสมการ (2.8) ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ Brucite ซึ่งเกิดตามปฏิกิริยาในสมการที่ (2.6), (2.7) และ (2.9) ทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4MgO\cdot SiO_2\cdot 8.5H_2O$ หรือ M-S-H) ดังสมการที่ (2.10)

$$4Mg(OH)_2+SiO_2\cdot nH_2O \longrightarrow 4MgO\cdot SiO_2\cdot 8.5H_2O+n\text{-}4.5H_2O \qquad (2.10)$$

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้นมีการทำปฏิกิริยาหลายครั้งซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต หรือ Ettringite ซึ่งเกิดตามสมการที่ (2.6) และ (2.8) มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายใน ส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตเกิดการแตกร้าว นอกจากนี้การสลายตัวของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานและให้กำลังอัดแก่คอนกรีตไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งเป็นสารสีขาวนุ่มที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานแทน จึงทำให้คุณสมบัติการรับกำลังของคอนกรีตลดลง

2.5 แนวทางการป้องกันการทำลายเนื่องจากซัลเฟต

การทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนอกจากทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแล้วยังทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมกำลัง ซึ่งแนวทางในการป้องกันและบรรเทาความรุนแรงอาจทำได้ดังต่อไปนี้ [15]

1. การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ เป็นการลด C-A-H และเมื่อ C-A-H ลดลงก็จะทำให้ Ettringite และ M-S-H เกิดน้อยลงด้วย ดังนั้นการทำลายของซัลเฟตจึงลดลง เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S หรืออัตราส่วนของ C_3S/C_2S ต่ำ สามารถทำให้ต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น [16, 17, 18]

2. การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์โดยคงที่ปริมาณน้ำ การลดปริมาณน้ำโดยคงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ หรือทั้งการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และลดปริมาณน้ำ ก็จะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง แต่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มีผลทำให้การทำลายจากซัลเฟตสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของ $Ca(OH)_2$ และ C-A-H ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ดังนั้นการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดี คือ การลดปริมาณน้ำลง ซึ่งจะเป็นการทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เกิดการซึมผ่านของซัลเฟตได้ยากขึ้นด้วย [19]

3. การใช้สารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งหลักของการป้องกันการกัดกร่อนโดยการใช้วัสดุปอซโซลาน คือ SiO_2 ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็น C-S-H ทำให้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลดน้อยลง ดังนั้น $Ca(OH)_2$ ที่จะไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) ของ $MgSO_4$ ซึ่งเกิดเป็นยิปซั่ม และ Ettringite ที่ทำลายคอนกรีตลดน้อยลงด้วย นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงยังทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ภายในคอนกรีต ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้นจึงลดการซึมผ่านของสารละลายซัลเฟตที่จะเข้าไปทำอันตรายภายในเนื้อคอนกรีต

ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายโดยซัลเฟตที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในสภาวะที่ซัลเฟตมีความเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้สารปอซโซลานบควบคู่กันไปด้วย จะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการทำลายของซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้น ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงเกณฑ์กำหนดของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [20] สำหรับการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมของซัลเฟต ออกเป็น 4 ระดับ

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์กำหนดในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต [20]

สภาวะการสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต	ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซัลเฟตในน้ำ (หนึ่งในล้านส่วน)	ประเภทของปูนซีเมนต์	คอนกรีตมวลรวมปกติ	คอนกรีตมวลรวมเบา
				ค่าสูงสุดของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก*	ค่าต่ำสุดของกำลังอัด* (กก/ซม^2)
น้อยมาก	0.00-0.10	0-150	-	-	-
ปานกลาง +	0.10-0.20	150-1,500	2, 1**	0.50	250
รุนแรง	0.20-2.00	1,500-10,000	5	0.45	300
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	5 ผสมวัสดุปอซโซลาน++	0.45	300

* ในกรณีที่ต้องการคอนกรีตที่ซึมผ่านได้น้อยหรือเพื่อป้องกันสนิมในเหล็กเสริม ให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า หรือกำลังอัดที่สูงกว่า

** ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ชนิดพิเศษซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง

+ น้ำทะเล

++ วัสดุปอซโซลานที่นำมาผสมกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ต้องตรวจสอบก่อนว่าสามารถเพิ่มความต้านทานซัลเฟตในสภาวะรุนแรงได้จริง

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay [21] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ โดยการใช้แทนที่มากกว่าร้อยละ 10 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีขนาดอนุภาคใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมด้วย [22]

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal [23] นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ โดยในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม หลังจากนั้นกำลังอัดมี

การพัฒนาที่ดีขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว [24] และในปี ค.ศ. 1999 Awal และ Hussin [25] ได้ศึกษาคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 30 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แม้ว่าแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 2 ปี และจากงานวิจัยของ Ishida และคณะ [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยบ่มแท่งคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่าการหดตัวน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

สำหรับในประเทศไทย จักรพล กลั่นมั่นคง และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 70 และมีศักยภาพเพียงพอสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้หากมีความละเอียดสูง เช่นเดียวกับการศึกษาของ สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ [27] พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 มีค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 75 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 65.3 และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากมีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 90 และจากการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในการทำคอนกรีตกำลังสูงของ วันชัย สะตะ และคณะ [29] พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ให้กำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 100 ถึง 113 โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงสุด

จากงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าการศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเป็นเพียงการศึกษาเริ่มต้นเท่านั้น โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตได้ หากมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นเสียก่อน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคุณสมบัติในด้านระยะการก่อตัวของคอนกรีตสด การรับกำลังอัด รวมถึงการต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของคอนกรีตยังมีการศึกษาน้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา การเตรียมตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ รวมทั้งวิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด วิธีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตลอดจนวิธีการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุหลักที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐาน มอก. 15-2532 [30]
2. วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการศึกษานี้คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน จากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จังหวัดชุมพร
3. ทรายสำหรับทำคอนกรีตเป็นทรายแม่น้ำล้างสะอาดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างเบอร์ 100 มีค่าโมดูลัสความละเอียดและค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 2.68 และ 0.63 ตามลำดับ
4. หินย่อยสะอาดมีขนาดโตสุด 20 มม. (3/4 นิ้ว) และมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.47
5. น้ำประปา
6. แมกนีเซียมซัลเฟตชนิด Commercial Grade

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องถ่ายภาพกำลังสูง (Scanning Electron Microscope)
2. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer Microtrac II)
3. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence)
4. เครื่องบด (Grinding Machine)
5. ขวดทดลองมาตรฐานเลอแชทีเลียร์ (Le Chatelier)
6. อุปกรณ์ทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลน (Blaine Air Permeability)
7. ตะแกรงวิเคราะห์ขนาด
8. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า
9. ตู้อบปรับอุณหภูมิ
10. เครื่องและอุปกรณ์ผสมคอนกรีต

11. แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และแบบหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม.
12. ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
13. อุปกรณ์ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
14. เครื่องทดสอบกำลังอัด
15. อุปกรณ์วัดการยืดหดตัวของคอนกรีต (Compressometer)
16. เครื่องวัดการขยายตัวของคอนกรีต (Length Comparator)

3.3 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ ดังนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้นำมาจาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จังหวัดชุมพร ซึ่งเป็นโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มที่ใช้กากปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 700-1000°C เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ขนาด โดยเริ่มจากนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออก (มีประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก) ก็จะได้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดหยาบ (ใช้สัญลักษณ์ OP) จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 มาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดด้วยเครื่องบด (Grinding Machine) ให้มีความละเอียดปานกลางซึ่งกำหนดให้มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก (ใช้สัญลักษณ์ G1P) และบดให้มีความละเอียดมากจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ใช้สัญลักษณ์ G2P)

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.3.2.1 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.3.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.2.3 การวิเคราะห์การกระจายอนุภาค (Particle Size Distribution) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยทดสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer Microtrac II (Standard Range Analyzer: Model 7997-10: Size 0.7 to 700 microns) ซึ่งใช้แสงเลเซอร์เป็นตัววัดการกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

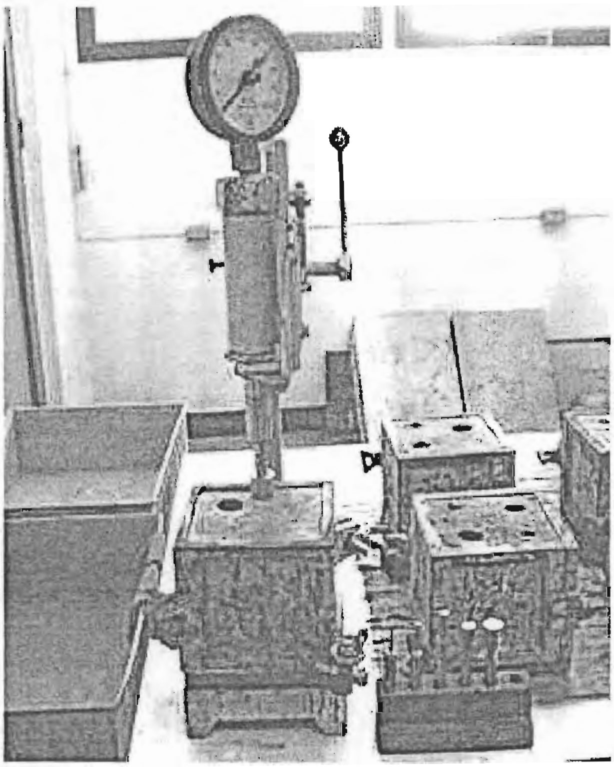
3.3.2.4 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอร์ชาทิเรีย (Le Chatelier) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 [31] ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยการทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุทดสอบ

3.3.2.5 การทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยวิธี Blaine Air Permeability ตามมาตรฐาน ASTM C 204 [32] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ของตัวอย่างที่ทดสอบกับตัวอย่างปูนซีเมนต์มาตรฐานที่ทราบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว ด้วยการวัดระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านวัสดุตัวอย่างในหลอดแก้วมานอมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งตัวอย่างที่มีความละเอียดสูงระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านจะนานกว่าตัวอย่างที่มีความละเอียดต่ำ ค่าที่ทดสอบได้จะอยู่ในรูปพื้นที่ผิวของวัสดุต่อน้ำหนัก (ซม^2/ก)

3.3.2.6 การทดสอบหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 [33] ซึ่งทำโดยการเอาตัวอย่างมาทำการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียกโดยใช้น้ำเมื่อนำไปอบแห้งจะได้น้ำหนักส่วนที่ค้างบนตะแกรง

3.3.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 403 [34] การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเป็นการทดสอบหาความต้านทานการกดของมอร์ต้าร์ที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยมีระยะเวลาที่สำคัญอยู่ 2 ช่วง คือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เป็นระยะเวลาที่บอกให้ทราบว่าภายในช่วงเวลาดังกล่าวคอนกรีตยังสามารถที่จะผสม เท อัดแน่น และแต่งผิวได้ และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) เป็นระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาพการแข็งตัวและเริ่มพัฒนากำลังอัด โดยทำการทดสอบคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 403 [34]

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

Mixes	Mix Proportion (kg/m^3)					W/B	Slump (cm)
	Cement	POFA	Water	Sand	Coarse Aggregate		
CT1	300	0	210	915	1080	0.70	6.5
CT5	300	0	210	915	1080	0.70	6.5
OP10	270	30	216	900	1065	0.72	6.5
OP20	240	60	231	875	1035	0.77	6.0
OP30	210	90	261	830	980	0.87	8.0
OP40	180	120	285	795	940	0.95	8.0
G1P10	270	30	216	900	1065	0.72	8.0
G1P20	240	60	219	895	1055	0.73	7.5
G1P30	210	90	219	890	1050	0.73	7.0
G1P40	180	120	222	880	1040	0.74	7.0
G2P10	270	30	204	920	1085	0.68	5.5
G2P20	240	60	210	905	1070	0.70	6.0
G2P30	210	90	213	900	1060	0.71	6.0
G2P40	180	120	216	890	1050	0.72	6.0

3.3.4 การทดสอบกำลังอัดและความคงทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39 [35] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 192 [36] ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 310 กก/ซม^2 และมีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. และปรับปริมาณน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อให้มีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ซึ่งเป็นค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตสำหรับงานทั่วไป ทดสอบค่ายุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C 143 [37] ในการทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างคอนกรีตอย่างละ 3 ตัวอย่าง เมื่อหล่อคอนกรีตเสร็จแล้วทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกบ่มในน้ำประปาตลอดเวลา ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ 2 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เริ่มทดสอบกำลังอัดที่อายุ 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน ตามลำดับ ทำการศึกษาผลการแทนที่และความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในรูปของค่าผลต่างกำลังอัด (Difference of Compressive Strength) ของคอนกรีตตามสมการที่ (3.1) และค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลัง (Sulfate Deterioration Factor : SDF) ซึ่งเป็นค่าร้อยละของผลต่างกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันที่บ่มในน้ำกับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามสมการที่ (3.2)

ค่าผลต่างกำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม^2)

$$\text{Difference of Compressive Strength} = W - S \quad (3.1)$$

ค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลังเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (%)

$$\text{Sulfate Deterioration Factor : SDF} = \frac{W - S}{W} \quad (3.2)$$

เมื่อ W = กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาตลอดเวลา

S = กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3.3.5 การทดสอบการขยายตัวของคอนกรีต

การศึกษาการขยายตัวของคอนกรีต ใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 157 [38] (รูปที่ 3.2) โดยใช้อัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำเช่นเดียวกับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตอัตราส่วนละ 2 ตัวอย่าง หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 1 วัน ทำการถอดแบบและวัดค่าความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้เครื่องมือวัดการขยายตัวของคอนกรีต (Length Comparator) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และทำการวัดการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตทุก 14 วัน จนถึง 364 วัน โดยสามารถคำนวณหาค่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการที่ (3.3)

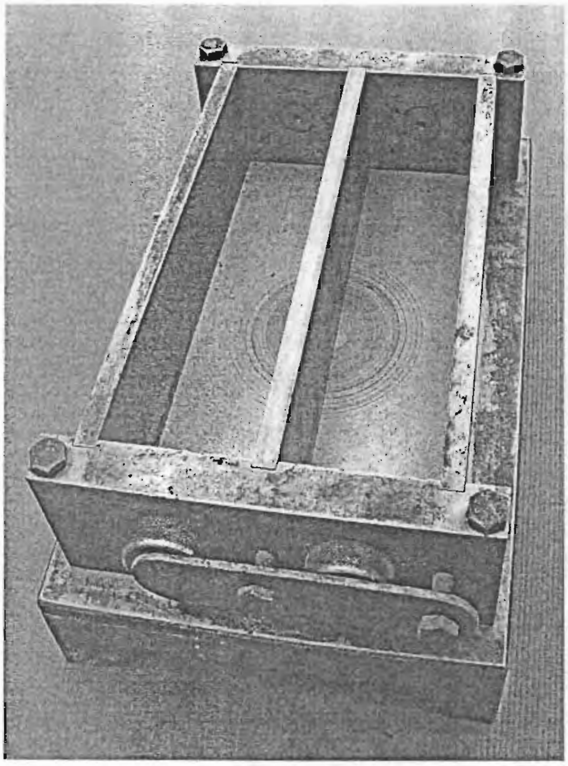
$$\Delta L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \times 100 \qquad (3.3)$$

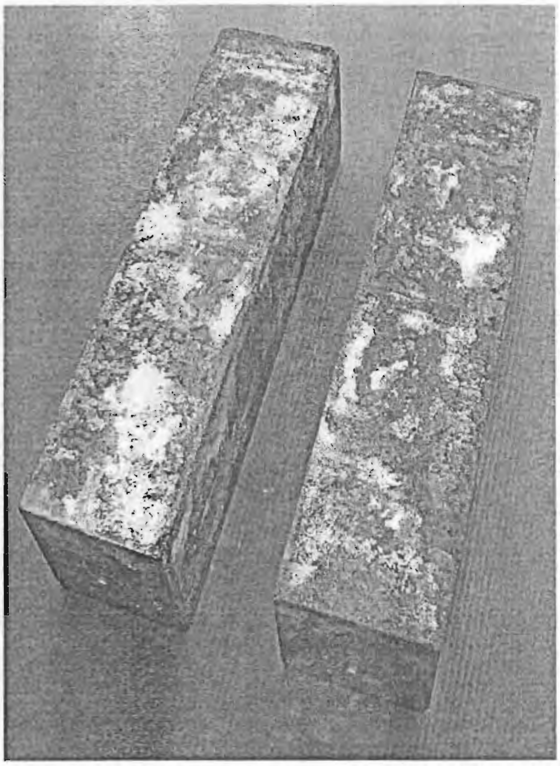
เมื่อ ΔL = ร้อยละการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีต

L_x = ค่าการวัดที่เวลาใดๆ

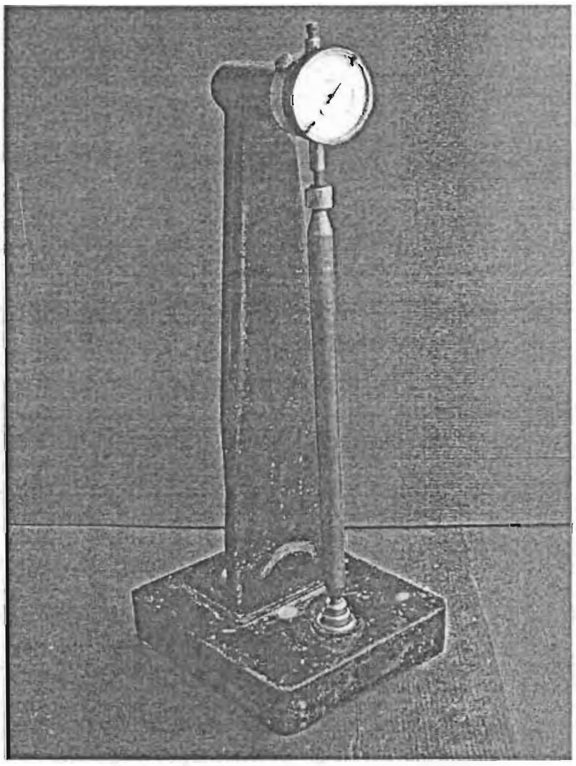
L_i = ค่าการวัดเริ่มต้นที่วัดครั้งแรกหลังจากการถอดแบบ

G = ค่าความยาวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหักความยาวของสลักเกลียวที่ฝังภายในออกแล้ว





รูปที่ 3.2 แบบหล่อและตัวอย่างแท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบการขยายตัว



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดการขยายตัวของคอนกรีต (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 [38]

3.3.6 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

CT {1, 5} {W, S} หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT1) และประเภทที่ 5 (CT5) เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยบ่มในน้ำประปา (W) และบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (S) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

{O, G1, G2} {P} {10, 20, 30, 40} {W, S} หมายถึง ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดและอัตราการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่างๆ กัน โดยมีความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้

{O, G1, G2} หมายถึง ขนาดความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน โดย {O} คือ ขนาดหยาบที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ {G1} คือ ขนาดละเอียดปานกลางที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15 - 20 โดยน้ำหนัก และ {G2} คือ ขนาดละเอียดมาก มีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

{P} หมายถึง เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้

{10, 20, 30, 40} หมายถึง ปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

{W, S} หมายถึง กลุ่มของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ โดย {W} คือ คอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา และ {S} คือ คอนกรีตที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างการใช้สัญลักษณ์

CT1W หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยบ่มในน้ำประปา

G1P10S หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดขนาดละเอียดปานกลาง (มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15 - 20 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 โดยแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

G2P40W หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดขนาดละเอียดมาก (มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 40 โดยบ่มในน้ำประปา

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

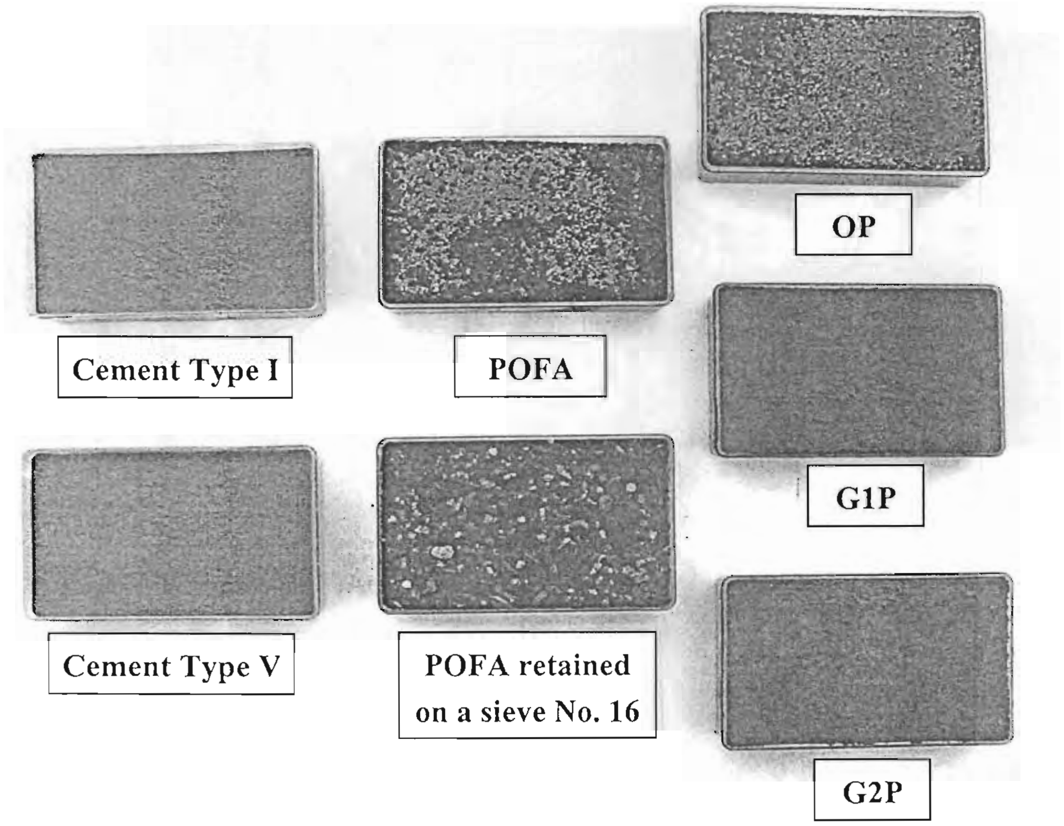
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต และผลกระทบที่เกิดกับคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การต้านทานการกัดกร่อนและการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย สีและลักษณะทั่วไป ลักษณะรูปร่างของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ การกระจายอนุภาค และความละเอียด ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุต่างๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติทั้งทางด้านการพัฒนากำลังและความคงทนของคอนกรีต

4.1.1 สีและลักษณะทั่วไป

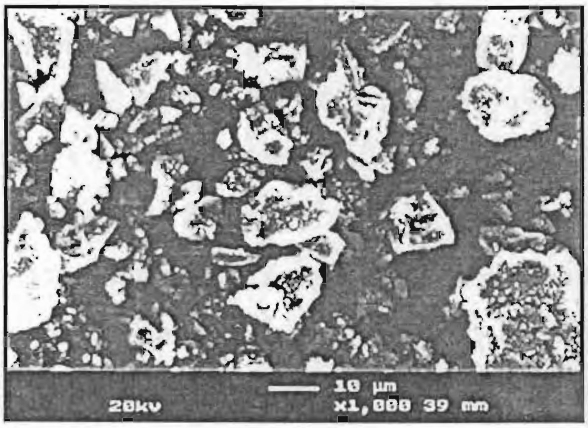
รูปที่ 4.1 แสดงสีและลักษณะทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีสีเทาอ่อน ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของเหล็ก โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะมีสีเทาเข้มกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มากกว่า [39] ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากโรงงานโดยตรงมีลักษณะค่อนข้างหยาบ และมีบางส่วนที่เผาไหม้ไม่หมดปะปน จึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ก่อนนำไปปรับปรุงความละเอียดโดยการบด สีของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีสีเทาออกดำและบางส่วนมีลักษณะเป็นเม็ดสีดำปะปนสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่เป็นเม็ดสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนซึ่งน่าจะเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่หลังจากบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น สีของเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีสีดำและดำมากยิ่งขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่เป็นเม็ดสีดำได้ถูกบดรวมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำให้เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสีเข้มขึ้น



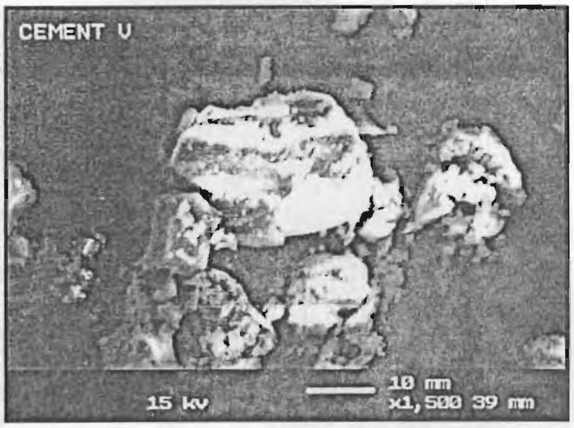
รูปที่ 4.1 สีและลักษณะทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

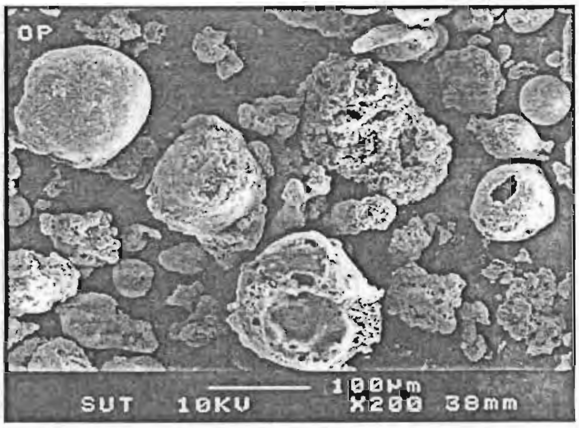
จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.6 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ กัน โดยรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน คือ ผิวขรุขระ เนื้อแน่น เป็นเหลี่ยมมุม และมีรูปร่างไม่แน่นอน รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดอนุภาคใหญ่ บางส่วนมีรูปร่างกลมมน เป็นโพรงอากาศ ความพรุนสูง และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง G1P และ G2P ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 มีลักษณะอนุภาคคล้ายกัน คือ อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลง เป็นเหลี่ยมมุม และมีรูปร่างไม่แน่นอนเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อนุภาคบางส่วนของเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ยังคงมีความพรุนปะปนอยู่เนื่องจากการบดที่ไม่ทั่วถึง ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P อนุภาคมีความพรุนค่อนข้างน้อยและมีอนุภาคขนาดเล็กกระจัดกระจายปะปนอยู่มากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



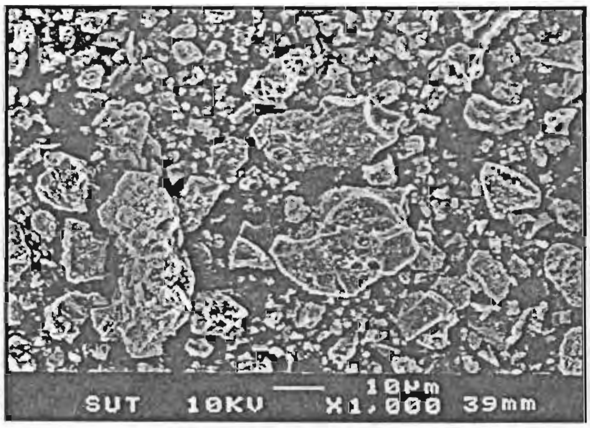
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



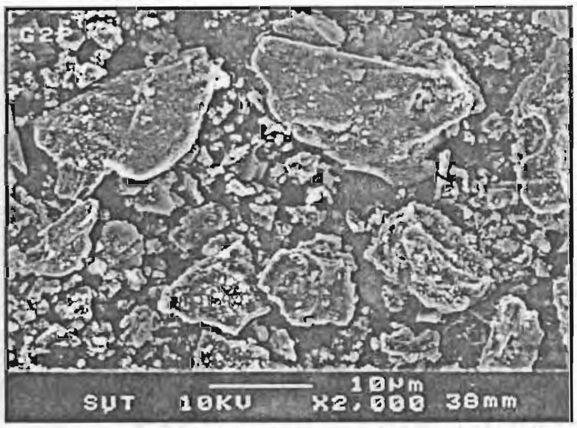
รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.5 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.6 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย คือเท่ากับ 3.17 และ 3.14 ตามลำดับ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.89 และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.36 และ 2.43 สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ตามลำดับ เห็นได้ว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง (เห็นได้ชัดจากภาพถ่ายขยายอนุภาคในรูปที่ 4.4) เมื่อผ่านการบดแล้วทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ความพรุนจึงลดลง ความถ่วงจำเพาะจึงมีค่าเพิ่มขึ้น [40] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และ Cheerarot [41] ที่พบว่าการบดไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ แต่ยังสามารถลดความพรุนได้ด้วย

4.1.4 ความละเอียดของวัสดุ

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) และการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 94.4 ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [5] กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 แต่เมื่อทำการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง ทำให้เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ลดลงเหลือร้อยละ 19.5 และ 1.0 ตามลำดับ สำหรับการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลนพบว่าจากความละเอียดที่สูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4,440 ซม ^{2}/ก ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,630 ซม ^{2}/ก ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 8,380 และ 10,460 ซม ^{2}/ก ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ประเภทมาก และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีความละเอียดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากสามารถลดขนาดอนุภาคแล้วยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุได้อีกด้วย ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP เนื่องจากมีอนุภาคที่ใหญ่และความพรุนสูง ทำให้อากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสมที่จะทำการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน

สังเกตว่าเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง G1P และ G2P มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภท แต่กลับมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ามาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง G1P และ G2P ยังมีความพรุนเหลืออยู่ (เห็นได้จากภาพถ่ายขยายอนุภาคในรูปที่ 4.5 และ 4.6) ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นอาจรวมถึงพื้นที่ผิวที่เกิดจากความพรุนภายในอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่ง

แตกต่างจากอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่มีเนื้อแน่น (เห็นได้จากภาพถ่ายขยายอนุภาคในรูปที่ 4.2 และ 4.3) ค่าพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นจึงเป็นพื้นที่ผิวโดยรอบของอนุภาค ด้วยสาเหตุนี้เถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง 2 ความละเอียด จึงมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภท

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on Sieve No. 325 (%)	Blaine Fineness (cm^2/g)	Median Particle Size, d_{50} (micron)
Cement Type I	3.14	N/A	3,630	14.7
Cement Type V	3.17	N/A	4,440	7.5
OP	1.89	94.4	N/A	183.0
G1P	2.36	19.5	8,380	15.9
G2P	2.43	1.0	10,460	7.4

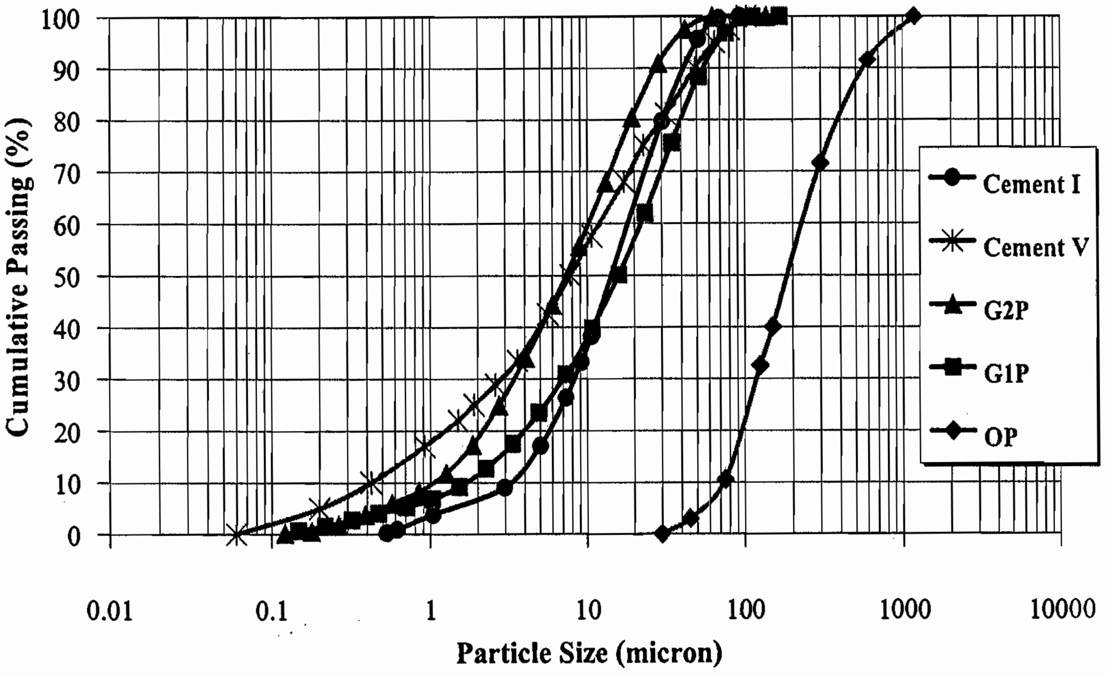
หมายเหตุ : N/A = Not Applied

4.1.5 การกระจายอนุภาคของวัสดุ

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.7 ไมครอน (จากตารางที่ 4.1) ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 50 ไมครอน ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ยังมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ มีค่าเท่ากับ 7.5 ไมครอน

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภท เห็นได้จากเส้นกราฟการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนไปทางด้านขวา โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 75 ถึง 580 ไมครอน และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ย พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดเท่ากับ 183 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทมาก ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 2 ถึง 56 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.9 ไมครอน เถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 1 ถึง 28 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.4 ไมครอน จะเห็นได้ว่าหลังจากการ

ปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีอนุภาคเล็กลง ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าปาล์มน้ำมันมีความใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 2 ประเภทมากขึ้น



รูปที่ 4.7 การกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก (G2P) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.41 และ 62.43 ตามลำดับ โดยปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ประเภทมี MgO ไม่เกินร้อยละ 6, ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีไม่เกินร้อยละ 3 และมี SO_3 ไม่เกินร้อยละ 3.5 และ 2.5 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ประเภทมีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน ASTM C 150 [42] กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาสารประกอบเคมีหลักของปูนซีเมนต์ ซึ่งคำนวณตามสมการของ Bogue [42] พบว่าปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 6.84 ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีเลย สำหรับปริมาณ C_3S และ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.86 และ 12.50 ตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.22 และ 24.87 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่าประเภทที่ 5 มากแต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ C_2S ต่ำกว่าประเภทที่ 5 ถึง 1 เท่าตัว

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน (G2P) มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 57.71 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 4.56 และ 3.30 ตามลำดับ โดยมีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.57 และมีปริมาณ SO_3 ร้อยละ 0.25 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีเท่ากับร้อยละ 10.52 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 [5] แล้ว ไม่สามารถจัดให้เป็นวัสดุปอซโซลาน Class N เนื่องจากผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีปริมาณไม่ถึงร้อยละ 70 และปริมาณ LOI มีเกินร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันจากงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดย จักรพล กลั่นมั่นคง และคณะ [4] มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 76.65, 0.77 และ 2.26 ตามลำดับ และยังแตกต่างจากงานศึกษาของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] ที่มีปริมาณ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.30, 2.56 และ 1.98 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ที่ไม่เหมือนกัน เช่น พันธุ์ของต้นปาล์มน้ำมัน อัตราส่วนผสมของกากปาล์มน้ำมัน อุณหภูมิและวิธีที่ใช้ในการเผา เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Cement Type I	Cement Type V	POFA (G2P)
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.90	22.15	57.71
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.76	3.51	4.56
Iron Oxide (Fe_2O_3)	3.41	5.57	3.30
Calcium Oxide (CaO)	65.41	62.43	6.55
Magnesium Oxide (MgO)	1.25	0.99	4.23
Sodium Oxide (Na_2O)	0.24	0.06	0.50
Potassium Oxide (K_2O)	0.35	0.17	8.27
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.71	1.07	0.25
Loss On Ignition (LOI)	0.99	1.69	10.52
Tricalcium Silicates (C_3S)	62.86	51.22	-
Dicalcium Silicates (C_2S)	12.50	24.87	-
Tricalcium Aluminate (C_3A)	6.84	0.00	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)	10.38	16.95	-

สำหรับสาเหตุที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P แต่ไม่วิเคราะห์ของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P เพราะการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด ไม่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันเปลี่ยนแปลงมากนัก [29]

4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตควบคุม CT1, CT5 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 4.3 โดยออกแบบคอนกรีตควบคุมให้มีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ในส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันใช้วิธีการปรับปริมาณน้ำเพื่อให้มีค่ายุบตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง10 ซม. พบว่าคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน คือ 0.70 ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเกือบทุกอัตราส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 นอกจากคอนกรีต G2P10 เท่านั้นที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 คือมีค่าเท่ากับ 0.68 โดยคอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.72, 0.77, 0.87 และ 0.95 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ขึ้นอีกจะยิ่งทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดใหญ่ เป็นโพรงอากาศ และมีความพรุนสูง จึงทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมาก

คอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.72, 0.73, 0.73 และ 0.74 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราการแทนที่เดียวกัน ในขณะที่คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.68, 0.70, 0.71 และ 0.72 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตลงได้ เนื่องจากการบดนอกจากทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กแล้ว ยังเป็นการทำลายโพรงอากาศและความพรุนที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีขนาดเล็กลงด้วย สังเกตได้จากค่าความถ่วงจำเพาะที่มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากทำการบด เมื่อโพรงอากาศและความพรุนของอนุภาคลดลง การดูดซึมน้ำจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ [43] และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] ที่พบว่าการบดวัสดุปอซโซลานให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น สามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมลงได้ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดขนาดละเอียดมากในอัตราส่วนที่สูงขึ้นยังคงมีแนวโน้มทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีตตามกฎของ Abrams [44] นอกจากนี้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ยังทำให้ความพรุนหรือช่องว่างในเนื้อคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความต้านทานการซึมผ่านลดลง [19]

4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตควบคุม CT1, CT5 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า คอนกรีตควบคุม CT1 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง 10 นาที และมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 6 ชั่วโมง 30 นาที ส่วนคอนกรีตควบคุม CT5 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 6 ชั่วโมง และมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 8 ชั่วโมง 45 นาที เห็นได้ว่าคอนกรีตควบคุม CT1 มีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม CT5 ทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้าย เนื่องจากปริมาณ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการก่อตัวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตควบคุม CT1 จึงเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม CT5

คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังบดทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายนานกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 และมีแนวโน้มนานขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่มากขึ้น โดยคอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง 40 นาที, 5 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง 50 นาที และ 6 ชั่วโมง 50 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 7 ชั่วโมง 30 นาที, 8 ชั่วโมง 30 นาที, 10 ชั่วโมง 30 นาที และ 12 ชั่วโมง 20 นาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตนานมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์สูงขึ้น ทำให้ C_3S และ C_3A มีปริมาณลดลง นอกจากนี้อนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีรูพรุนสูง จึงเกิดการดูดซึมน้ำมาก ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tay [21] ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น และยิ่งเพิ่มมากขึ้นหากใช้แทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น

คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง G1P และ G2P ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 4 ชั่วโมง 35 นาที ถึง 5 ชั่วโมง 10 นาที และ 4 ชั่วโมง 25 นาที ถึง 5 ชั่วโมง 10 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายอยู่ในช่วง 6 ชั่วโมง 40 นาที ถึง 7 ชั่วโมง 45 นาที และ 6 ชั่วโมง 35 นาที ถึง 7 ชั่วโมง 40 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มาก แสดงว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของคอนกรีตเร็วขึ้น เนื่องจากการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้นสามารถลดรูพรุนที่ดูดซึม

น้ำให้น้อยลง และขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วและดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ยังคงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายหากใช้แทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณ C_3S และ C_3A ที่ลดลงและแม้ว่าจะทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงขึ้น แต่เถ้าปาล์มน้ำมันยังคงมีความพรุนหลงเหลืออยู่ในอนุภาค จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น ส่วนการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ยังไม่สามารถลดระยะเวลาการก่อตัวให้อยู่ในระดับเดียวกับคอนกรีตควบคุม CT1 นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก G1P เป็น G2P ในอัตราส่วนผสมเดียวกัน ยังคงมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่ายุบตัว และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

Mixes	W / B	Slump (cm)	Setting Time (hr:min)	
			Initial	Final
CT1	0.70	6.5	4:10	6:30
CT5	0.70	6.5	6:00	8:45
OP10	0.72	6.5	4:40	7:30
OP20	0.77	6.0	5:00	8:30
OP30	0.87	8.0	5:50	10:30
OP40	0.95	8.0	6:50	12:20
G1P10	0.72	8.0	4:35	6:40
G1P20	0.73	7.5	4:40	7:05
G1P30	0.73	7.0	4:55	7:25
G1P40	0.74	7.0	5:10	7:45
G2P10	0.68	5.5	4:25	6:35
G2P20	0.70	6.0	4:35	7:00
G2P30	0.71	6.0	4:50	7:25
G2P40	0.72	6.0	5:10	7:40

4.5 กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อบ่มในน้ำประปา ซึ่งประกอบด้วยคอนกรีตควบคุม CT1W ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 310 กก/ซม^2 และมีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. คอนกรีตควบคุม CT5W ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมให้มีค่าการยุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม.

4.5.1 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1W และ CT5W

จากผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1W และ CT5W เมื่อบ่มในน้ำประปา ในตารางที่ 4.4 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1W ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน มีค่าเท่ากับ 178, 235, 280, 319 และ 362 กก/ซม^2 ตามลำดับ หลังจากนั้นที่อายุ 90, 180, 270 และ 360 วัน กำลังอัดยังคงมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าเท่ากับ 371, 385, 392 และ 397 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5W ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 122, 183, 252 และ 316 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งมีการพัฒนาของกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W แต่หลังจากที่อายุ 28 วันไปแล้ว กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W โดยที่อายุ 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน คอนกรีตควบคุม CT5W มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 373, 394, 415, 423 และ 429 กก/ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 103 ถึง 108 ของคอนกรีตควบคุม CT1W สังเกตได้ว่าในช่วงอายุต้นของคอนกรีตควบคุม CT5W มีการพัฒนาของกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W มาก โดยเฉพาะที่อายุ 3 วันกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5W มีค่าเพียงร้อยละ 69 ของคอนกรีตควบคุม CT1W เท่านั้น แม้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าประเภทที่ 1 ก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3S น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงร้อยละ 11.4 ทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีตควบคุม CT5W มีค่าต่ำ แต่ปริมาณ C_2S ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีปริมาณสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 2 เท่า จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5W ในช่วงอายุปลายสามารถพัฒนาให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของวีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] และประกาศ ทองประไพ [45]

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา

Mixes	W/B	Slump (cm)	Compressive Strength (ksc) ***Normalized Compressive Strength (%)***								
			3 days	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	180 days	270 days	360 days
CT1W	0.70	6.5	178 ***100***	235 ***100***	280 ***100***	319 ***100***	362 ***100***	371 ***100***	385 ***100***	392 ***100***	397 ***100***
CT5W	0.70	6.5	122 ***69***	183 ***78***	252 ***90***	316 ***99***	373 ***103***	394 ***106***	415 ***108***	423 ***108***	429 ***108***
OP10W	0.72	6.5	127 ***72***	175 ***74***	214 ***76***	245 ***77***	281 ***78***	292 ***79***	308 ***80***	310 ***79***	320 ***81***
OP20W	0.77	6.0	109 ***61***	150 ***64***	185 ***66***	212 ***66***	247 ***68***	255 ***69***	266 ***69***	270 ***69***	270 ***68***
OP30W	0.87	8.0	80 ***45***	108 ***46***	127 ***45***	150 ***47***	174 ***48***	188 ***51***	193 ***50***	197 ***50***	202 ***51***
OP40W	0.95	8.0	42 ***24***	54 ***23***	76 ***27***	99 ***31***	108 ***30***	115 ***31***	118 ***31***	120 ***31***	118 ***30***
G1P10W	0.72	8.0	158 ***89***	224 ***95***	264 ***94***	301 ***94***	350 ***97***	376 ***101***	390 ***101***	397 ***101***	402 ***101***
G1P20W	0.73	7.5	140 ***79***	191 ***81***	226 ***81***	269 ***84***	316 ***87***	334 ***90***	347 ***90***	356 ***91***	359 ***90***
G1P30W	0.73	7.0	121 ***68***	172 ***73***	209 ***74***	238 ***75***	285 ***79***	295 ***80***	302 ***78***	307 ***78***	308 ***78***
G1P40W	0.74	7.0	118 ***66***	155 ***66***	187 ***67***	226 ***71***	267 ***74***	270 ***73***	277 ***72***	281 ***72***	286 ***72***
G2P10W	0.68	5.5	176 ***99***	239 ***102***	285 ***102***	319 ***100***	374 ***103***	390 ***105***	400 ***104***	411 ***105***	419 ***106***
G2P20W	0.70	6.0	170 ***96***	230 ***98***	275 ***98***	316 ***99***	370 ***102***	386 ***104***	395 ***103***	405 ***103***	408 ***103***
G2P30W	0.71	6.0	150 ***84***	209 ***89***	248 ***88***	301 ***94***	356 ***98***	368 ***99***	376 ***98***	381 ***97***	388 ***98***
G2P40W	0.72	6.0	117 ***66***	182 ***77***	237 ***85***	275 ***86***	317 ***88***	322 ***87***	330 ***86***	337 ***86***	340 ***86***

<u>หมายเหตุ</u> : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W

4.5.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดกับอายุการบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงดังในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราการแทนที่มีการพัฒนากำลังอัดที่ต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นยิ่งทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง โดยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ทุกอายุการทดสอบ

ที่อายุ 3 วัน คอนกรีต OP10W, OP20W, OP30W และ OP40W มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 127, 109, 80 และ 42 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นเพียงร้อยละ 72, 61, 45 และ 24 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มเป็น 175, 150, 108 และ 54 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 74, 64, 46 และ 23 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ เมื่อมีอายุเพิ่มเป็น 7 วัน ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 245, 212, 150 และ 99 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 77, 66, 47 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ และที่อายุ 60 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มเป็น 281, 247, 174 และ 108 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 68, 48 และ 30 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงอายุปลายกำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นน้อยมาก โดยที่อายุ 90 วัน คอนกรีต OP10W, OP20W, OP30W และ OP40W มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292, 255, 188 และ 115 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 79, 69, 51 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 308, 266, 193 และ 118 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 80, 69, 50 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ ที่อายุ 180 วัน หลังจากนั้นที่อายุ 270 ถึง 360 วัน กำลังอัดมีค่าเกือบคงที่ โดยที่อายุ 360 วัน คอนกรีต OP10W, OP20W, OP30W และ OP40W มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 320, 270, 202 และ 118 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 81, 68, 51 และ 30 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ

เห็นได้ว่าตลอดอายุการทดสอบนี้ ยังไม่มีคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนผสมใด ที่มีการพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ได้ และมีแนวโน้มเป็นเช่นนี้ตลอดไป เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดอนุภาคใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเนื่องจากการดูดซึมน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่อนุภาคมีความพรุนสูง เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตสูงขึ้น ซึ่งการที่คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงตามกฎของ Abrams [44] จากอนุภาคที่ใหญ่และมีความพรุนสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP นี้ การใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงจึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงอย่างมาก ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมัน OP จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

4.5.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดกับอายุการบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P เป็นส่วนผสม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่อัตราการแทนที่เดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P มีกำลังอัดสูงกว่ามากในทุกอายุการทดสอบ โดยเฉพาะที่อัตราการแทนที่สูง โดยคอนกรีต G1P10W, G1P20W, G1P30W และ G1P40W ที่อายุ 3 และ 7 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 158, 140, 121, 118 และ 224, 191, 172, 155 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 89, 79, 68, 66 และ 95, 81, 73, 66 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดยังคงมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่มีอัตราการลดลงของกำลังอัดน้อยกว่าของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และเมื่อพิจารณาที่อายุ 28 และ 60 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 301, 269, 238, 226 และ 350, 316, 285, 267 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 94, 84, 75, 71 และ 97, 87, 79, 74 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตยังคงมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 90 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มเป็น 376, 334, 295 และ 270 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 90, 80 และ 73 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ เห็นได้ว่าอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนผสมเดียวที่สามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ได้ และที่อายุ 180, 270 และ 360 วัน คอนกรีต G1P10W ยังคงเป็นส่วนผสมเดียวที่มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 390, 397 และ 402 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 101 และ 101 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ ส่วนอัตราการแทนที่ร้อยละ 20 กำลังอัดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดี คือสูงกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม CT1W โดยคอนกรีต G1P20W ที่อายุ 180, 270 และ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 374, 356 และ 359 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 90, 91 และ 90 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต G1P30W และ G1P40W ที่อายุเดียวกันมีกำลังอัดเท่ากับ 302, 307, 308 และ 277, 281, 286 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 78, 78 และ 72, 72, 72 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ

4.5.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

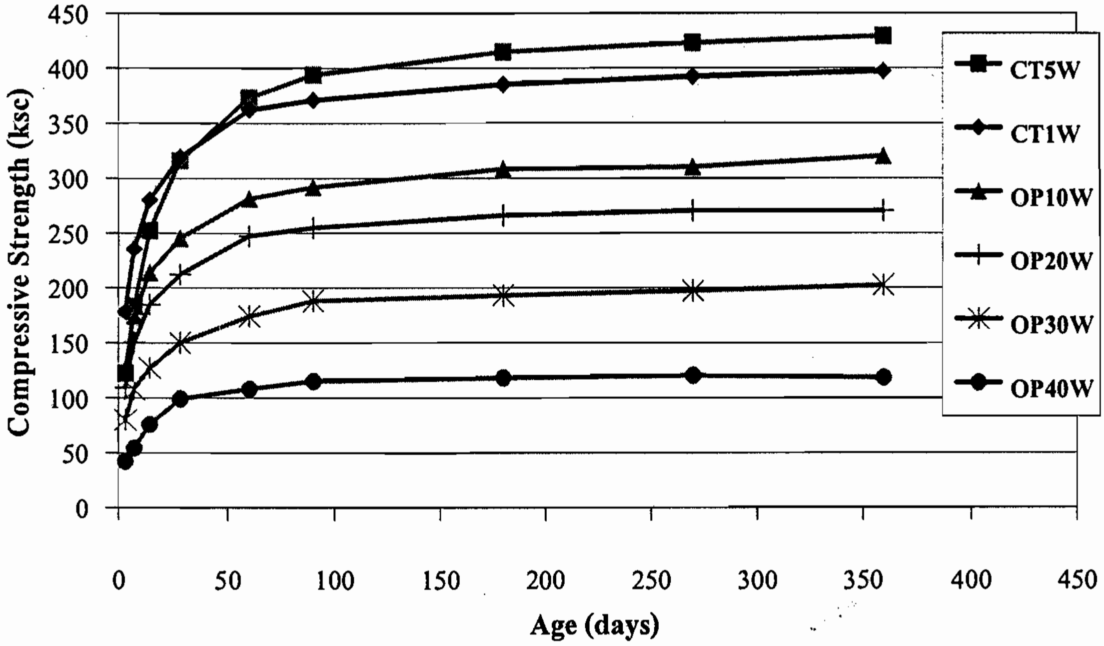
สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ซึ่งบดละเอียดมากจนมีอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เพียงร้อยละ 1 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดกับอายุการทดสอบในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีกำลังอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P โดยที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 มีค่ากำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตั้งแต่ที่อายุ 3 วัน และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 กำลังอัดมีค่าสูงกว่า

ร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีต G2P10W, G2P20W, G2P30W และ G2P40W ที่อายุ 3 และ 7 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 176, 170, 150, 117 และ 239, 230, 209, 182 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 99, 96, 84, 66 และ 102, 98, 89, 77 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ สังเกตว่าอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ยังคงเป็นอัตราส่วนผสมเดียวที่สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W และที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 40 ของคอนกรีต G2P40W หลังจากที่อายุ 3 วันไปแล้ว มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีกว่าของคอนกรีต G1P40W มาก ส่วนที่อายุ 14 และ 28 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 285, 275, 248, 237 และ 319, 316, 301, 275 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 102, 98, 88, 85 และ 100, 99, 94, 86 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 28 วัน ค่าร้อยละกำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1W ของคอนกรีต G2P10 มีค่าลดลงจากที่อายุ 14 วัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่เล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถแทรกเข้าไปในช่วงว่างต่างๆ ของคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น ในช่วงอายุต้นๆ กำลังอัดจึงมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W [29]

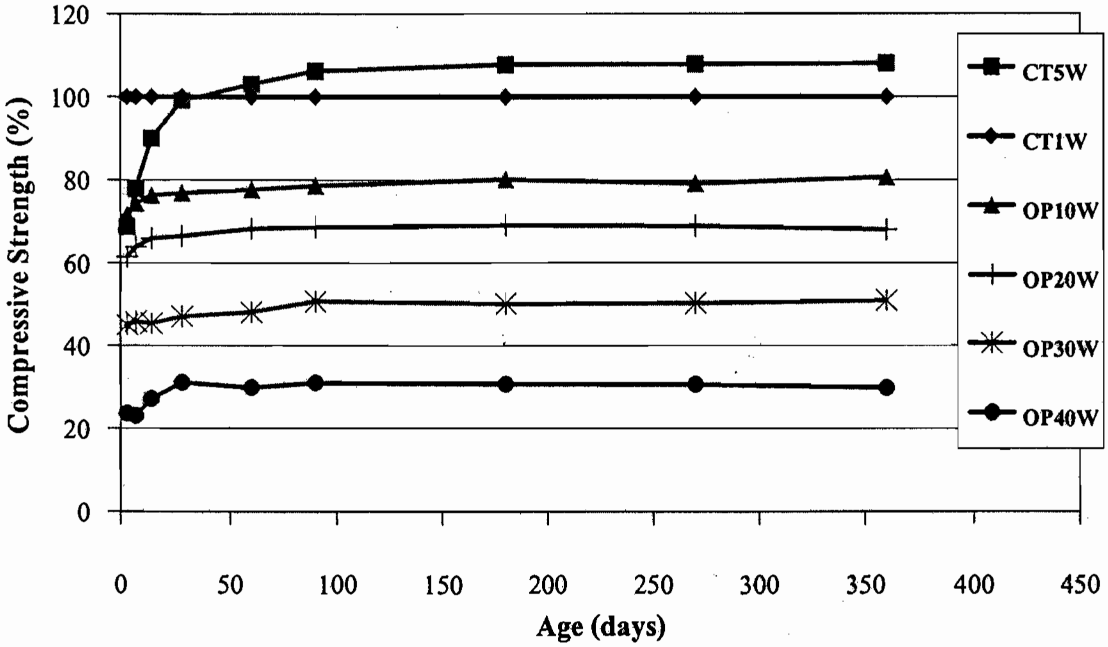
เมื่อพิจารณาที่อายุ 60 และ 90 วัน คอนกรีต G2P10W, G2P20W, G2P30W และ G2P40W มีกำลังอัดเท่ากับ 374, 370, 356, 317 และ 390, 386, 368, 322 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 102, 98, 88 และ 105, 104, 99, 87 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตยังมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น โดยคอนกรีต G2P20W สามารถพัฒนากำลังอัดจนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W ได้ที่อายุ 60 วัน จากนั้นในช่วงอายุปลายกำลังอัดของคอนกรีตยังมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 180, 270 และ 360 วัน คอนกรีต G2P10W และ G2P20W ยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1W คือมีค่าเท่ากับ 400, 411, 419 และ 395, 405, 408 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 104, 105, 106 และ 103, 103, 103 ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต G2P30W ที่อายุเดียวกันกำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1W โดยมีค่าเท่ากับ 376, 381 และ 388 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 98, 97 และ 98ของคอนกรีตควบคุม CT1W ตามลำดับ

ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น เนื่องจากความละเอียดที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วและดีขึ้น นอกจากนี้ความละเอียดที่เพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันยังสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างต่างๆ ของคอนกรีตได้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น สังเกตได้จากความหนาแน่น (Density) ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ OP ตามลำดับ จากตารางในภาคผนวก ค คอนกรีต G2P40W มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2347 กก/ม^3 ส่วนคอนกรีต G1P40W

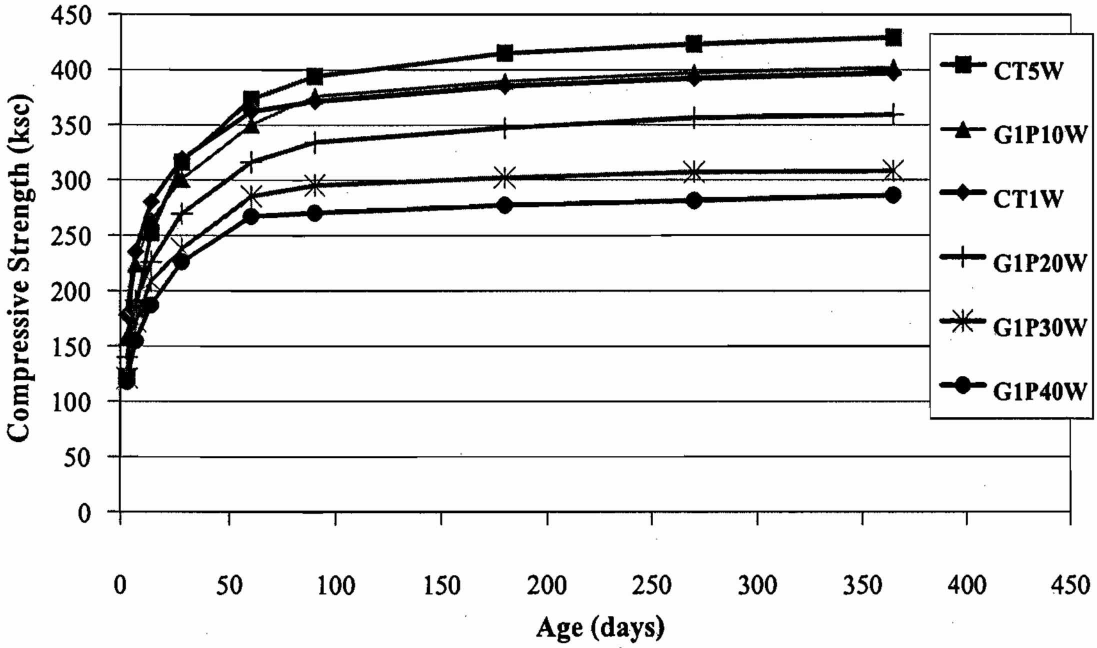
และ OP40W มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2338 และ 2241 กก/ม^3 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากการอัดแน่นของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงนี้ จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งการอัดแน่นของคอนกรีตยังส่งผลให้สามารถต้านทานการซึมผ่านจากสารละลายต่างๆ ได้ดีขึ้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากการดูดน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และอัตราการแทนที่ที่สูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมาก ปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงอาจไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้



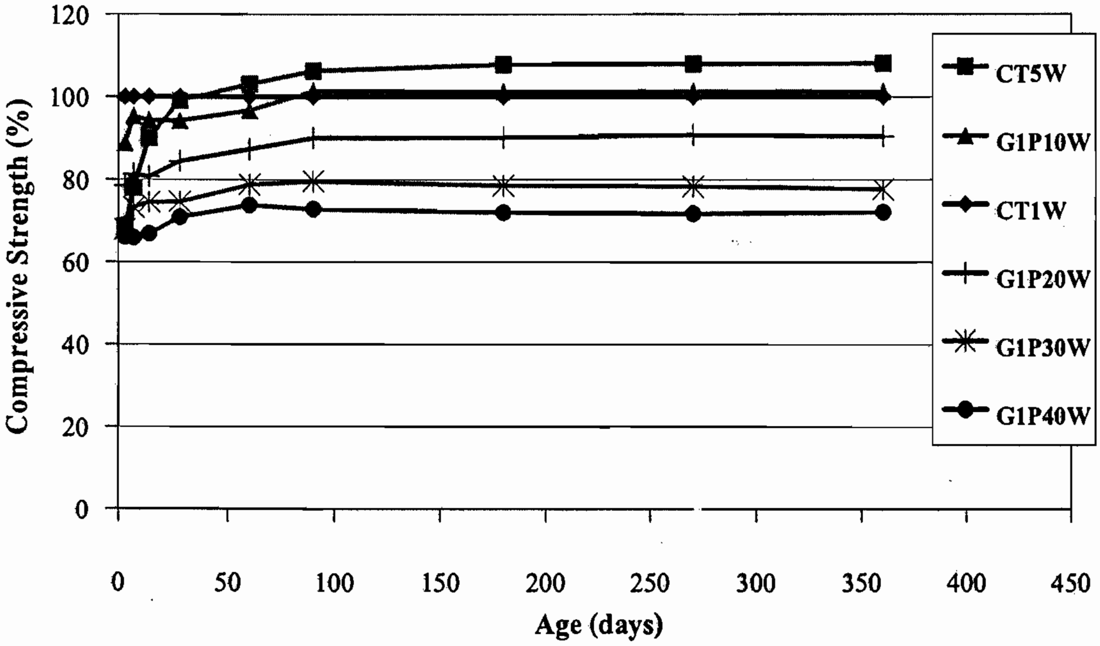
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



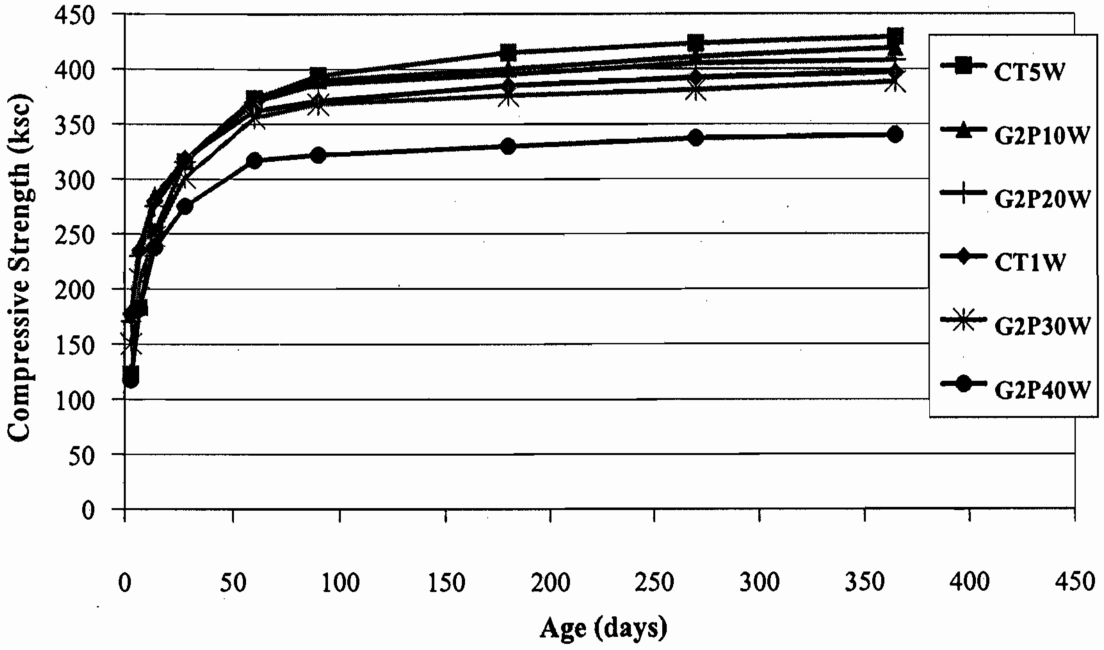
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



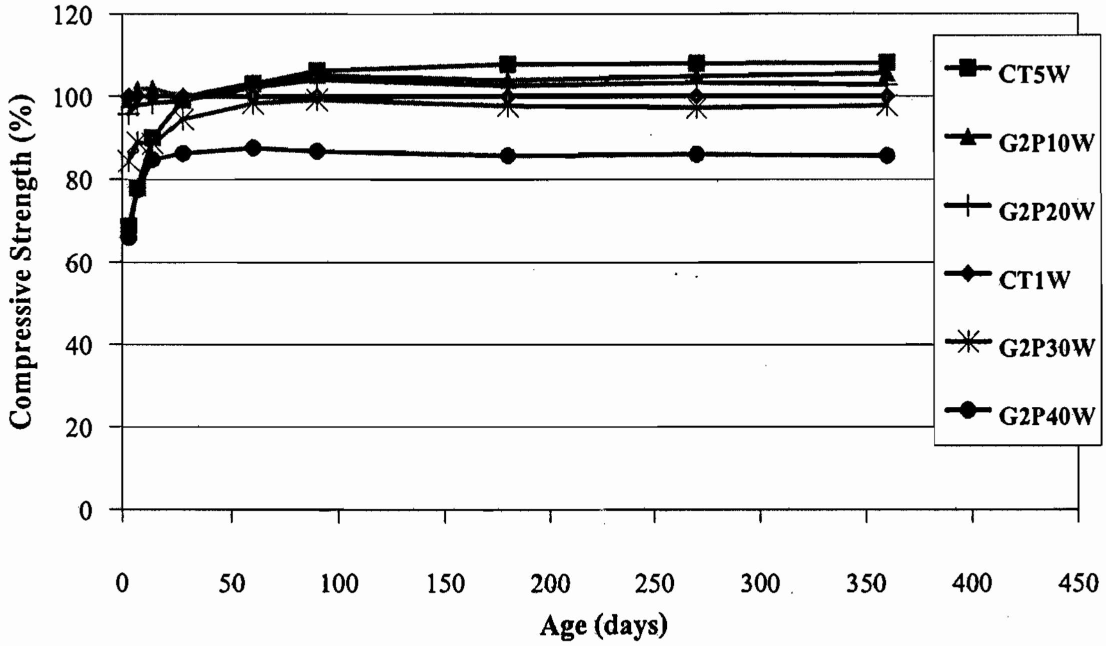
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา
ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา
ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



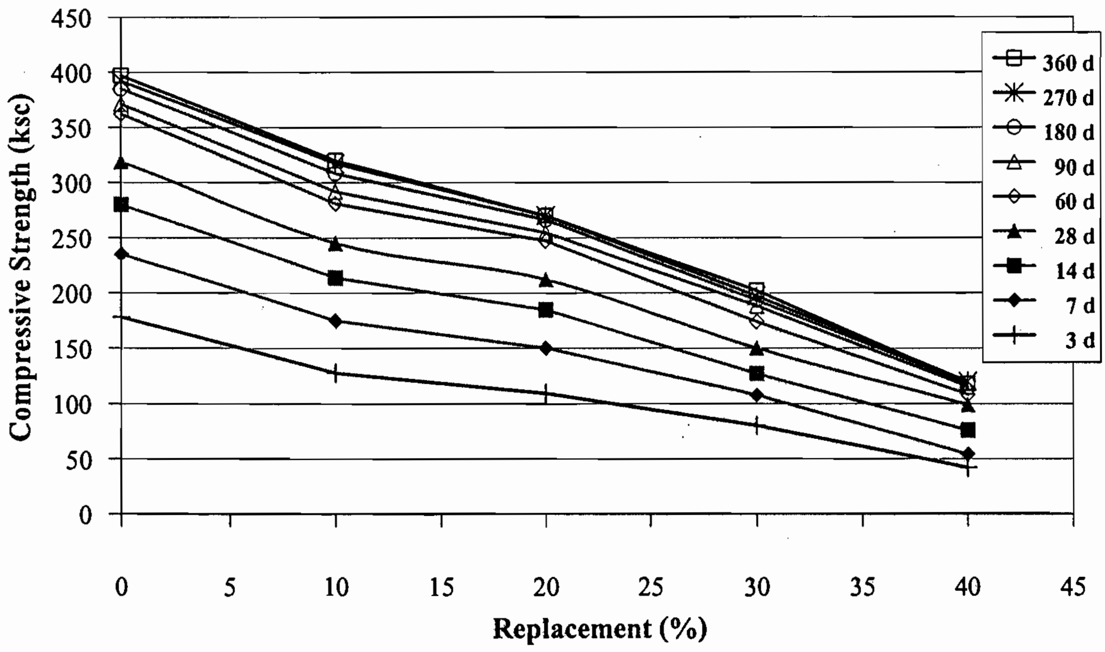
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา
ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P



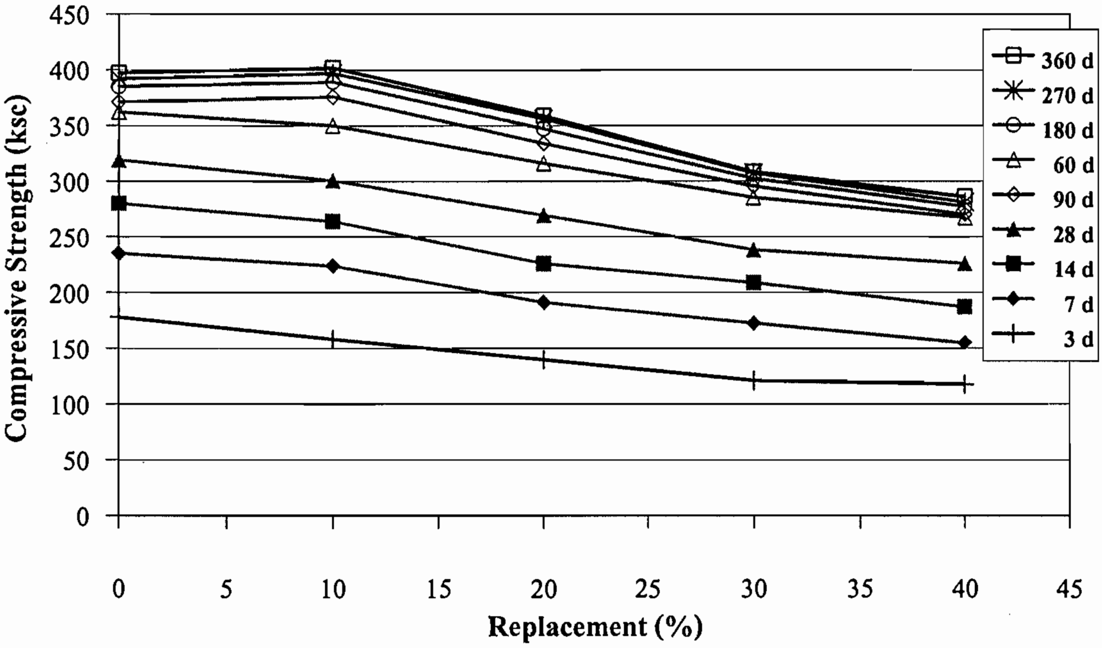
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุบ่มในน้ำประปา
ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

4.5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันและกำลังอัดของคอนกรีต

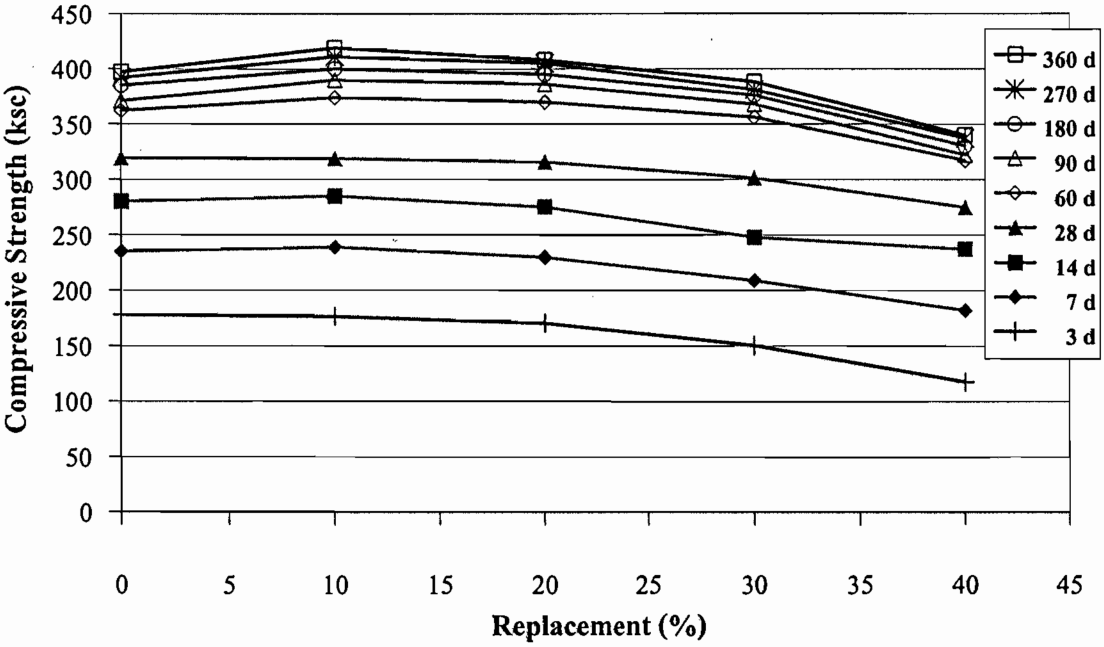
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีตซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุการทดสอบมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (CT1W) และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่สูงขึ้น โดยกำลังอัดมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มาก โดยในช่วงอายุต้นคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สังเกตจากเส้นกราฟของแต่ละอายุที่มีระยะห่างมากกว่าเส้นกราฟของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งที่การแทนที่ร้อยละ 10 ของเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง G1P และ G2P เป็นอัตราส่วนที่มีกำลังอัดสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (CT1W) ที่อายุ 90 และ 7 วัน ตามลำดับ และกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่ร้อยละ 20 และ 30 ของเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ตามลำดับ คอนกรีตยังคงมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน (CT1W)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดที่อายุต่างๆ ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

4.6 กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำเช่นเดียวกับตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา โดยเริ่มทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 60 วัน จนถึง 360 วัน

4.6.1 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ในรูปที่ 4.17 พบว่าที่อายุ 60 ถึง 180 วันของการทดสอบ คอนกรีตควบคุมทั้งสองมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคอนกรีตควบคุม CT5S มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S ทุกอายุการทดสอบ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มี C_2S ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายในปริมาณที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยคอนกรีตควบคุม CT1S ที่อายุ 60, 90 และ 180 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 359, 376 และ 393 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตควบคุม CT5S ที่อายุเดียวกัน มีกำลังอัดเท่ากับ 375, 399 และ 431 กก/ซม^2 หลังจากนั้นที่อายุ 270 วัน กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S เริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่คอนกรีต CT5S ยังคงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ที่อายุ 270 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 390 และ 432 กก/ซม^2 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อายุ 360 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S มีค่าลดลงเหลือ 385 กก/ซม^2 ซึ่งลดลงจากที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 8 กก/ซม^2 ค่ากำลังอัดที่ลดลงอย่างต่อเนื่องนี้อาจเป็นเพราะสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ซึมเข้าไปในคอนกรีตและทำลาย C-S-H ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง ส่วนคอนกรีตควบคุม CT5S ที่อายุ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 427 กก/ซม^2 ซึ่งมีค่าลดลงจากที่อายุ 270 วันเพียงเล็กน้อย

สังเกตได้ว่าคอนกรีตควบคุม CT5S มีกำลังอัดที่ลดลงน้อยกว่าและมีอัตราการลดลงของกำลังอัดช้ากว่าคอนกรีตควบคุม CT1S แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน มีความต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28], ประกาศ ทองประไพ [45] และพิชญา ธีระมิตร [46] ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่นอกจากจะมี C_3A ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตในปริมาณที่มากกว่าแล้ว ยังมีอัตราส่วนของ C_3S/C_2S สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ถึง 2 เท่า ซึ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S มากหรือมีอัตราส่วนของ C_3S/C_2S สูง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S น้อยหรือมีอัตราส่วน C_3S/C_2S ต่ำ [16, 17, 18]

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Mixes	W/B	Slump (cm)	Compressive Strength (ksc) *Normalized Compressive Strength (%)*				
			60 days	90 days	180 days	270 days	360 days
CT1S	0.70	6.5	359 ***100***	376 ***100***	393 ***100***	390 ***100***	385 ***100***
CT5S	0.70	6.5	375 ***104***	399 ***106***	431 ***110***	432 ***111***	427 ***111***
OP10S	0.72	6.5	278 ***77***	300 ***80***	325 ***83***	332 ***85***	340 ***88***
OP20S	0.77	6.0	244 ***68***	265 ***70***	286 ***73***	289 ***74***	287 ***75***
OP30S	0.87	8.0	177 ***49***	190 ***51***	206 ***52***	213 ***55***	212 ***55***
OP40S	0.95	8.0	113 ***31***	121 ***32***	131 ***33***	133 ***34***	123 ***32***
G1P10S	0.72	8.0	347 ***97***	380 ***101***	403 ***103***	413 ***106***	410 ***106***
G1P20S	0.73	7.5	317 ***88***	341 ***91***	370 ***94***	377 ***97***	366 ***95***
G1P30S	0.73	7.0	288 ***80***	306 ***81***	330 ***84***	333 ***85***	315 ***82***
G1P40S	0.74	7.0	269 ***75***	281 ***75***	302 ***77***	308 ***79***	289 ***75***
G2P10S	0.68	5.5	383 ***107***	408 ***109***	440 ***112***	449 ***115***	431 ***112***
G2P20S	0.70	6.0	377 ***105***	398 ***106***	429 ***109***	433 ***111***	414 ***108***
G2P30S	0.71	6.0	361 ***101***	380 ***101***	407 ***104***	413 ***106***	394 ***102***
G2P40S	0.72	6.0	321 ***89***	339 ***90***	358 ***91***	366 ***94***	342 ***89***

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S

4.6.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในรูปที่ 4.19 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราการแทนที่มีการพัฒนากำลังอัดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นยิ่งทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง โดยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ตลอดอายุการทดสอบเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่บ่มในน้ำประปา โดยคอนกรีต OP10S, OP20S, OP30S และ OP40S ที่อายุ 60 และ 90 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 278, 244, 177, 113 และ 300, 265, 190, 121 กก/ซม^2 และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 325, 286, 206 และ 131 กก/ซม^2 ที่อายุ 180 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมเริ่มมีค่าคงที่ โดยที่อายุ 270 วัน คอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 332, 289, 213 และ 133 กก/ซม^2 และเมื่อพิจารณาที่อายุ 360 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เป็นอัตราส่วนผสมเดียวที่กำลังอัดยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีต OP10S ที่อายุ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 340 กก/ซม^2 ส่วนอัตราการแทนที่อื่นๆ มีค่ากำลังอัดลดลงเล็กน้อย โดยคอนกรีต OP20S, OP30S และ OP40S ที่อายุ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 287, 212 และ 123 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากที่อายุ 270 วัน เท่ากับ 2, 1 และ 10 กก/ซม^2 ตามลำดับ

เห็นได้ว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 กำลังอัดของคอนกรีตยังไม่ลดลง ส่วนการแทนที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งกำลังอัดที่ลดลงนี้ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดจากผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 พบว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตยังคงอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ มีเพียงคราบสีขาวเคลือบอยู่ที่ผิว เช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S (รูปที่ 4.18) ซึ่งคราบสีขาวที่เคลือบอยู่ที่ผิวนี้คือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) หรือ Brucite และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) หรือ ยิบซั่ม (Gypsum) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) [47, 48]

4.6.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P พบว่าที่อายุ 60 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในทุกอัตราส่วนการแทนที่มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้ง 2 ประเภท โดยมีค่าเท่ากับ 347, 317, 288 และ 269 กก/ซม^2 สำหรับคอนกรีต G1P10S, G1P20S, G1P30S และ G1P40S ตามลำดับ ต่อมาที่อายุ 90 และ 180 วัน คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 380, 341, 306, 281 และ 403, 370, 330, 302 กก/ซม^2 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นส่วนผสมเดียวที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S ส่วนการแทนที่อื่นๆ กำลังอัดมีค่าลดลงตามอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P แม้ว่าจะผ่านการบดให้มีความละเอียดสูงขึ้นแล้ว แต่ยังคงมีความพรุน

หลงเหลืออยู่ในอนุภาค จึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มการแทนที่ กำลังอัดจึงมีค่าลดลง และที่อายุ 270 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือเท่ากับ 413, 377, 333 และ 308 กก/ซม^2 ตามลำดับ แต่หลังจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตเริ่มมีค่าลดลง โดยที่อายุ 360 วัน คอนกรีต G1P10S, G1P20S, G1P30S และ G1P40S มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 410, 366, 315 และ 289 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากที่อายุ 270 วัน เท่ากับ 3, 11, 18 และ 19 กก/ซม^2 ตามลำดับ แม้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ทุกอัตราส่วนการแทนที่มีกำลังอัดลดลงที่อายุ 360 วัน แต่คอนกรีต G1P10S ยังคงมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S เท่ากับร้อยละ 6 และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT5S พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT5S ในทุกอายุการทดสอบ และเมื่อพิจารณาก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P จากรูปที่ 4.22 พบว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตมี Brucite และยิบซั่ม เคลือบอยู่ที่ผิวเป็นคราบสีขาว เช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และยังคงอยู่ในสภาพที่ดี มีเพียงบริเวณขอบเท่านั้นที่เกิดการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตเพียงเล็กน้อย

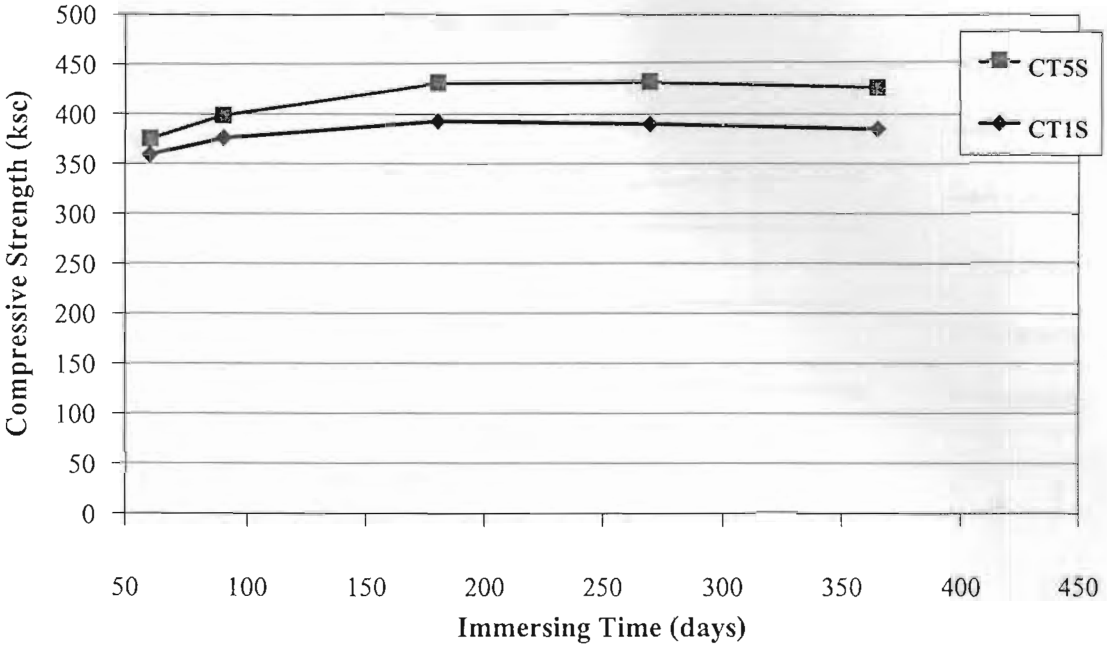
4.6.4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S ตลอดอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยที่อายุ 60, 90, 180 และ 270 วัน คอนกรีต G2P10S และ G2P20S มีกำลังอัดเท่ากับ 383, 408, 440, 449 และ 377, 398, 429, 433 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต G2P30S และ G2P40S ที่อายุเดียวกันมีกำลังอัดเท่ากับ 361, 380, 407, 413 และ 321, 339, 358, 366 กก/ซม^2 ตามลำดับ เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ทุกอัตราส่วนผสม สามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้อย่างต่อเนื่องแม้ว่าแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งในช่วงอายุนี้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1S พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S มีการพัฒนาที่น้อยกว่า และมีค่าลดลงหลังจากที่อายุ 180 วันไปแล้ว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT5S เห็นได้ว่าคอนกรีต G2P10S และ G2P20S มีกำลังอัดที่สูงกว่าและใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT5S ตามลำดับ และเมื่ออายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มเป็น 360 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน C2P ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดลดลง โดยคอนกรีต G2P10S, G2P20S, G2P30S และ G2P40S ที่อายุ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 431, 414, 394 และ 342 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากที่อายุ 270 วันเท่ากับ 18, 19, 19 และ 24 กก/ซม^2 ตามลำดับ แต่คอนกรีต G2P10S ยังคงมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT5S และจากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P เกิดการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตเฉพาะที่บริเวณขอบเท่านั้น ซึ่งไม่รุนแรงมากนักหากพิจารณา

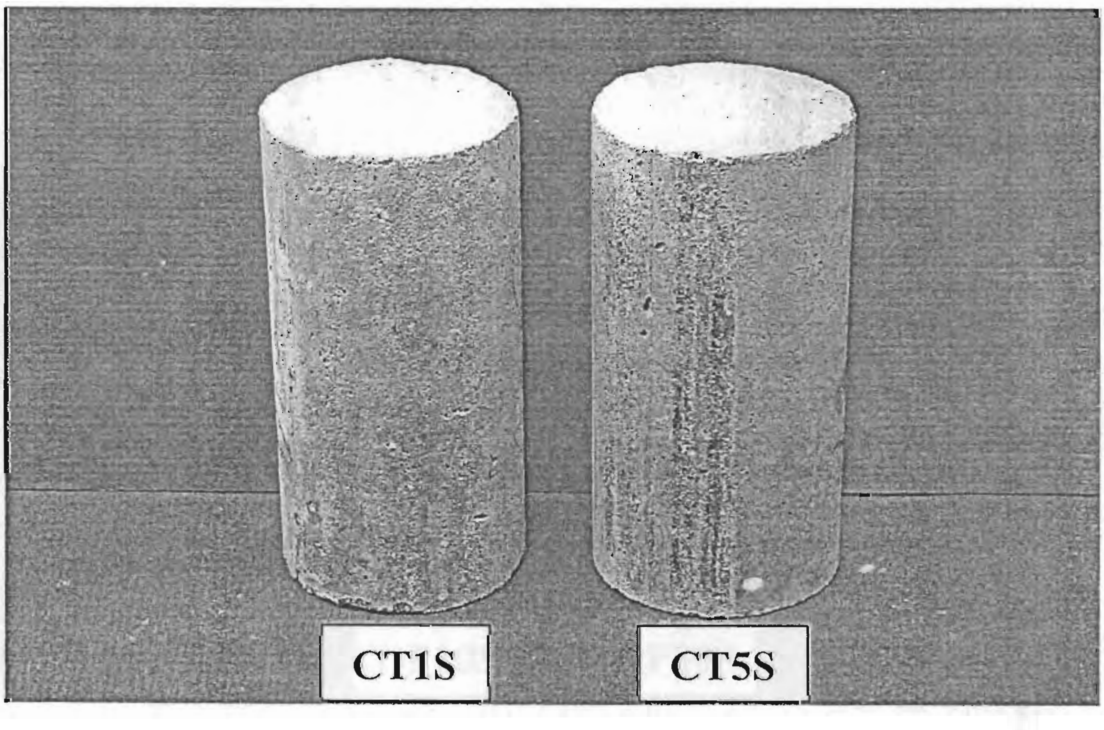
โดยรวมแล้วก้อนตัวอย่างคอนกรีตยังอยู่ในสภาพที่ดี โดยมี Brucite และยิบซั่ม เคลือบที่ผิวของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P

จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 360 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องแม้แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แต่หลังจากที่อายุ 180 วัน กำลังอัดเริ่มมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมีค่าลดลงหลังจากที่อายุ 270 วันไปแล้ว โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ที่อายุ 360 วัน มีค่าลดลงจากที่อายุ 270 วัน เท่ากับ -8, 2, 1, 10 และ 3, 11, 18, 19 กก/ซม^2 ตามลำดับ และเท่ากับ 18, 19, 19, 24 กก/ซม^2 ตามลำดับสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P จากค่ากำลังอัดที่ลดลงนี้เห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันให้สูงขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 40 มีแนวโน้มทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนสูง แม้ว่าจะผ่านการบดให้มีความละเอียดสูงขึ้นแล้ว แต่เถ้าปาล์มน้ำมันยังคงมีความพรุนหลงเหลืออยู่ในอนุภาค จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำมีรูพรุนมาก ซึ่งทำให้เกิดการซึมผ่านของน้ำสูง เมื่อคอนกรีตมีการซึมผ่านของน้ำสูงจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้นด้วย [49]

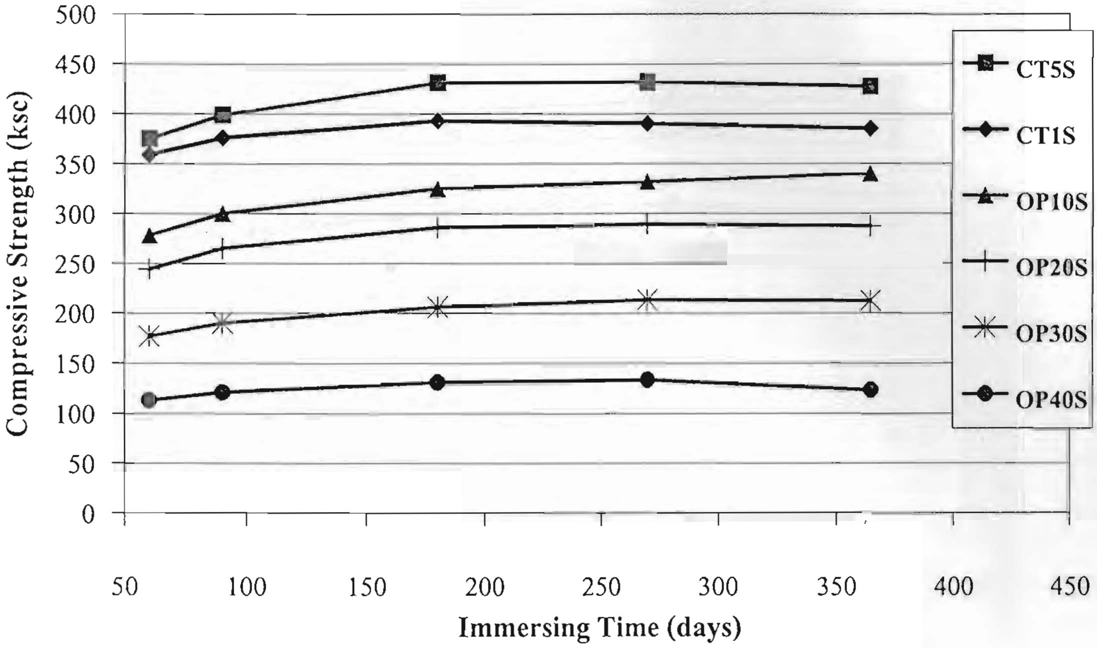
อีกเหตุผลหนึ่งก็คือการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงทำให้เกิด C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น แต่ C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีโครงสร้างที่แข็งแรงน้อยกว่าและมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [50, 51, 52] และจากสาเหตุนี้ยังส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดลดลงและเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้ C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วและมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ ดังนั้นจึงทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิด M-S-H มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง M-S-H ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารสีขาวนุ่มที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [48, 51, 53] จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงและเกิดการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีต โดยการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและมักเกิดที่บริเวณขอบของก้อนตัวอย่างคอนกรีต เนื่องจากบริเวณขอบเป็นส่วนที่มีความหนาต่ำสุด สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย การหลุดร่อนส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าว



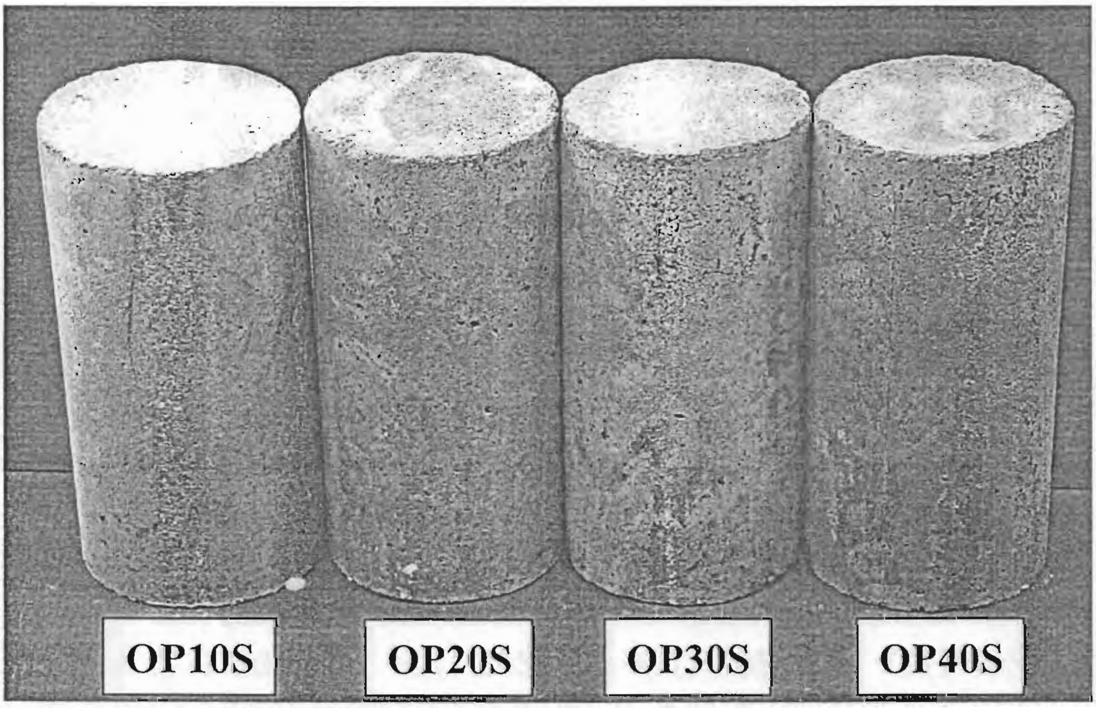
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S



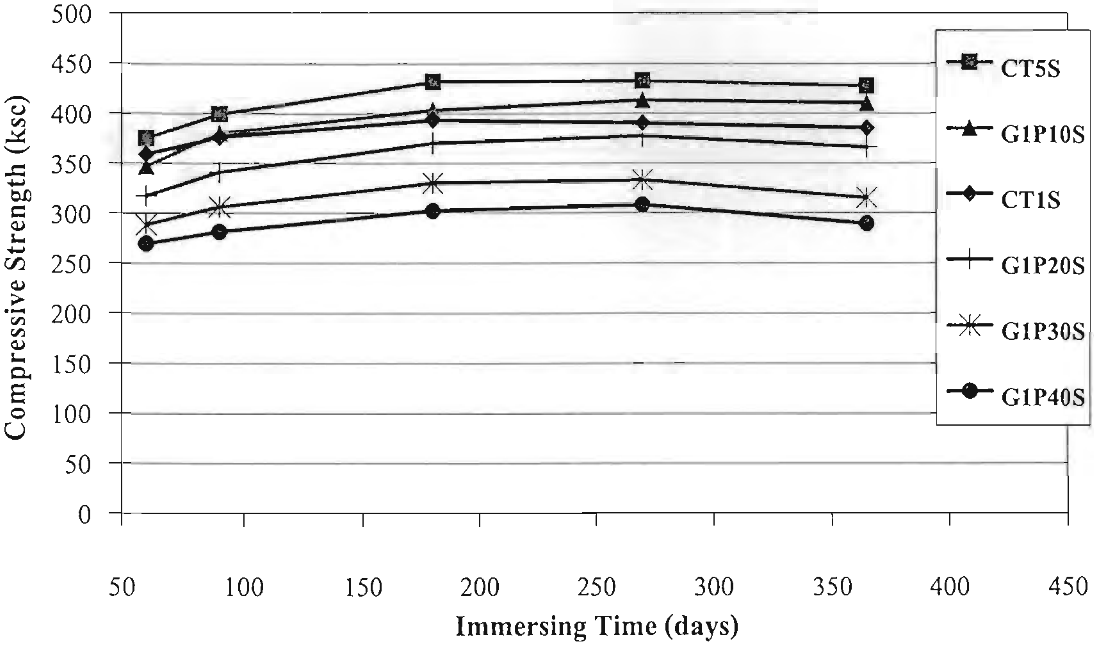
รูปที่ 4.18 คอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน



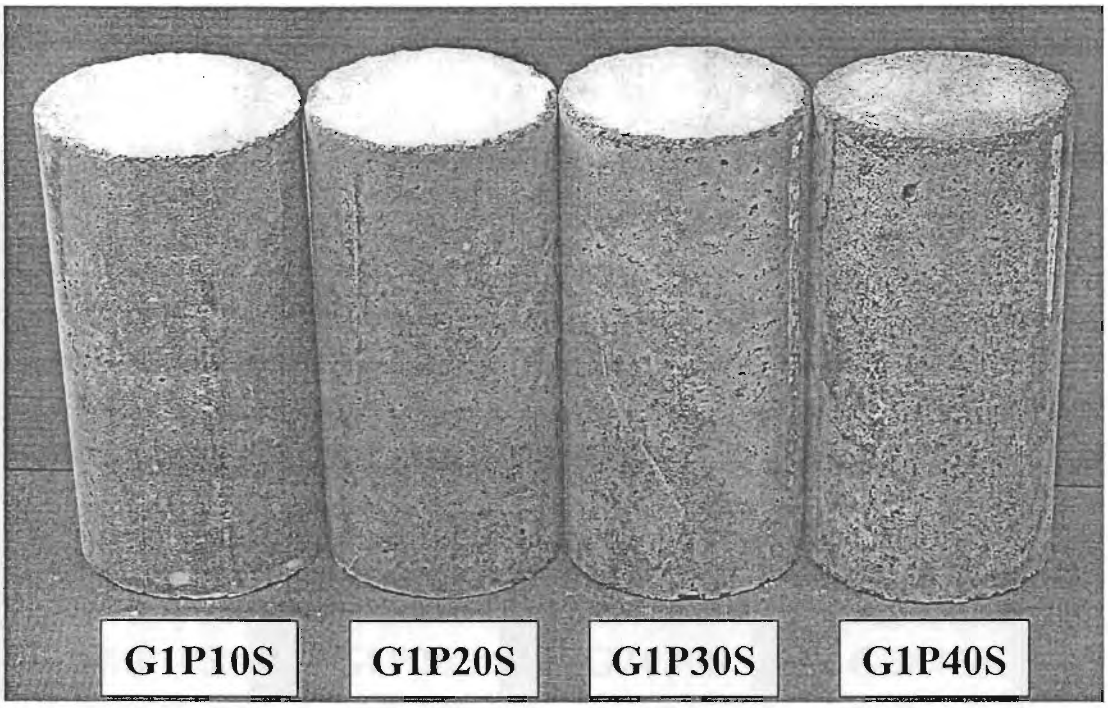
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



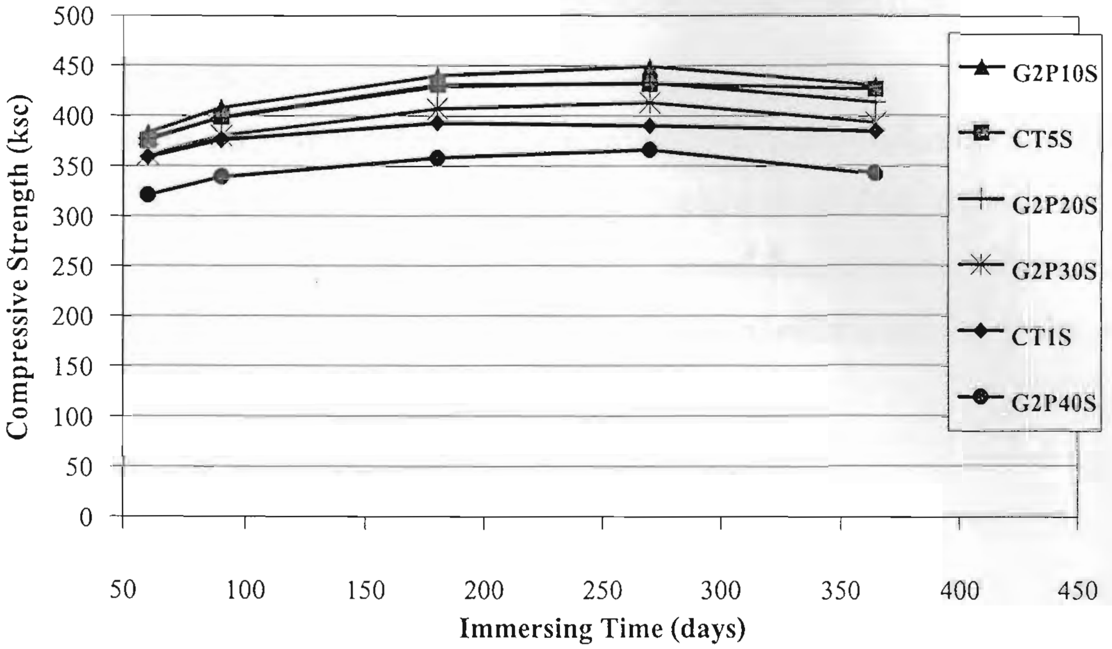
รูปที่ 4.20 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน



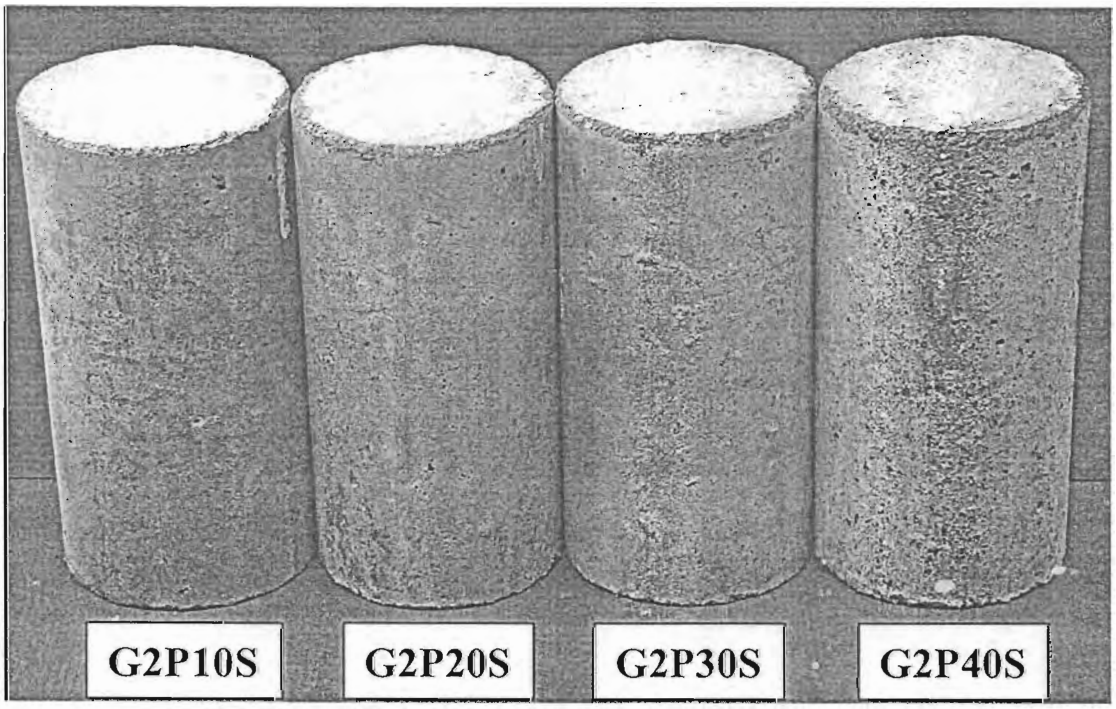
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.22 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P



รูปที่ 4.24 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน

4.7 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปากับที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในรูปของค่าผลต่างกำลังอัด (Difference of Compressive Strength) ของคอนกรีตตามสมการที่ (4.1) และค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลัง (Sulfate Deterioration Factor : SDF) ซึ่งเป็นค่าร้อยละของผลต่างกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันเมื่อบ่มในน้ำประปากับที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตตามสมการที่ (4.2)

ค่าผลต่างกำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม^2)

$$\text{Difference of Compressive Strength} = W - S \tag{4.1}$$

ค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลังเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (%)

$$\text{Sulfate Deterioration Factor : SDF} = \frac{W - S}{W} \times 100 \tag{4.2}$$

เมื่อ W = กำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา

S = กำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตารางที่ 4.6 ค่าผลต่างกำลังอัดและค่าแฟกเตอร์เสื่อมกำลังเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Mixes	W/B	Slump (cm)	Difference of Comp. Str. (ksc)-*(Sulfate Deterioration Factor (%))*				
			60 days	90 days	180 days	270 days	360 days
CT1S	0.70	6.5	3 *(0.8)*	-5 *(-1.3)*	-8 *(-2.1)*	2 *(0.5)*	12 *(3.0)*
CT5S	0.70	6.5	-2 *(-0.5)*	-5 *(-1.3)*	-16 *(-3.9)*	-9 *(-2.1)*	2 *(0.5)*
OP10S	0.72	6.5	3 *(1.1)*	-8 *(-2.9)*	-17 *(-5.4)*	-22 *(-7.1)*	-20 *(-6.3)*
OP20S	0.77	6.0	3 *(1.2)*	-10 *(-4.1)*	-20 *(-7.5)*	-19 *(-7.0)*	-17 *(-6.3)*
OP30S	0.87	8.0	-3 *(-1.7)*	-2 *(-1.1)*	-13 *(-6.7)*	-16 *(-8.1)*	-10 *(-5.0)*
OP40S	0.95	8.0	-5 *(-4.6)*	-6 *(-5.2)*	-13 *(-11.0)*	-13 *(-10.8)*	-5 *(-4.2)*
G1P10S	0.72	8.0	3 *(0.9)*	-4 *(-1.1)*	-13 *(-3.5)*	-16 *(-4.0)*	-8 *(-2.0)*
G1P20S	0.73	7.5	-1 *(-0.3)*	-7 *(-2.1)*	-23 *(-6.6)*	-21 *(-5.9)*	-7 *(-1.9)*
G1P30S	0.73	7.0	-3 *(-1.1)*	-11 *(-3.7)*	-28 *(-9.3)*	-26 *(-8.5)*	-7 *(-2.3)*
G1P40S	0.74	7.0	-2 *(-0.7)*	-11 *(-4.1)*	-25 *(-9.0)*	-27 *(-9.6)*	-3 *(-1.0)*
G2P10S	0.68	5.5	-9 *(-2.4)*	-18 *(-4.6)*	-40 *(-10.0)*	-38 *(-9.2)*	-12 *(-2.9)*
G2P20S	0.70	6.0	-7 *(-1.9)*	-12 *(-3.1)*	-34 *(-8.6)*	-28 *(-6.9)*	-6 *(-1.5)*
G2P30S	0.71	6.0	-5 *(-1.4)*	-12 *(-3.3)*	-31 *(-8.2)*	-32 *(-8.4)*	-6 *(-1.5)*
G2P40S	0.72	6.0	-4 *(-1.3)*	-17 *(-5.3)*	-28 *(-8.5)*	-29 *(-8.6)*	-2 *(-0.6)*

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำประปาที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

4.7.1 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวของทั้งสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกทำการบ่มในน้ำประปา และกลุ่มที่สองแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าที่อายุ 60 วัน กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักกับคอนกรีตควบคุม CT1W และ CT5W ที่บ่มในน้ำ แต่หลังจากที่อายุ 60 วันไปแล้ว กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S และ CT5S เริ่มมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำ โดยที่อายุ 90 และ 180 วัน คอนกรีตควบคุม CT1S มีค่ากำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 5 และ 8 กก/ซม^2 และเท่ากับ 5 และ 16 กก/ซม^2 สำหรับคอนกรีตควบคุม CT5S และเมื่ออายุการแช่ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 270 วัน คอนกรีตควบคุม CT1S เริ่มมีกำลังอัดต่ำลง ซึ่งต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเล็กน้อย และต่ำลงเรื่อยๆ ตามอายุการแช่ที่เพิ่มขึ้น ที่อายุ 270 และ 360 วัน คอนกรีตควบคุม CT1S มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 2 และ 12 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นการเสื่อมกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 0.5 และ 3.0 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตควบคุม CT5S ที่อายุ 270 วัน ยังมีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำ 9 กก/ซม^2 หลังจากนั้นที่อายุ 360 วัน กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5S มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยและยังคงมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่บ่มในน้ำ เห็นได้ว่าการแช่ในสารสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้คอนกรีตควบคุม CT1S มีกำลังอัดลดลงจนมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำและยังมีร้อยละการเสื่อมกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT5S แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุม CT5S สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลฟตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม CT1S ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ ประกาศ ทองประไพ [45] ส่วนกำลังอัดที่ลดลงของคอนกรีตควบคุม CT5S นั้น เป็นเพราะว่าแม้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีปริมาณ C_3A ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเลยก็ตาม แต่มีปริมาณ C_3S หรือมีอัตราส่วนของ C_3S/C_2S ที่ทำให้เกิด $Ca(OH)_2$ ดังนั้นการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงสามารถเกิดขึ้นได้ [16, 17, 18]

4.7.2 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP

รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยทำการบ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมที่ช่วงอายุ 60 ถึง 270 วัน มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดที่คล้ายกัน คือกำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการพัฒนาสูงขึ้นจนมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำ โดยที่อายุ 270 วัน คอนกรีต OP10S, OP20S, OP30S และ OP40S มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 22, 19, 16 และ 13 กก/ซม^2 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7.1, 7.0, 8.1 และ 10.8 ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อคอนกรีตแช่ใน

สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดลดลงเล็กน้อย นอกจากที่การแทนที่ร้อยละ 10 เท่านั้น ที่กำลังอัดยังมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 20, 17, 10 และ 5 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 6.3, 6.3, 5.0 และ 4.2 สำหรับคอนกรีต OP10S, OP20S, OP30S และ OP40S ตามลำดับ

4.7.3 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P

ส่วนการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อบ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แสดงในรูปที่ 4.27 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันทั้งสองกลุ่มยังคงมีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP คือมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักในช่วงอายุ 60 ถึง 90 วัน โดยกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดที่สูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเพียงเล็กน้อย และที่ช่วงอายุ 180 ถึง 270 วัน กำลังอัดของกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 13, 23, 28, 25 และ 16, 21, 26, 27 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 3.5, 6.6, 9.3, 9.0 และ 4.0, 5.9, 8.5, 9.6 ที่อายุ 180 และ 270 วัน สำหรับคอนกรีต G1P10S, G1P20S, G1P30S และ G1P40S ตามลำดับ หลังจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเริ่มมีค่าลดลง โดยกำลังอัดของคอนกรีต G1P10S, G1P20S, G1P30S และ G1P40S ที่อายุ 360 วัน มีค่าลดลงจากที่อายุ 270 เท่ากับ 8, 14, 19 และ 24 กก/ซม^2 ตามลำดับ และที่ช่วงเวลาเดียวกันนี้เมื่อเทียบกับคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำซึ่งกำลังอัดยังคงมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น ค่าความแตกต่างกำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มจึงมีค่าลดลง โดยที่อายุ 360 วัน คอนกรีต G1P10S, G1P20S, G1P30S และ G1P40S มีกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 8, 7, 7 และ 3 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 2.0, 1.9, 2.3 และ 1.0 ตามลำดับ เห็นได้ว่าแม้แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วันแล้วก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในทุกอัตราการแทนที่ยังคงมีค่าสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำประปา

4.7.4 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

ส่วนการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อบ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ในทุกอัตราส่วนผสมที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำตั้งแต่ที่อายุ 60 วัน โดยมีค่าสูงกว่าเท่ากับ 9, 7, 5 และ 4 กก/ซม^2 สำหรับคอนกรีต G2P10S, G2P20S, G2P30S และ G2P40S

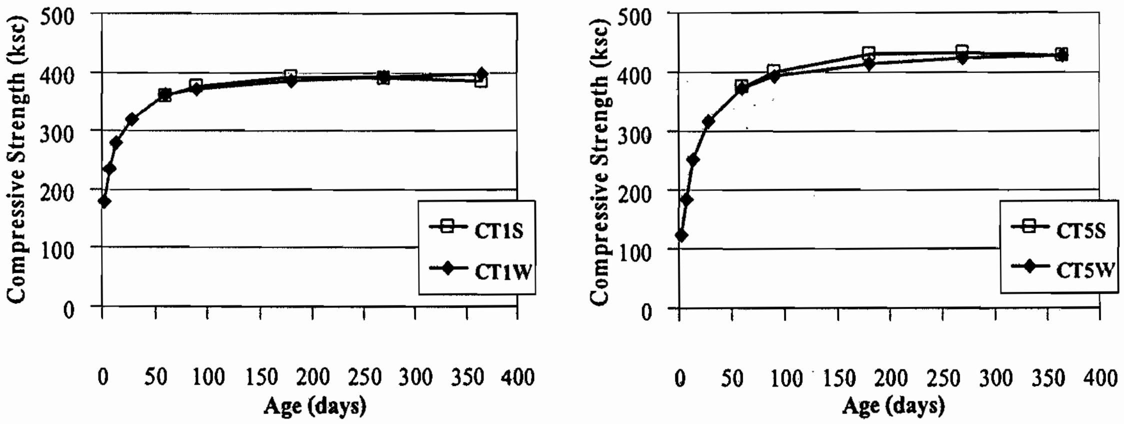
ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงอายุ 90 ถึง 270 วัน คอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำอย่างเห็นได้ชัด โดยคอนกรีต G2P10S, G2P20S, G2P30S และ G2P40S ที่อายุ 90 และ 180 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่แช่ในน้ำเท่ากับ 18, 12, 12, 17 และ 40, 34, 31, 28 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 4.6, 3.1, 3.3, 5.3 และ 10.0, 8.6, 8.2, 8.5 ตามลำดับ และเท่ากับ 38, 28, 32 และ 29 กก/ซม^2 คิดเป็นร้อยละ 9.2, 6.9, 8.4 และ 8.6 ตามลำดับ ที่อายุ 270 วัน ต่อมาที่อายุ 360 วัน กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าลดลงจากที่อายุ 270 วัน ค่อนข้างมากจนมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำ โดยคอนกรีต G2P10S, G2P20S, G2P30S และ G2P40S ยังมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกลุ่มที่บ่มในน้ำเท่ากับ 12, 6, 6 และ 2 กก/ซม^2 หรือเท่ากับร้อยละ 2.9, 1.5, 1.5 และ 0.6 ตามลำดับ

จากผลการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1, CT5 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อบ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 360 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด และทุกการแทนที่เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนานถึง 360 วัน ยังคงมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมเดียวกันที่บ่มในน้ำ โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทั้ง 2 ประเภท แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดี และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดต่อการลดลงของกำลังอัด สังเกตได้ว่าการแทนที่ในอัตราส่วนที่ต่ำมีการลดลงของกำลังอัดน้อยกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูง ซึ่งการลดลงของกำลังอัดจะมากขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราการแทนที่สูงถึงร้อยละ 40 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความพรุนในอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ทำให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงจึงมีการซึมผ่านของน้ำสูง [49] นอกจากนี้การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงปริมาณปูนซีเมนต์จึงลดลงและทำให้เกิด C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นแทน ซึ่ง C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีโครงสร้างที่แข็งแรงน้อยกว่าและมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [50, 51, 52] เพราะฉะนั้นการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณที่สูงจึงเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้นตามไปด้วย

หากพิจารณาถึงขนาดความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อการลดลงของกำลังอัด พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีแนวโน้มการลดลงของกำลังอัดมากกว่าคอนกรีต

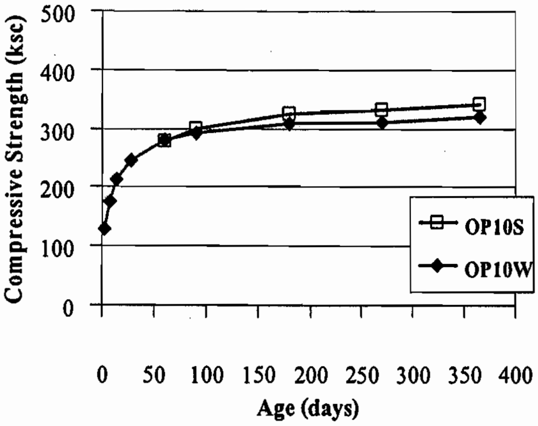
ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำเพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้ C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วและมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ ดังนั้นจึงทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิด M-S-H มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง M-S-H ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารสีขาวนุ่มที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [48, 51, 53] จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่ำทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย และบางส่วนอาจไม่ทำปฏิกิริยาเนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่ ดังนั้นจึงทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้น้อย และเกิด M-S-H น้อยตามไปด้วย กำลังจึงมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

สังเกตว่ากำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการพัฒนาสูงขึ้นมากจนมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่บ่มในน้ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำให้เกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH_2)$) หรือ Brucite และยิปซั่ม (Gypsum) เคลือบที่ผิวของคอนกรีต [47, 48] ซึ่ง Brucite และยิปซั่มนี้จะไปอุดโพรงหรือช่องว่างภายในของคอนกรีตทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแน่นขึ้น [19, 54] นอกจากนี้ยังเกิดการขยายตัวของ Ettringite ภายในช่องว่างของคอนกรีต จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับตารางในภาคผนวก ค ที่พบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีน้ำหนักและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่ออายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตนานมากขึ้น Ettringite เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายในจนส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ส่วน Brucite ทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจลเกิดเป็น M-S-H ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงหลังมีค่าลดลง

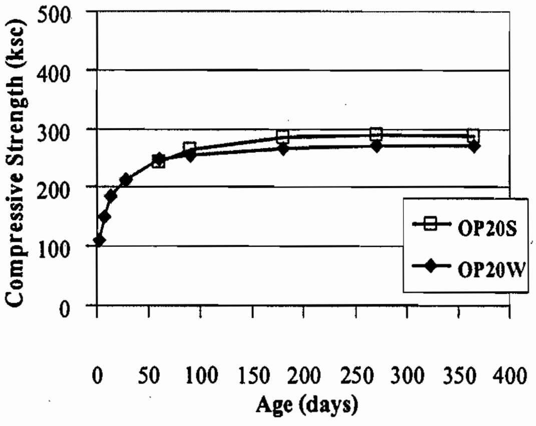


(ก) CT1 (ข) CT5

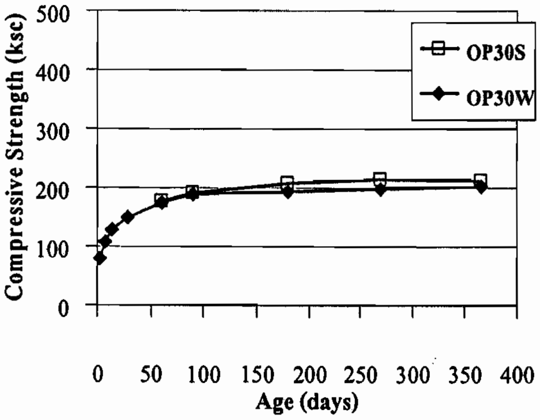
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



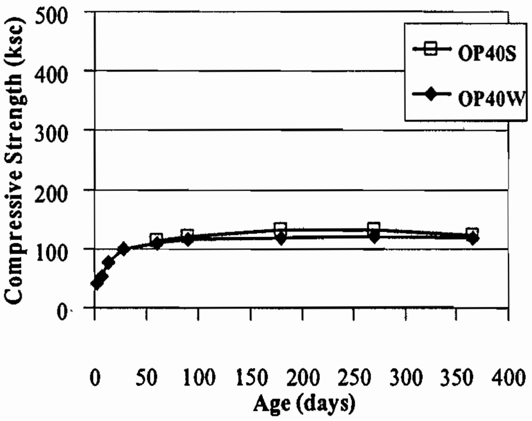
(ก) 10%



(ข) 20%

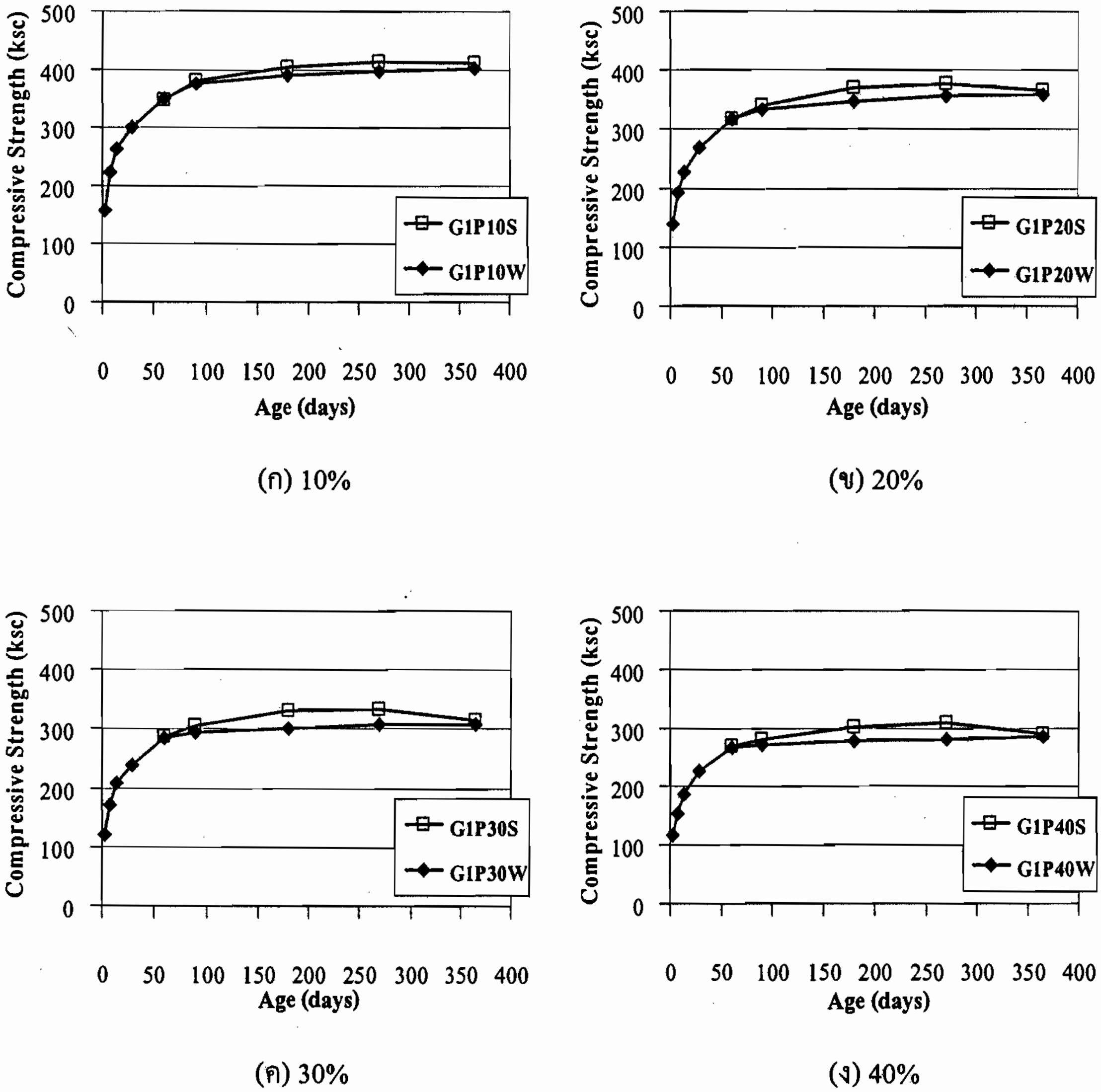


(ค) 30%

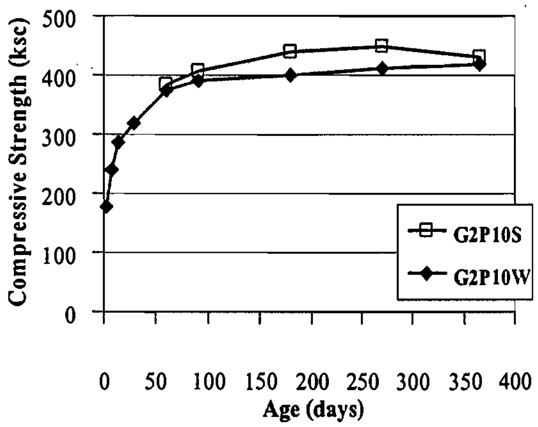


(ง) 40%

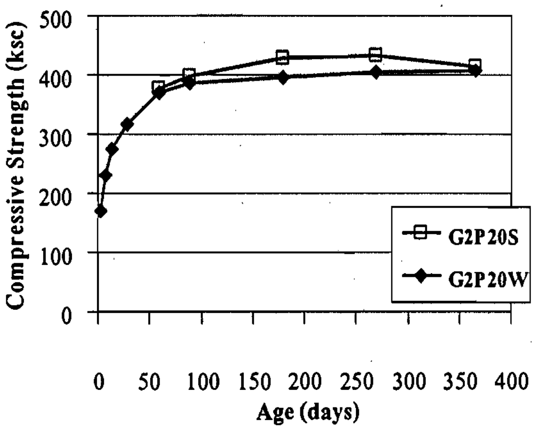
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



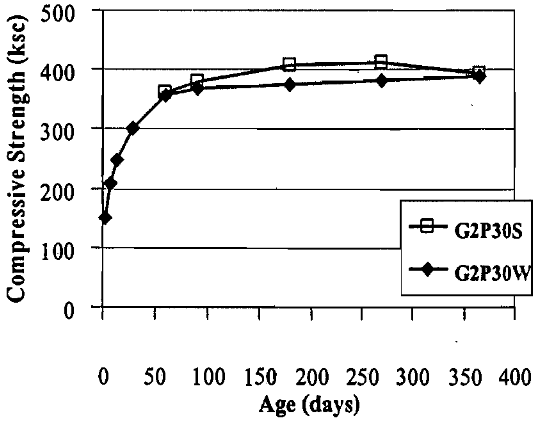
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



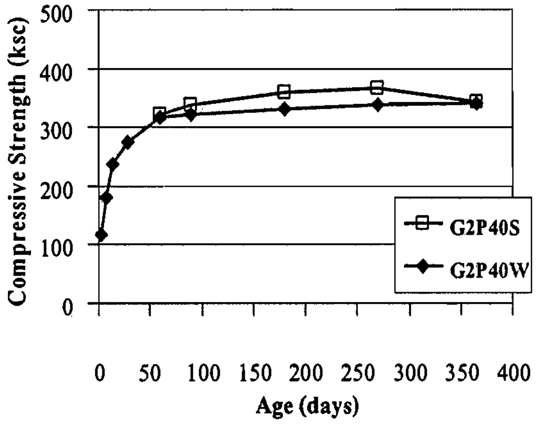
(ก) 10%



(ข) 20%



(ค) 30%



(ง) 40%

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

4.8 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1, CT5 และแท่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการวัดค่าการขยายตัวทุกอายุ 14 วันจนถึงอายุ 364 วัน

4.8.1 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5

รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 พบว่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ในช่วงอายุ 14 ถึง 126 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0272 ส่วนการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 ในช่วงอายุเดียวกันมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0116 จากนั้นแท่งคอนกรีตควบคุมทั้งสองยังคงมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 280 วัน แท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีค่าการขยายตัวเพิ่มเป็นร้อยละ 0.0418 และ 0.0287 ตามลำดับ และเมื่อแท่งคอนกรีตแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน พบว่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0474 และ 0.0382 ตามลำดับ เห็นได้ว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 มีการขยายตัวมากกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 ตลอดอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ C_3A สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จึงทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่าและส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่สูง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] ประกาศ ทองประไพ [45] และพิชญา ธีระมิตร [46]

นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีปริมาณ C_3A เลย แต่มีการขยายตัวเกิดขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่า C_3A ไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการขยายตัวเพียงอย่างเดียว [55, 56] ซึ่งจากการศึกษาของ Gonzalez และ Irassar [57] พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S สูง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวสูงกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S ต่ำ แม้ว่าปูนซีเมนต์ชนิดนั้นจะไม่มีปริมาณ C_3A เลยก็ตาม และเมื่อพิจารณาแท่งคอนกรีตควบคุมทั้ง 2 ประเภท ในรูปที่ 4.30 พบว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีคราบสีขาวของ Brucite และยิบซั่ม เคลือบอยู่ที่ผิว และเนื่องจากร้อยละการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีค่าไม่สูงมากนักแท่งคอนกรีตจึงยังไม่เกิดความเสียหายที่เด่นชัด มีเพียงบริเวณขอบและมุมของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 เท่านั้นที่เกิดการหลุดร่อนเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 364 วัน

Mixes	Expansion (10^{-4} %)												
	14 days	28 days	42 days	56 days	70 days	84 days	98 days	112 days	126 days	140 days	154 days	168 days	182 days
CT1	25	53	66	151	156	192	242	247	272	303	308	313	318
CT5	7	9	10	25	40	60	80	96	116	126	136	141	141
OP10	20	45	71	101	126	161	171	202	217	222	242	267	302
OP20	10	20	55	86	116	121	146	177	197	207	232	257	272
OP30	15	30	45	61	91	101	126	141	162	187	207	217	242
OP40	45	101	126	151	192	207	242	262	297	312	333	348	378
G1P10	15	35	60	86	111	136	156	161	187	212	237	252	287
G1P20	10	30	50	76	101	121	146	167	187	197	217	242	247
G1P30	10	30	45	66	81	96	121	146	157	182	197	207	227
G1P40	20	35	51	76	101	111	136	142	162	167	187	192	217
G2P10	10	25	45	66	81	106	126	141	171	192	202	227	257
G2P20	10	15	35	66	81	111	126	141	162	172	187	207	212
G2P30	10	20	35	50	71	91	96	121	136	156	172	177	202
G2P40	15	30	40	55	71	91	111	121	136	151	167	172	187

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 364 วัน (ต่อ)

Mixes	Expansion (10^{-4} %)												
	196 days	210 days	224 days	238 days	252 days	266 days	280 days	294 days	308 days	322 days	336 days	350 days	364 days
CT1	343	343	358	383	403	408	418	444	459	459	464	464	474
CT5	191	211	216	251	267	277	287	337	337	357	382	382	382
OP10	323	353	378	383	403	428	449	454	479	489	504	534	549
OP20	298	313	333	363	378	383	404	424	449	459	484	500	515
OP30	263	298	323	338	348	364	394	409	419	419	429	449	460
OP40	408	433	438	469	494	514	524	554	580	595	625	640	645
G1P10	323	348	353	373	383	408	423	444	449	474	499	509	529
G1P20	278	298	323	348	358	363	389	414	439	444	454	474	485
G1P30	258	288	313	333	348	359	379	394	404	404	429	444	454
G1P40	258	263	273	298	318	329	339	354	369	394	409	414	425
G2P10	282	287	313	323	348	368	373	393	403	429	444	449	464
G2P20	243	258	278	293	323	334	349	364	374	394	404	424	429
G2P30	227	247	262	262	288	303	318	343	358	363	373	389	399
G2P40	217	237	242	267	278	298	303	313	328	333	348	358	363

4.8.2 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าแท่งคอนกรีตมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราคงที่สังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในทุกอัตราส่วนผสม มีค่าการขยายตัวสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 ตลอดอายุการทดสอบ ซึ่งในช่วงแรกการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 มีค่าการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 แต่หลังจากนั้นการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 364 วัน ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 ยังคงมีค่าการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ตลอดอายุการทดสอบ และที่การแทนที่ร้อยละ 40 เป็นอัตราส่วนผสมที่มีการขยายตัวสูงสุด โดยมีค่าการขยายตัวสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ในทุกอายุการทดสอบ ซึ่งที่อายุ 364 วัน แท่งคอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0549, 0.0515, 0.0460 และ 0.0645 ตามลำดับ

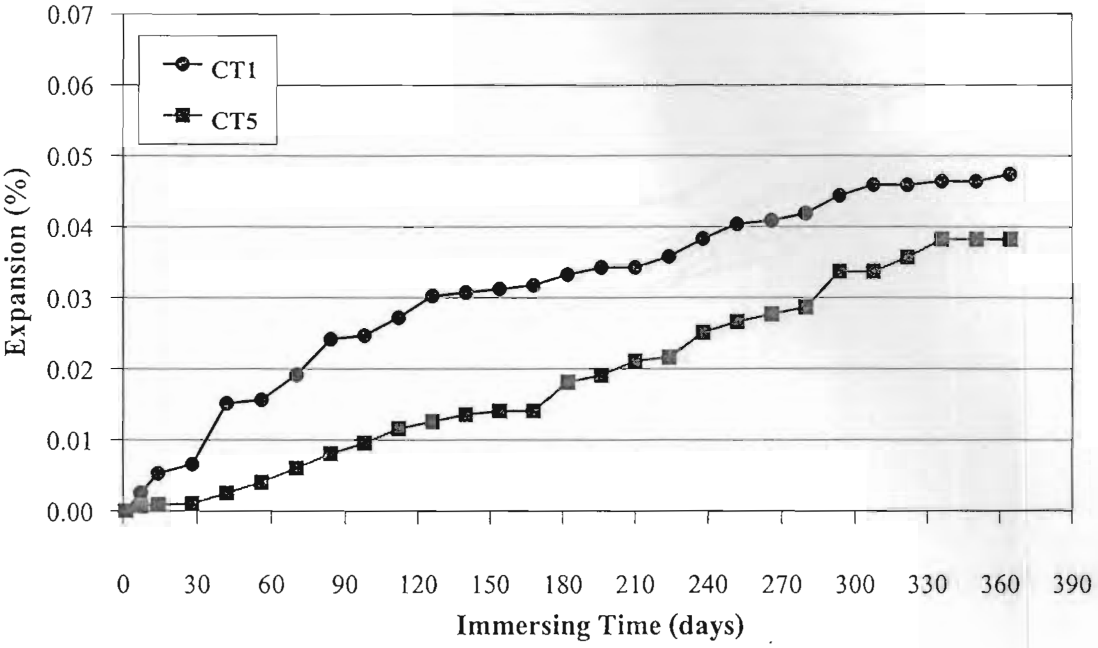
เห็นได้ว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าการขยายตัวต่ำสุดและมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนที่สูงดังกล่าวสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้มาก ทำให้มีปริมาณ C_3A น้อยลง จึงลดการทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำให้ Ettringite ที่เป็นสาเหตุของการขยายตัว [58, 59] เกิดขึ้นน้อยลง ดังนั้นการขยายตัวจึงลดลง แต่การแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงถึงร้อยละ 40 แม้ว่าสามารถลดปริมาณ C_3A ลงได้ แต่ทำให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นอย่างมาก แท่งคอนกรีตจึงมีความพรุนสูงส่งผลให้เกิดการซึมผ่านของน้ำสูง สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของวีรชาติ ตั้งจิรภัทร [28] ที่พบว่าแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ร้อยละ 30 มีการขยายตัวต่ำสุด เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 40 การขยายตัวกลับมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน ในรูปที่ 4.32 พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมยังไม่เกิดความเสียหาย มีเพียงคราบสีขาวเกาะอยู่ที่ผิวไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.35 ตามลำดับ พบว่าในช่วง 240 วันแรกแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่ำกว่าแท่ง

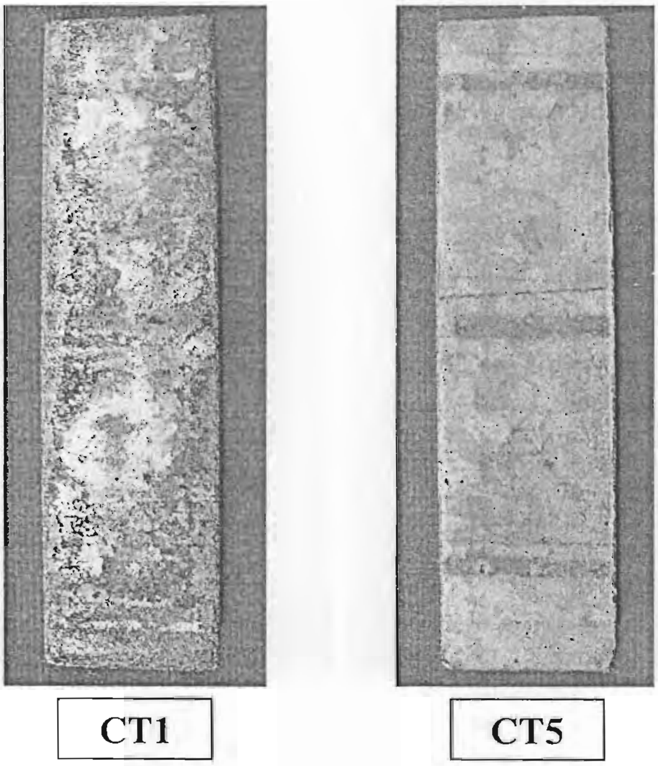
คอนกรีตควบคุม CT1 แต่สูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 และเมื่อแท่งคอนกรีตแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มีการขยายตัวมากขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 การขยายตัวยังคงมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 โดยแท่งคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 ที่อายุ 364 วัน มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0529, 0.0485, 0.0454 และ 0.0425 ตามลำดับ

ส่วนการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 โดยแท่งคอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 ที่อายุ 364 วัน มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0464, 0.0429, 0.0399 และ 0.0363 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P เมื่อแช่ในสาระลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน ในรูปที่ 4.34 และ 4.36 ตามลำดับ สังเกตว่าแท่งคอนกรีตที่มีการแทนที่สูงมีคราบสีขาวน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่มีการแทนที่ต่ำกว่า ส่วนความเสียหายของแท่งคอนกรีตเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่บริเวณขอบและมุมของแท่งคอนกรีตที่มีการแทนที่สูงเท่านั้น โดยสภาพของแท่งคอนกรีตโดยรวมยังคงอยู่ในสภาพที่ดี เนื่องจากร้อยละการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีค่าเพียงเล็กน้อย

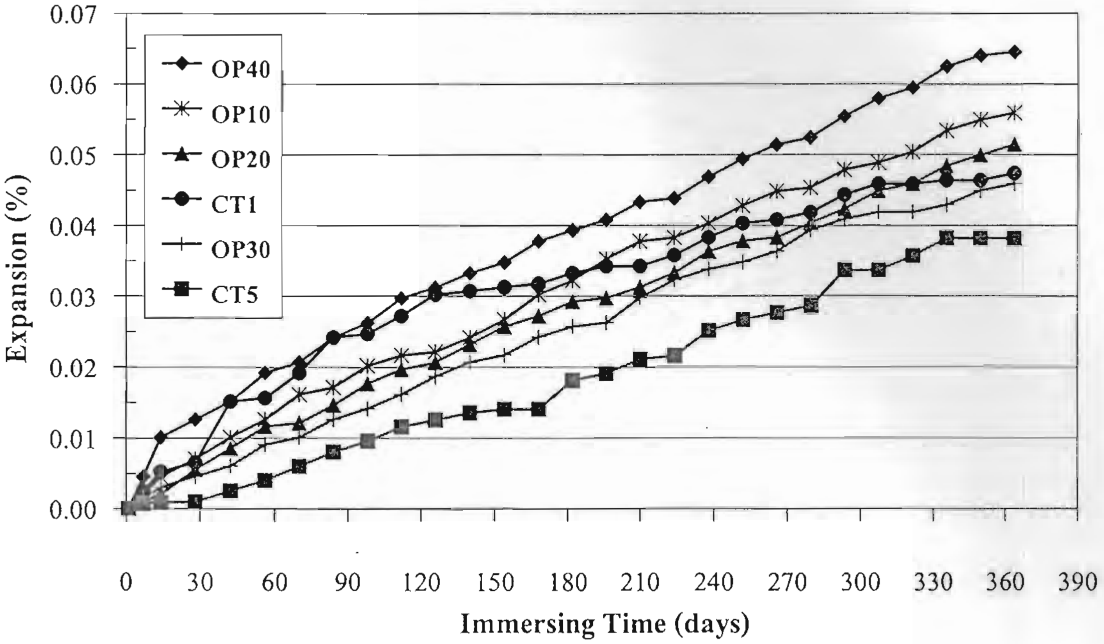
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการขยายตัวของแท่งคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน ในรูปที่ 4.37 พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นพบว่าการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีเพียงการแทนที่ร้อยละ 30 เท่านั้นที่มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT1) ส่วนแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง (G1P) ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) ทุกอัตราส่วนผสม มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวใกล้เคียงและต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT5) ตามลำดับ



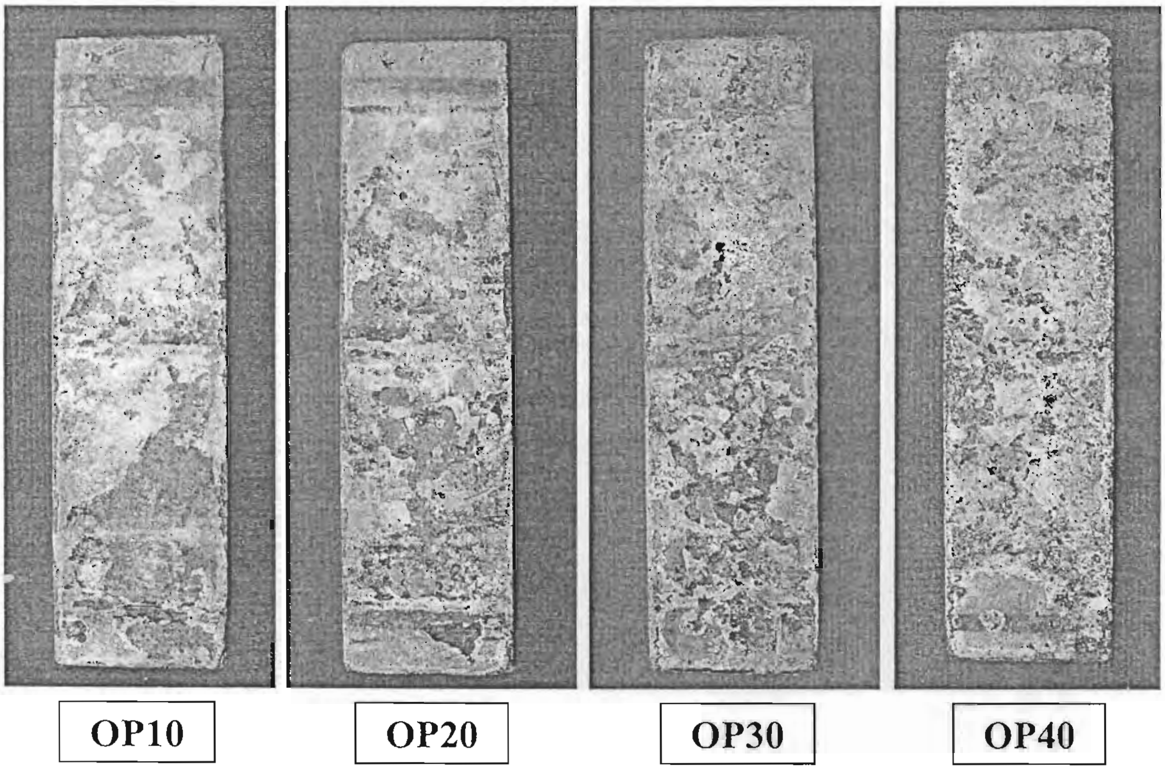
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5



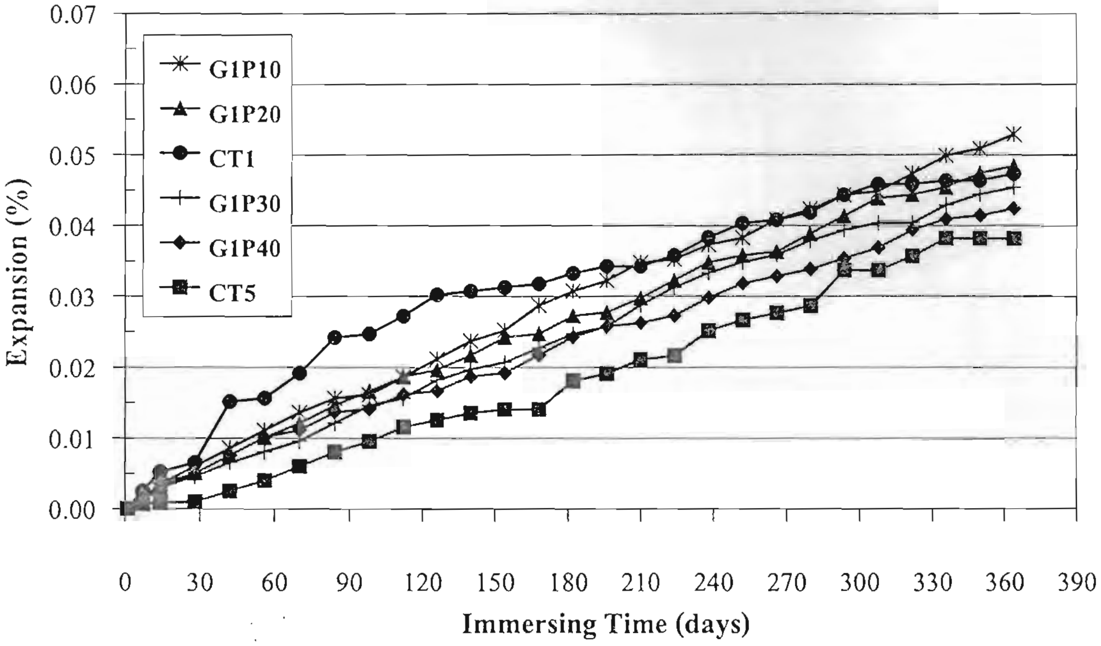
รูปที่ 4.30 แท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน



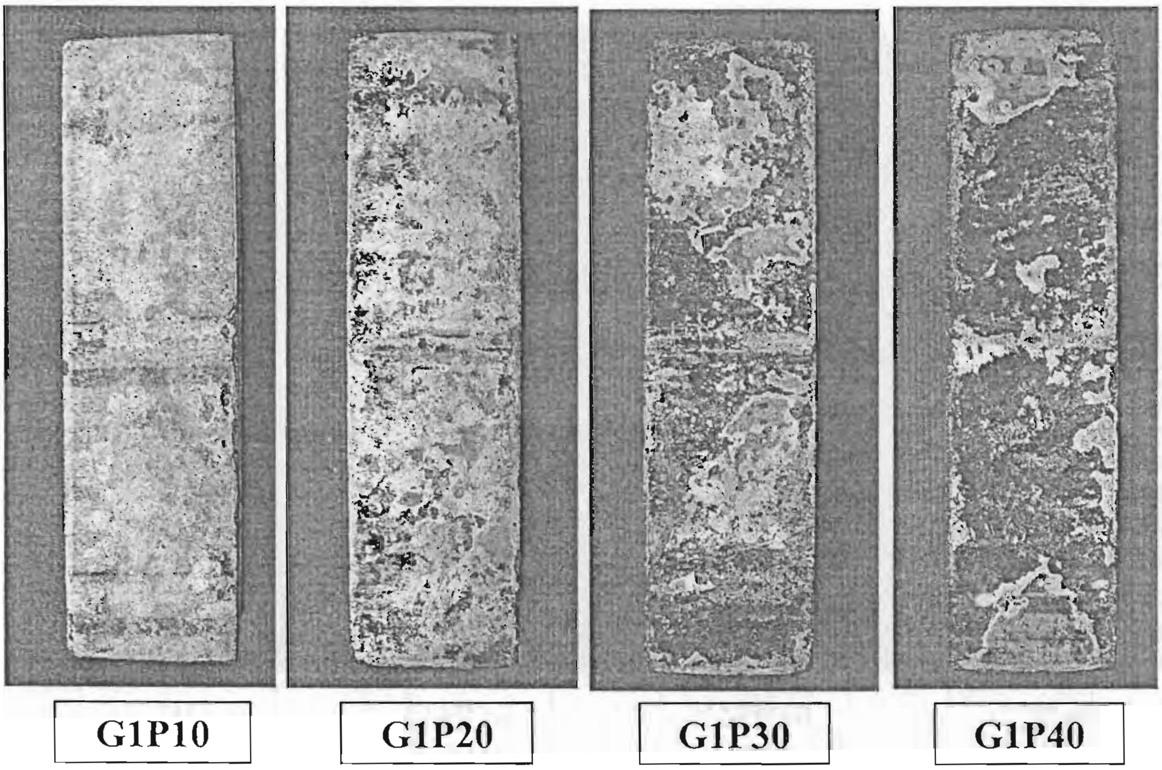
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



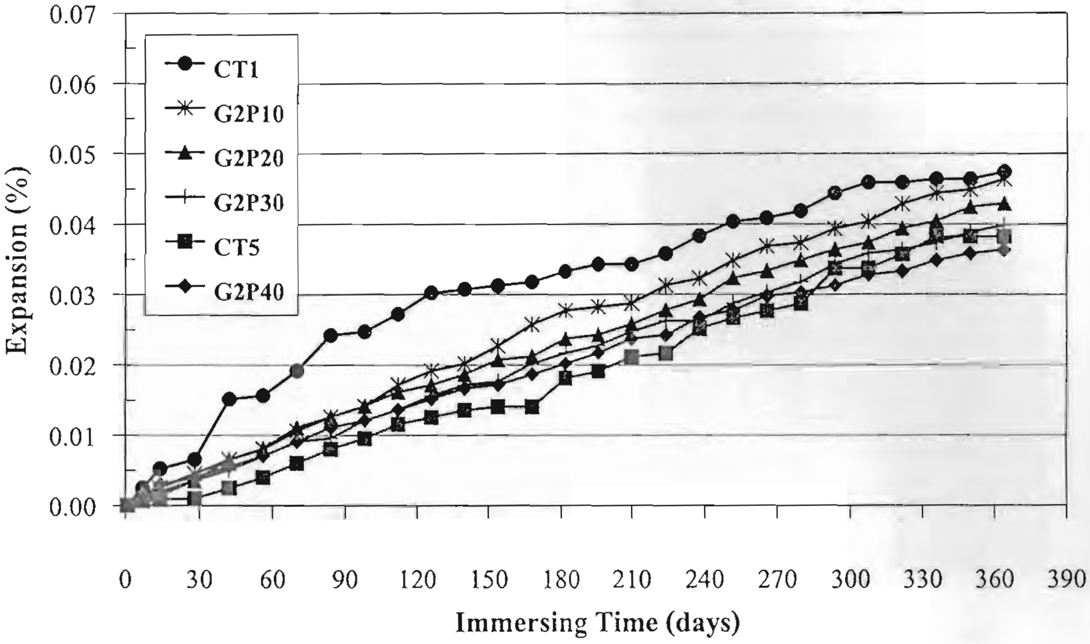
รูปที่ 4.32 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน



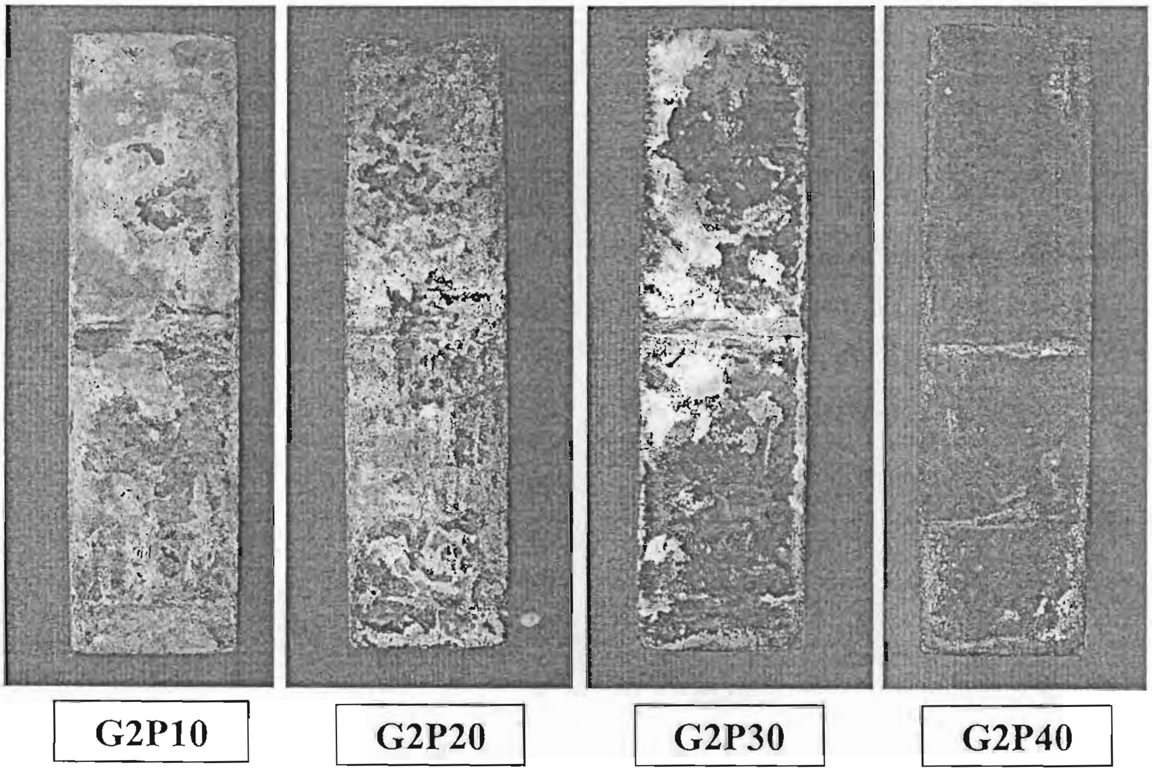
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



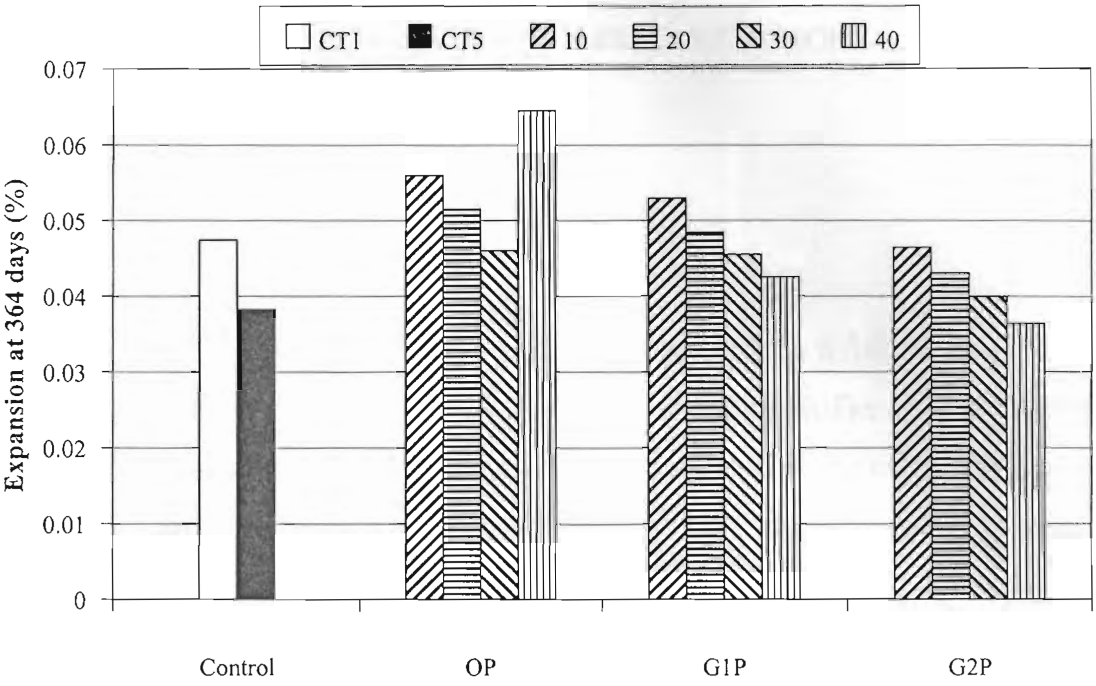
รูปที่ 4.34 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P



รูปที่ 4.36 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่แช่ใน สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบการขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุมกับแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของคอนกรีตนานขึ้น และนานมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่สูงขึ้น ส่วนการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวน้อยกว่าการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 มีเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.1.2 คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุการทดสอบ พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่บ่มในน้ำประปาและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และกำลังอัดมีค่าต่ำลงมากเมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งไม่สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

5.1.3 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง (G1P) และขนาดละเอียดมาก (G2P) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน เมื่อบ่มในน้ำประปา มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 270 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดของคอนกรีตเริ่มมีค่าลดลง ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันทุกความละเอียดในปริมาณสูง (ร้อยละ 40) มีการลดลงของกำลังอัดค่อนข้างมาก โดยการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีแนวโน้มทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ยังคงมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 360 วัน

5.1.4 เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นพบว่าการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง (G1P) ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน

ส่วนแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) ทุกอัตราส่วนผสม (แทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40) ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวใกล้เคียงและต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตามลำดับ

5.1.5 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราไม่เกินร้อยละ 20 ถือว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่บ่มในน้ำประปา โดยมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันจากแต่ละแหล่งมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเถ้าปาล์มน้ำมันจากหลายๆ แหล่ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพและแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้ต่อไป

5.2.2 จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการวิจัยนี้มี MgO และ K_2O ในปริมาณที่สูง ซึ่ง MgO และ K_2O เป็นองค์ประกอบที่ส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต แต่จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตยังไม่เกิดการสึกกร่อนและการขยายตัวที่ชัดเจนมากนักแม้แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 1 ปีแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาวเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.3 ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ก่อนทำการทดสอบ เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออก ดังนั้นในอนาคตควรศึกษาคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนที่ค้างบนตะแกรงหรือเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยไม่ต้องนำมาร่อนผ่านตะแกรง เพื่อลดขั้นตอนในกระบวนการผลิตและเป็นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5.2.4 เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีความพรุนสูง แม้ว่าทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นแล้วก็ตาม ทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีความหนาแน่นลดลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเรื่องการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วย

5.2.5 จากผลการวิจัยในครั้งนี้เห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากสามารถพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าในการศึกษาครั้งนี้เพื่อใช้ผสมในคอนกรีตได้ในปริมาณที่สูงขึ้น จะเป็นการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

5.2.6 จากการสังเกตพบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นมีน้ำมันเคลือบอยู่ที่ผิว ซึ่งอาจเป็นน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันและอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต จึงควรมีการศึกษาน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน, **ดีเซลจากพืช ทางเลือกใหม่ของพลังงาน** [Online], Available : http://www.doeb.go.th/dbd/knowledge/bio-diesel2.htm [2004, June 30].

2. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, **ผลพยากรณ์ปาล์มน้ำมัน ปี 2547** [Online], Available : http://www.oae.go.th/mis/predict/forecast/Oil%20palm47.htm [2004, July 27].

3. กรุงเทพธุรกิจ เศรษฐกิจ, **"สมศักดิ์" ดันยุทธศาสตร์ปาล์ม เพิ่มพื้นที่ปลูก ผลิต"ไบโอดีเซล"** [Online], Available : http://www.bangkokbiznews.com/2004/06/17/eco/index.php?news=column_13318319.html [2004, June 30].

4. จักพล กลั่นมั่นคง, คนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, 2543, **การศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 59 หน้า.

5. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 310-313.

6. Lea, F.M., 1970, **The Chemistry of Cement and Concrete**, Edward Arnold Publishers, pp. 361, 414-423.

7. Davis, R.E., 1950, "Use of Pozzolans in Concrete", **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 46, pp. 377-384.

8. 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**, Vol. 19, pp. 235-246.

9. Hansen, T.C., 1990, "Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 193-196.

10. Thornton, H.T., 1987, "Acid Attack of Concrete Caused by Sulfur Bacteria Action", **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 75, No. 11, pp. 577-584.

11. สิริลักษณ์ จันทรางศุ, 2529, "คอนกรีตในน้ำทะเล", เอกสารประกอบการบรรยาย ณ ห้องประชุมราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2529, **วิศวกรรมสาร**, เล่มที่ 5, หน้า 37-47.

12. สมประสงค์ บุญยนิตย์, 2530, "การใช้ซัลเฟตต่อต้านซัลเฟตใต้ธรณีและใต้น้ำ", **วิศวกรรมสาร**, เล่มที่ 3, หน้า 75-80.

13. Mather, B., 1966, "Effect of Seawater on Concrete", **Highway Research Record**, No. 113, pp. 33-42.

14. Concrete and Concrete Materials, 1975, **Concrete Manual**, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 8th Edn, United States Government Printing Office Washington.

15. Shashiprakash, S.G. and Thomas, M.D.A., 2001, "Sulfate Resistance of Mortars Containing High-Calcium Fly Ashes and Combination of Highly Reactive Pozzolans and Fly Ash", **Proceedings of Seventh International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete**, Chennai, India, pp. 221-237.

16. Al-Duraijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameem, M. and Ibrahim, M., 2003, "Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 25, pp. 429-437.

17. Rasheeduzzafar, 1992, "Influence of Cement Composition on Concrete Durability", **ACI Materials Journal**, Vol. 89, pp. 574-586.

18. Irassar, E.F., Gonzalez, M.A. and Rahhal, V., 2000, "Sulphate Resistance of Type V Cement with Limestone Filler and Natural Pozzolana", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 22, pp. 361-368.

19. Hewlett, P.C. (Ed.), 1998, **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th ed., Arnold/Wiley, New York, p. 282, 317, 584.

20. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชาชูปถัมภ์, 2545, "มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง", **มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38**, พิมพ์ครั้งที่ 4, หน้า 15.

21. Tay, J.H., 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material", **Journal of Material in Civil Engineering, ASCE**, Vol. 2, pp. 94-105.

22. Tay, J.H. and Show, K.Y., 1995, "Use of Ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material", **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 13, pp. 27-36.

23. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Palm Oil Fuel Ash-A Potential Pozzolanic Material in Concrete Construction", **Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century**, 20-23 November 1996, Bangkok, Thailand, pp. D361-D366.

24. Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Influence of Palm Oil Fuel Ash on Strength and Durability of Concrete", **Proceedings of the 7th International Conference on the Durability of Building Materials and Components**, 19-23 May, Stockholm, Sweden, Vol. 1, pp. 291-298.

25. Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W., 1999, "Concrete in Marine Environment: Influence of Palm Oil Fuel Ash on Strength and Durability", **Proceedings of the Sixth Cycle; Civil and Environment Engineering Conference New Frontiers and Challenges**, Vol. 3 (Part I), 8-12 November, Bangkok, Thailand, pp. (III~49)-(III~55).

26. Ishida, T., Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1999, "A Study on Shrinkage of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash", **Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction**, Vol. 2, 27-29 August 1999, Kochi, Japan, pp. 1378-1383.

27. สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, ชรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, "การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต", **การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545**, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.

28. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2546, **การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 75 หน้า.

29. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, "การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง", **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา**, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, พ.ศ. 2546, หน้า 27-32.

30. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532, มอก. 15-2532 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน, หน้า 3-16.

31. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 188 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 179-180.

32. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 204 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 184-191.

33. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 430 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No. 325) Sieve", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 243-245.

34. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 403 : Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 222-227.

35. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 39 : Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 18-22.

36. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 192 : Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 120-127.

37. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 143 : Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 89-91.

38. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 157 : Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete", in **2001 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 257-260.

39. Lea, F.M., 1970, **The Chemistry of Cement and Concrete**, Edward Arnold Publishers, Great Britain, pp. 361-371.

40. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V. and Mora, P.E., 1995, "Mechanical Treatments of Fly Ashes Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, pp. 1469-1479.

41. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, Vol. 15, pp. 48-53.

42. American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 150 : Standard Specification for Portland Cement", in 2001 **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 149-155.

43. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และ สุรพันธ์ สุคันปรีย์, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่** 8, 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า (MAT-163)-(MAT-172).

44. Abrams, D.A., 1918, "Design of Concrete Mixtures", **Structure Materials Research Laboratory**, Bulletin 1, Levis Institute, Chicago, 20 p.

45. ประกาศ ทองประไพ, 2541, **ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดและการขยายตัวของวัสดุซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 103 หน้า.

46. พิชญา ธีระมิตร, 2544, **การศึกษาการขยายตัวและกำลังอัดของเถ้าถ่านหินมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 96 หน้า.

47. Santhanam, S., Cohen, M.D. and Olek, J., 2003, "Mechanism of Sulfate Attack : A Fresh Look Part 2. Proposed Mechanisms", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, pp. 341-346.

48. Bonen, D. and Cohen, M.D., 1991, "Magnesium Sulfate Attack on Portland Cement Paste-I Microstructural Analysis", **Cement and Concrete Research**, Vol. 22, pp. 169-180.

49. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และ สมชาย ชูชีพสกุล, 2537, "การศึกษาผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีต", **การประชุมทางวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจธ. ครั้งที่** 2, 7-8 มิถุนายน 2537, หน้า 78-95.

50. Wee, T.H., Arvind, K., Suryavanshi, K., Wong, S.F. and Rahman, A.K.M.A., 2000, "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures", **ACI Materials Journal**, Vol. 97, pp. 536-549.

51. Cohen, M.D. and Bentur, A., 1988, "Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions", **ACI Materials Journal**, Vol. 85, pp. 148-157.

52. Torii, K. and Kawamura, M., 1994, "Effects of Fly Ash and Silica Fume on The Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack", **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, pp. 361-370.

53. Gollop, R.S. and Taylor, H.F.W., 1992, "Microstructural and Microanalytical Studies of SulFate Attack. I. Ordinary Portland Cement Paste", **Cement and Concrete Research**, Vol. 22, pp. 1027-1038.

54. Moukwa, M., 1990, "The Attack of Cement Paste by $MgSO_4$ and $MgCl_2$ from the Pore Structure Measurements", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, pp. 148-158.

55. Tikalsky, P.J., Roy, D., Scheetz, B. and Krize, T., 2002, "Redefining Cement Characteristics for Sulfate-Resistance Portland Cement", **Cement and Concrete Research,** Vol. 32, pp. 1239-1246.

56. Tian, B. and Cohen, M.D., 2000, "Does Gypsum Formation during Sulfate Attack on Concrete Lead to Expansion", **Cement and Concrete Research**, Vol. 30, pp. 117-123.

57. Gonzalez, M.A. and Irassar, E.F., 1997, "Ettringite Formation in Low C_3A Portland Cement Exposed to Sodium Sulfates Solution", **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, pp. 1061-1072.

58. Cohen, M.D. and Mather, B., 1991, "Sulfate Attack on Concrete Research Needs," **ACI Materials Journal**, Vol. 88, No. 1, pp. 62-69.

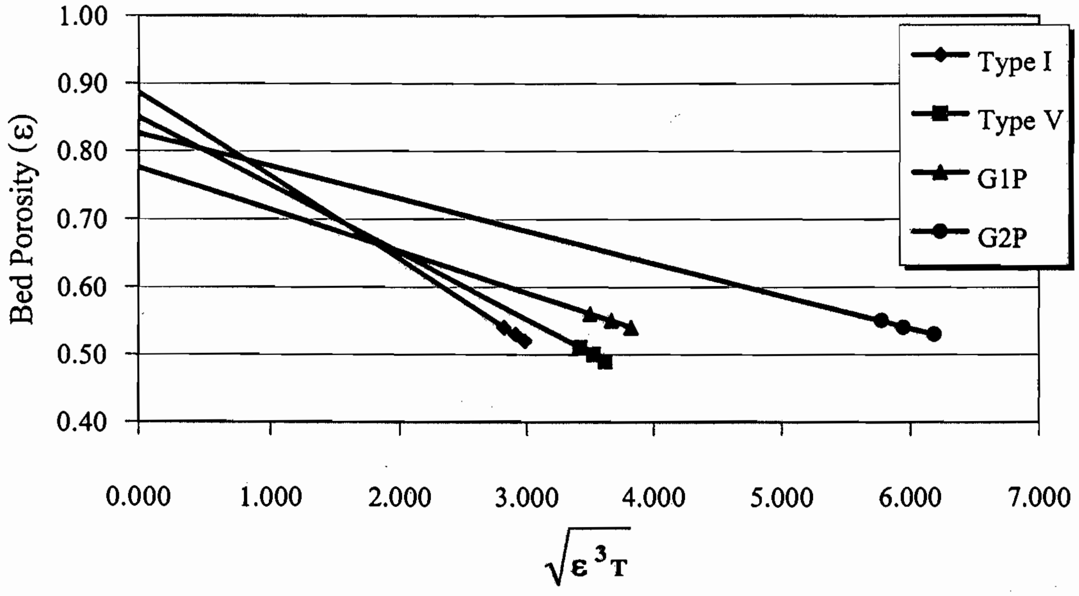
59. Teoreanu, I. and Dumitrescu, C., 1981, "Mechanisms of Controlled Expansion Cements Hardening", **Cement and Concrete Research**, Vol. 12, pp. 141-155.

ภาคผนวก ก

ตารางและรูปแสดงการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Blaine Air Permeability

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Blaine Air Permeability ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample	Specific Gravity	Bed Porosity (ε)	Weight (g)	Time (T) (sec)	$\sqrt{\varepsilon^3 T}$	b	Surface Area (cm^2/g)	Avg. Surface Area (cm^2/g)
Standard	3.15	0.50	2.77	92.77	3.405	0.900	3,774	3,774
Cement Type I	3.14	0.52	2.65	63.29	2.983	0.886	3,626	3,630
		0.53	2.60	56.89	2.910		3,636	
		0.54	2.54	50.52	2.820		3,626	
Cement Type V	3.17	0.49	2.90	111.18	3.617	0.849	4,438	4,440
		0.50	2.85	99.30	3.523		4,447	
		0.51	2.79	87.94	3.415		4,438	
G1P	2.36	0.54	2.00	92.78	3.822	0.775	8,377	8,380
		0.55	1.96	80.81	3.667		8,393	
		0.56	1.92	69.64	3.497		8,377	
G2P	2.43	0.53	2.11	257.04	6.186	0.826	10,472	10,460
		0.54	2.06	224.48	5.945		10,417	
		0.55	2.02	200.23	5.772		10,480	



รูปที่ ก.1 การหาค่าคงที่ b ในการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของ Blaine ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

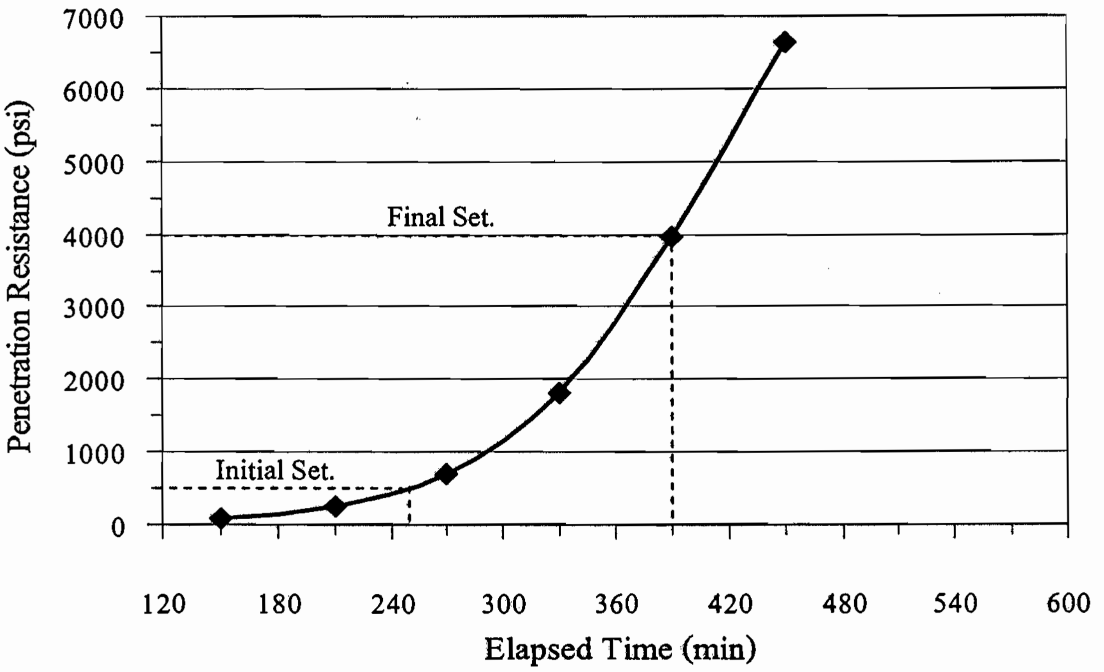
ภาคผนวก ข

ตารางและรูปแสดงการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตควบคุม CT1

Specimen :	CT1		Temp.	=	24	°C
W / B	=	0.70	Slump	=	6.5	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
150	1/2	38	76	1/2	58	116	96
210	1/2	132	264	1/2	124	248	256
270	1/4	170	680	1/10	74	740	710
330	1/20	92	1840	1/20	90	1800	1820
390	1/40	96	3840	1/40	102	4080	3960
450	1/40	156	6240	1/40	176	7040	6640
510							
570							
630							
Initial Set.	250		min	Final Set.	390		min

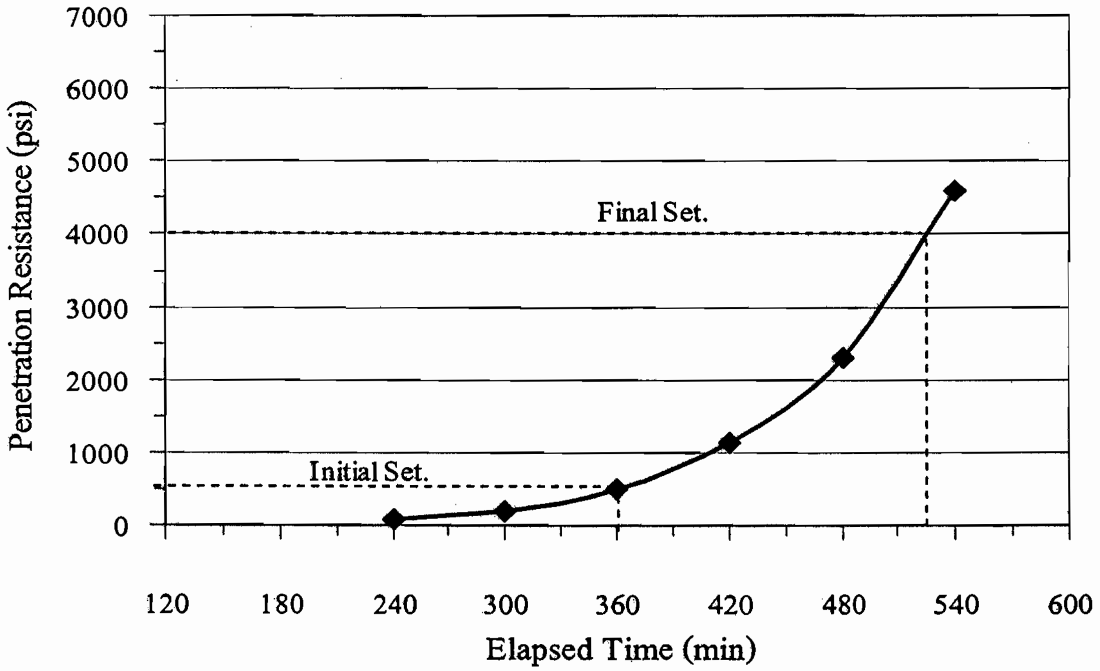


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีตควบคุม CT1

ตารางที่ ข.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตควบคุม CT5

Specimen :	CT5	Temp. =	24 °C
W / B =	0.70	Slump =	6.5 cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
240	1	78	78	1	82	82	80
300	1/2	92	184	1/2	102	204	194
360	1/4	112	448	1/4	136	544	496
420	1/10	116	1160	1/10	110	1100	1130
480	1/20	110	2200	1/20	120	2400	2300
540	1/40	128	5120	1/40	102	4080	4600
600							
660							
730							
Initial Set.	360 min			Final Set.	525 min		

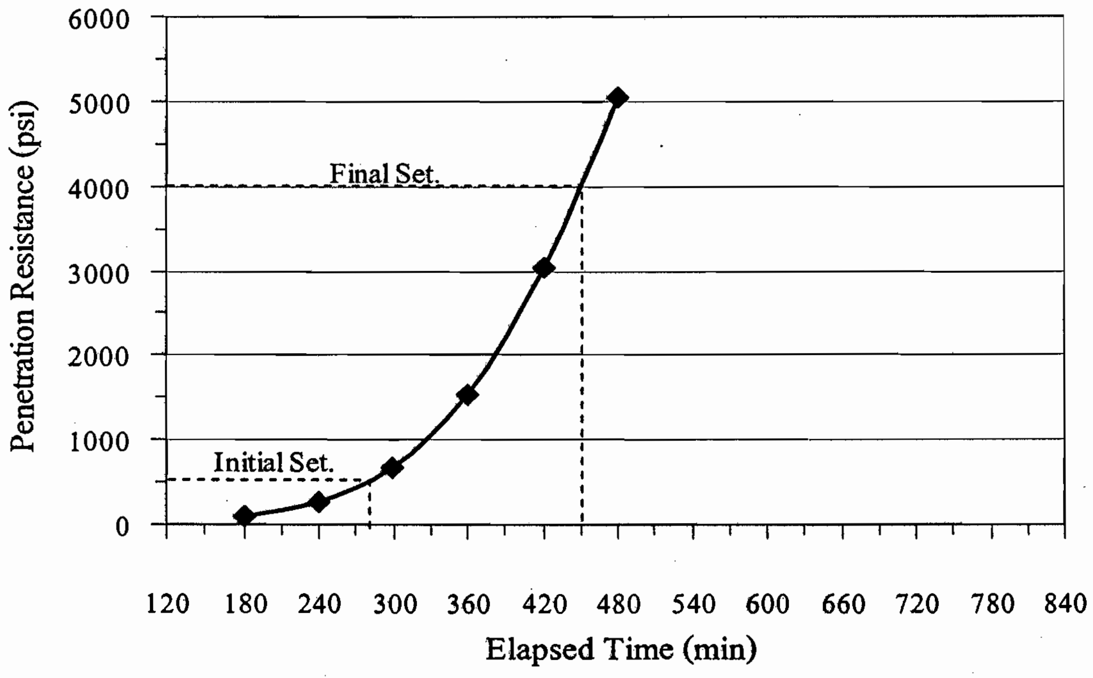


รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีตควบคุม CT5

ตารางที่ ข.3 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP10

Specimen : OP10		Temp. = 24	°C
W / B = 0.72		Slump = 6.5	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	82	82	1	100	100	91
240	1/2	126	252	1/2	142	284	268
300	1/4	160	640	1/4	174	696	668
360	1/10	140	1400	1/10	165	1650	1525
420	1/20	154	3080	1/20	150	3000	3040
480	1/40	128	5120	1/40	124	4960	5040
540							
600							
660							
Initial Set.	280	min		Final Set.	450	min	

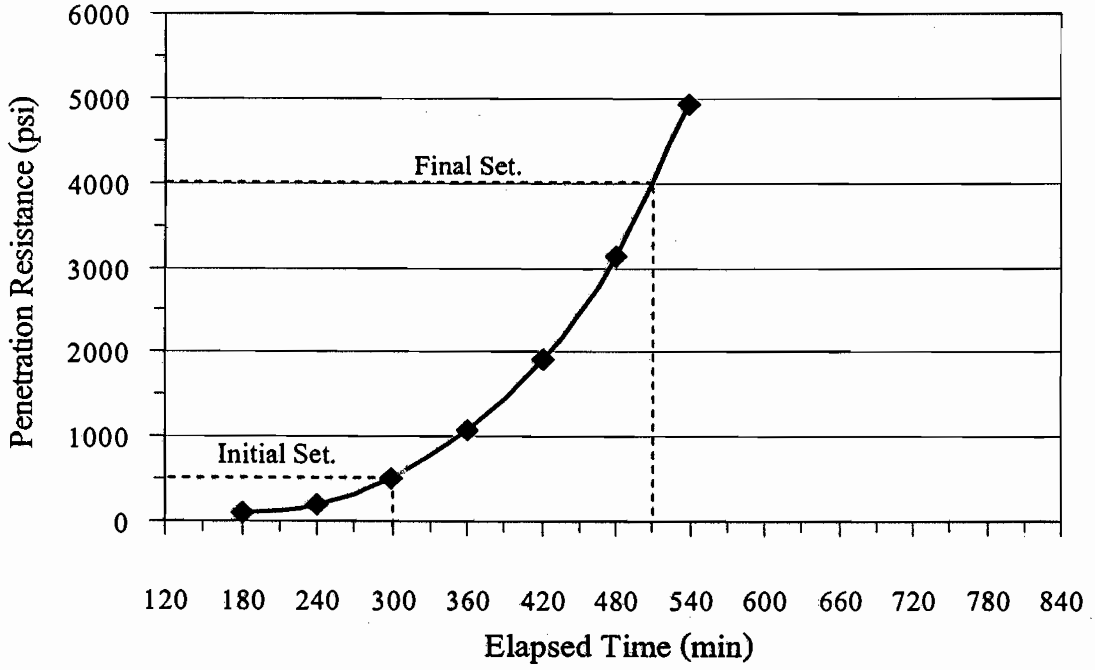


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP10

ตารางที่ ข.4 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP20

Specimen :	OP20	Temp.	=	24 °C
W / B	= 0.77	Slump	=	6.0 cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	90	90	1	84	84	87
240	1/2	94	188	1/2	96	192	190
300	1/4	126	504	1/4	122	488	496
360	1/10	110	1100	1/10	104	1040	1070
420	1/20	100	2000	1/20	92	1840	1920
480	1/40	75	3000	1/40	82	3280	3140
540	1/40	126	5040	1/40	120	4800	4920
600							
660							
Initial Set.	300		min	Final Set.	510		min

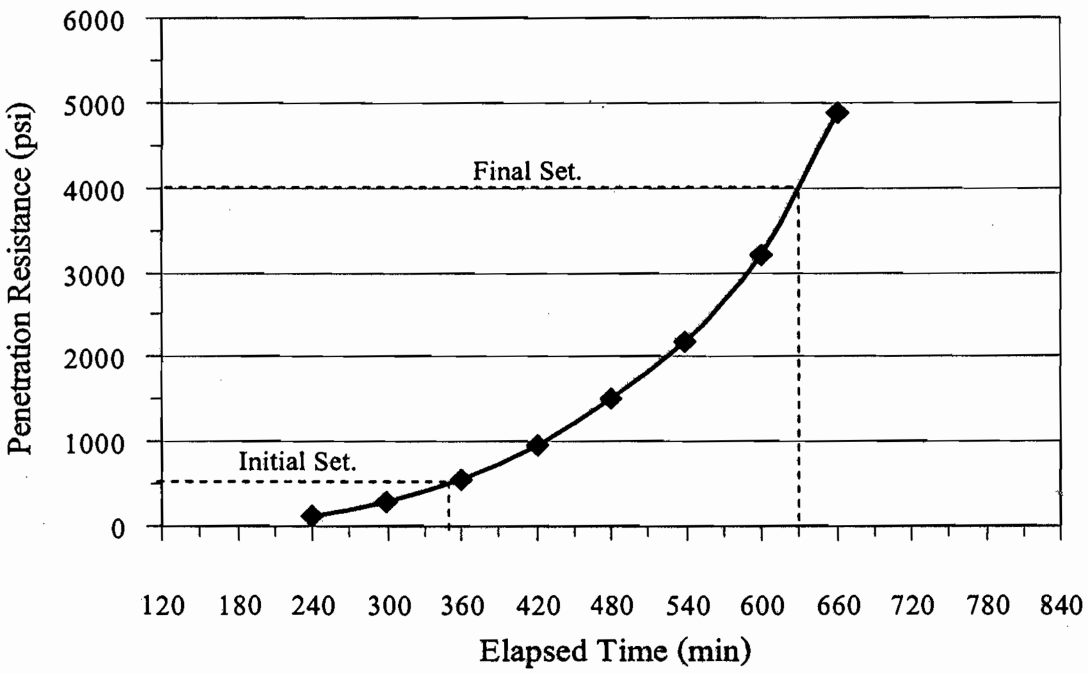


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP20

ตารางที่ ข.5 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP30

Specimen :	OP30	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.87	Slump	=	8.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
240	1	120	120	1	118	118	119
300	1/2	128	256	1/2	152	304	280
360	1/4	140	560	1/4	134	536	548
420	1/10	90	900	1/10	100	1000	950
480	1/20	70	1400	1/20	80	1600	1500
540	1/20	104	2080	1/20	114	2280	2180
600	1/20	146	2920	1/20	174	3480	3200
660	1/40	122	4880	1/40	122	4880	4880
720							
Initial Set.	350		min	Final Set.	630		min

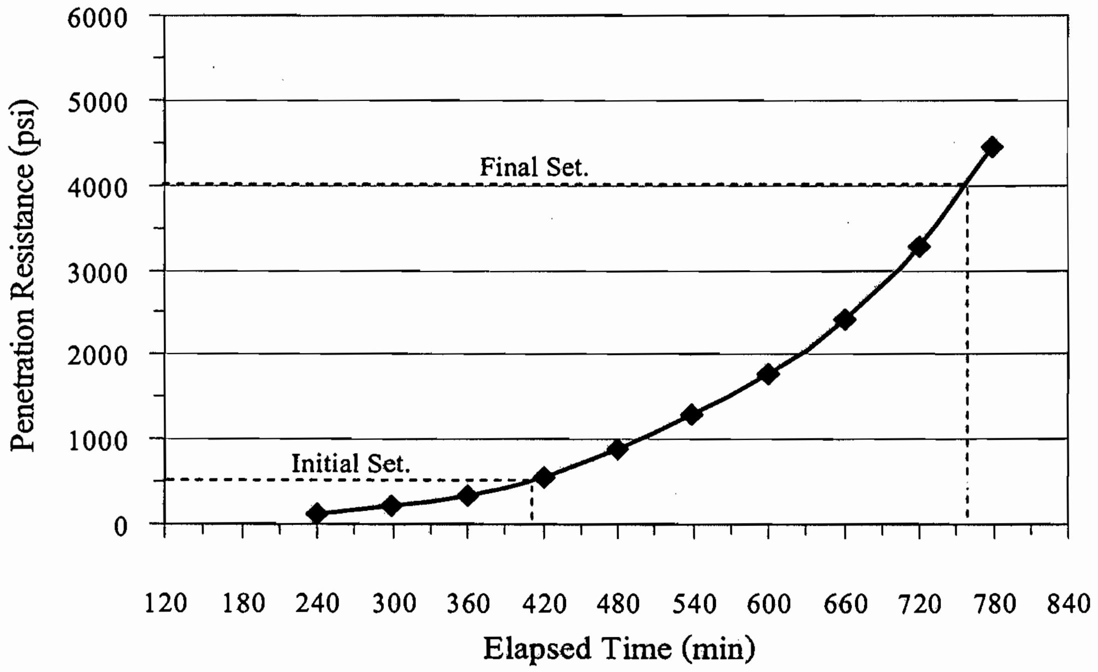


รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP30

ตารางที่ ข.6 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต OP40

Specimen :	OP40	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.95	Slump	=	8.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
240	1	104	104	1	112	112	108
300	1/2	106	212	1/2	116	232	222
360	1/4	82	328	1/4	90	360	344
420	1/10	56	560	1/10	52	520	540
480	1/20	46	920	1/20	42	840	880
540	1/20	62	1240	1/20	67	1340	1290
600	1/20	86	1720	1/20	90	1800	1760
660	1/20	122	2440	1/20	120	2400	2420
720	1/40	84	3360	1/40	80	3200	3280
780	1/40	108	4320	1/40	114	4560	4440
Initial Set.	410		min	Final Set.	760		min

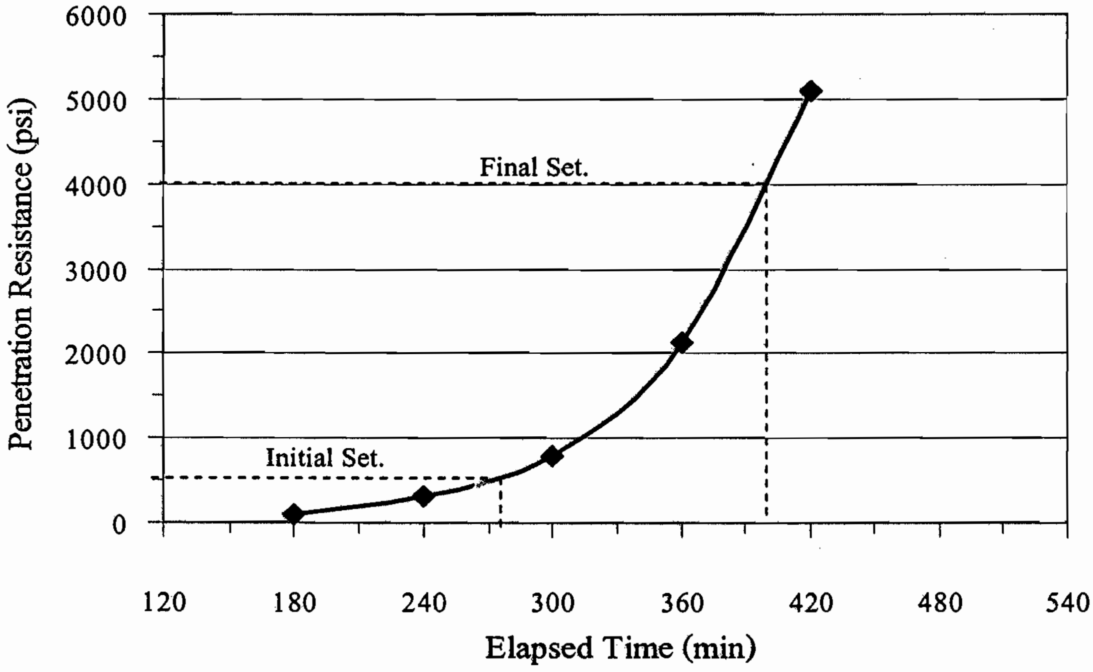


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต OP40

ตารางที่ ข.7 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P10

Specimen :	G1P10	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.72	Slump	=	8.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	80	80	1	96	96	88
240	1/2	154	308	1/2	148	296	302
300	1/4	198	792	1/4	200	800	796
360	1/20	112	2240	1/20	100	2000	2120
420	1/40	135	5400	1/40	120	4800	5100
480							
540							
600							
660							
Initial Set.	275		min	Final Set.	400		min

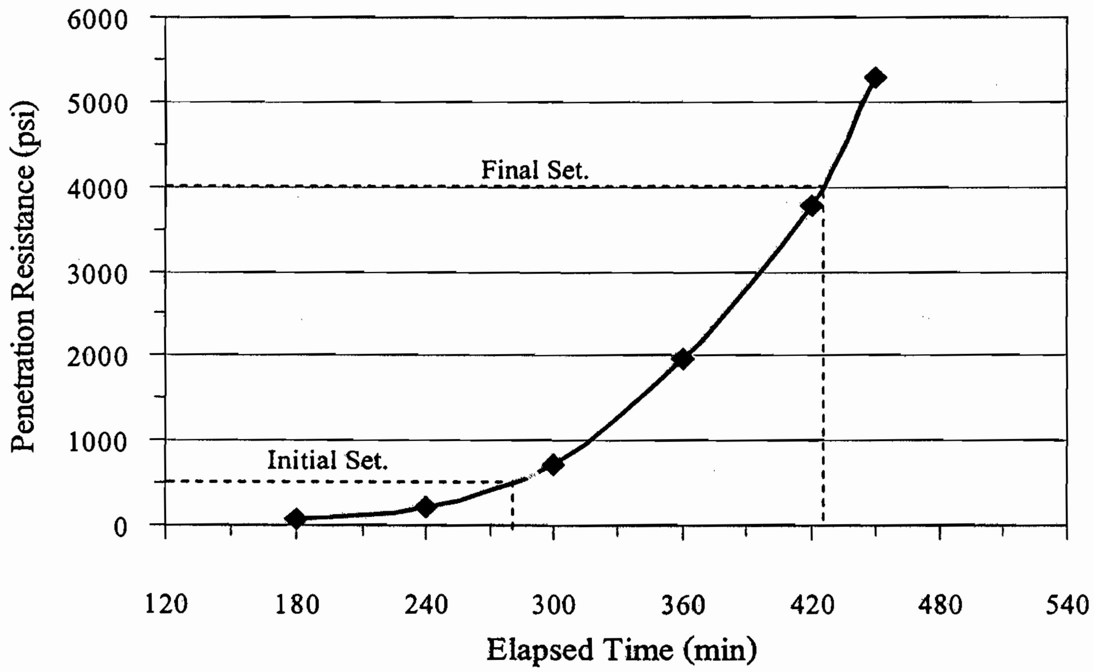


รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P10

ตารางที่ ข.8 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P20

Specimen :	G1P20	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.73	Slump	=	7.5	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	80	80	1	80	80	80
240	1/2	110	220	1/2	110	220	220
300	1/4	182	728	1/4	180	720	724
360	1/10	192	1920	1/10	200	2000	1960
420	1/20	185	3700	1/20	192	3840	3770
450	1/40	122	4880	1/40	142	5680	5280
510							
570							
630							
Initial Set.	280	min		Final Set.	425	min	

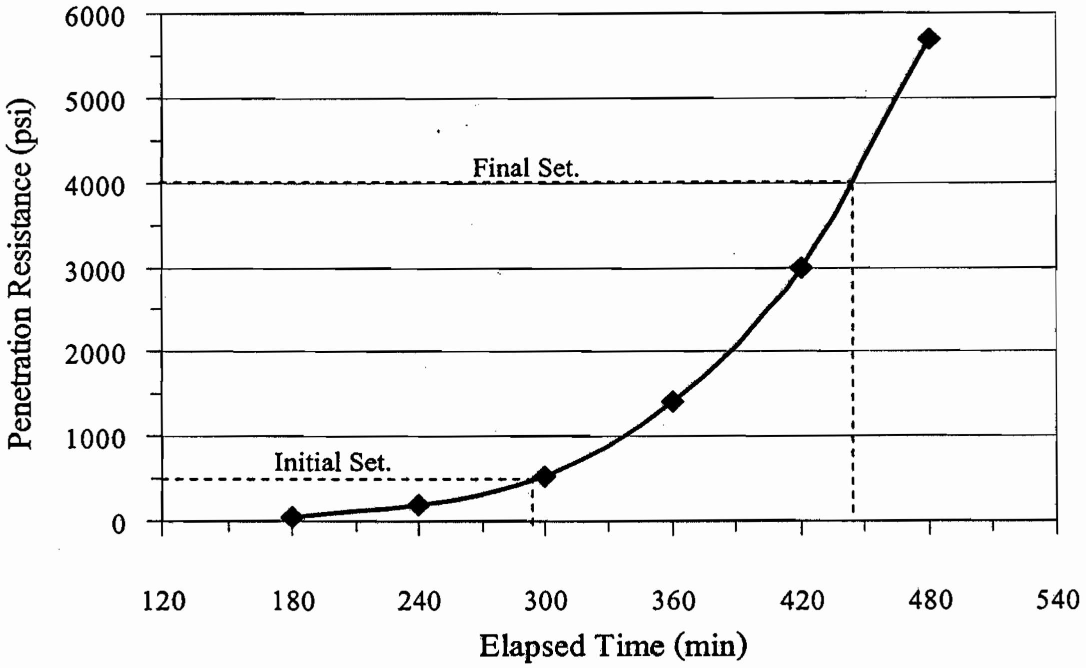


รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P20

ตารางที่ ข.9 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P30

Specimen : G1P30		Temp. =	24 °C
W / B = 0.73		Slump =	7.0 cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	48	48	1	62	62	55
240	1/2	98	196	1/2	88	176	186
300	1/4	130	520	1/4	138	552	536
360	1/10	144	1440	1/10	138	1380	1410
420	1/20	144	2880	1/20	154	3080	2980
480	1/40	144	5760	1/40	140	5600	5680
540							
600							
660							
Initial Set.	295		min	Final Set.	445		min

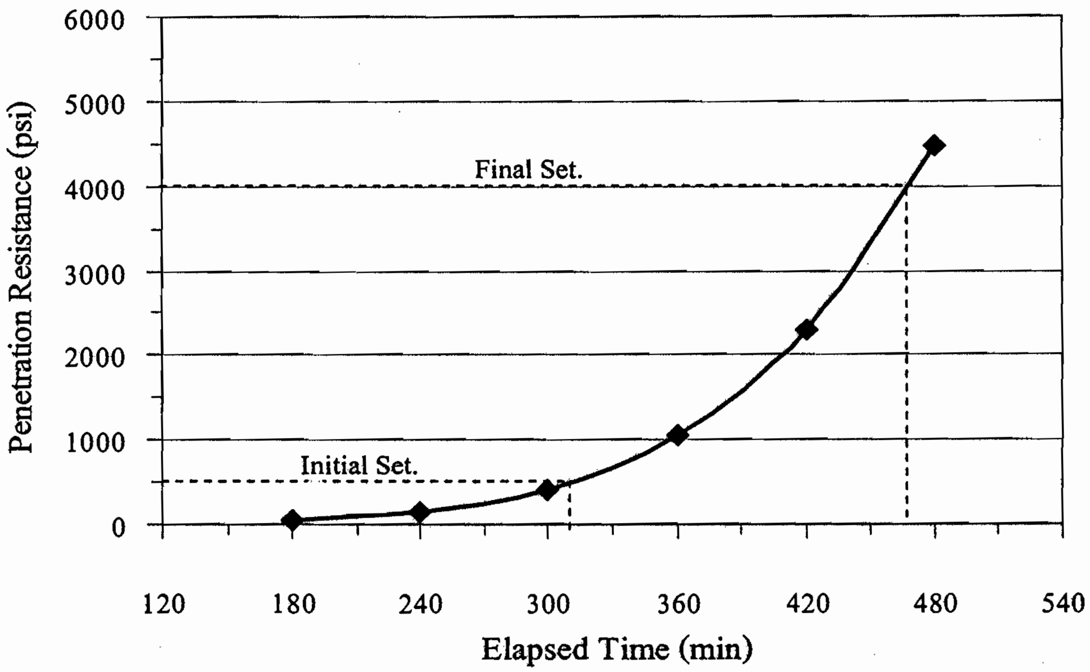


รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P30

ตารางที่ ข.10 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G1P40

Specimen :	G1P40	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.74	Slump	=	7.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	38	38	1	52	52	45
240	1	152	152	1	156	156	154
300	1/2	198	396	1/2	200	400	398
360	1/10	110	1100	1/10	100	1000	1050
420	1/20	118	2360	1/20	112	2240	2300
480	1/40	102	4080	1/40	122	4880	4480
540							
600							
660							
Initial Set.	310		min	Final Set.	465		min

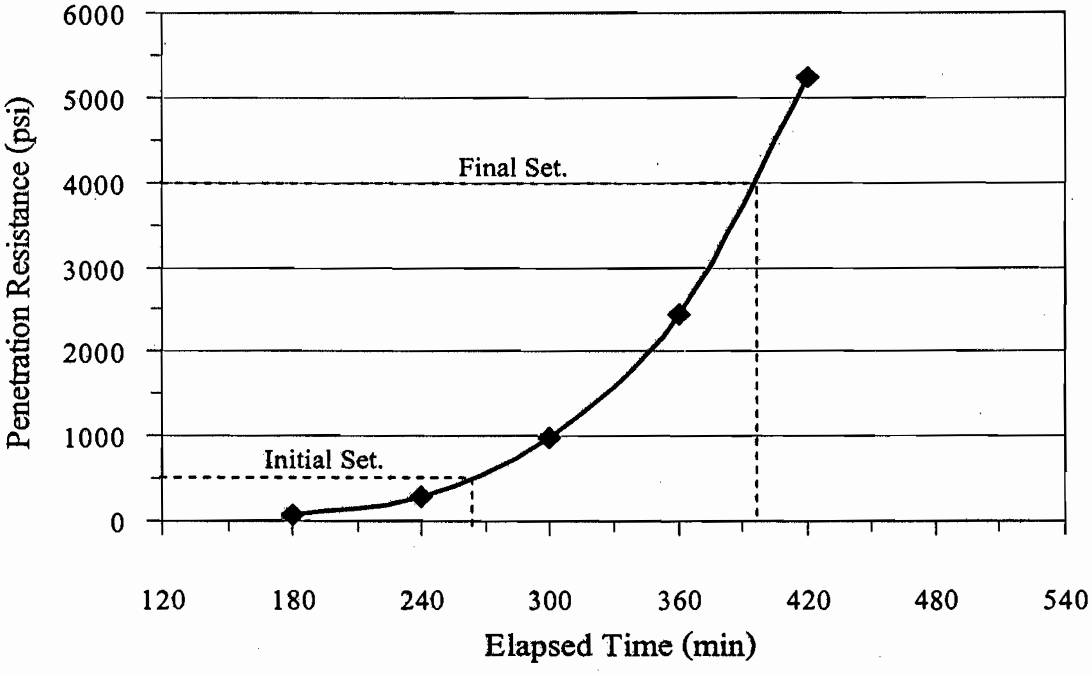


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G1P40

ตารางที่ ข.11 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P10

Specimen : G2P10		Temp. = 24	°C
W / B = 0.68		Slump = 5.5	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	68	68	1	92	92	80
240	1/2	128	256	1/2	162	324	290
300	1/10	94	940	1/10	104	1040	990
360	1/20	134	2680	1/20	110	2200	2440
420	1/40	112	4480	1/40	150	6000	5240
480							
540							
600							
660							
Initial Set.	265		min	Final Set.	395		min

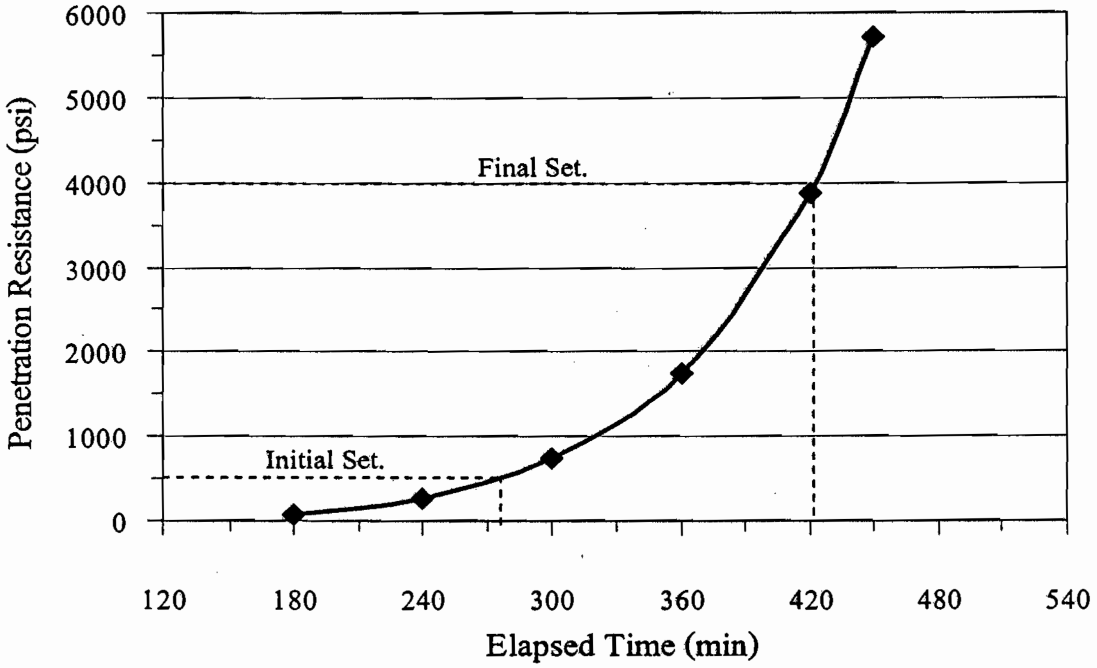


รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P10

ตารางที่ ข.12 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P20

Specimen :	G2P20	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.70	Slump	=	6.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	72	72	1	54	54	63
240	1/2	118	236	1/2	142	284	260
300	1/4	182	728	1/4	184	736	732
360	1/10	172	1720	1/10	178	1780	1750
420	1/20	192	3840	1/20	195	3900	3870
450	1/40	142	5680	1/40	144	5760	5720
480							
510							
540							
Initial Set.	275		min	Final Set.	420		min

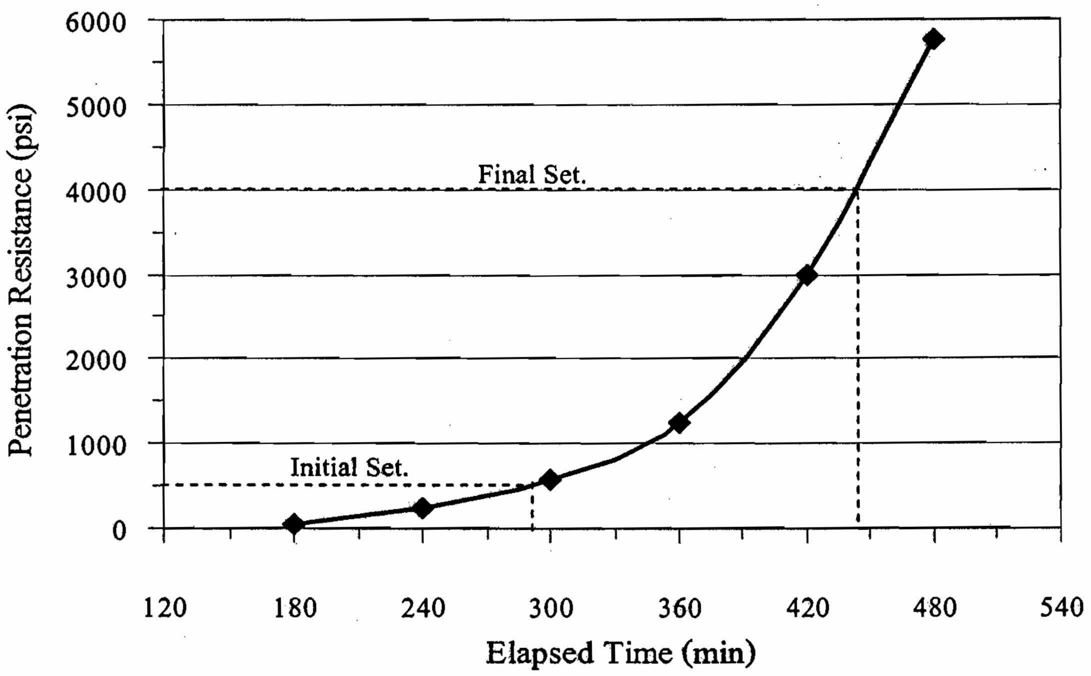


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P20

ตารางที่ ข.13 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P30

Specimen :	G2P30		Temp.	=	24	°C
W / B	=	0.71	Slump	=	6.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	64	64	1	40	40	52
240	1/2	125	250	1/2	120	240	245
300	1/4	146	584	1/4	138	552	568
360	1/10	122	1220	1/10	126	1260	1240
420	1/20	144	2880	1/20	154	3080	2980
480	1/40	140	5600	1/40	148	5920	5760
510							
540							
570							
Initial Set.	290		min	Final Set.	445		min

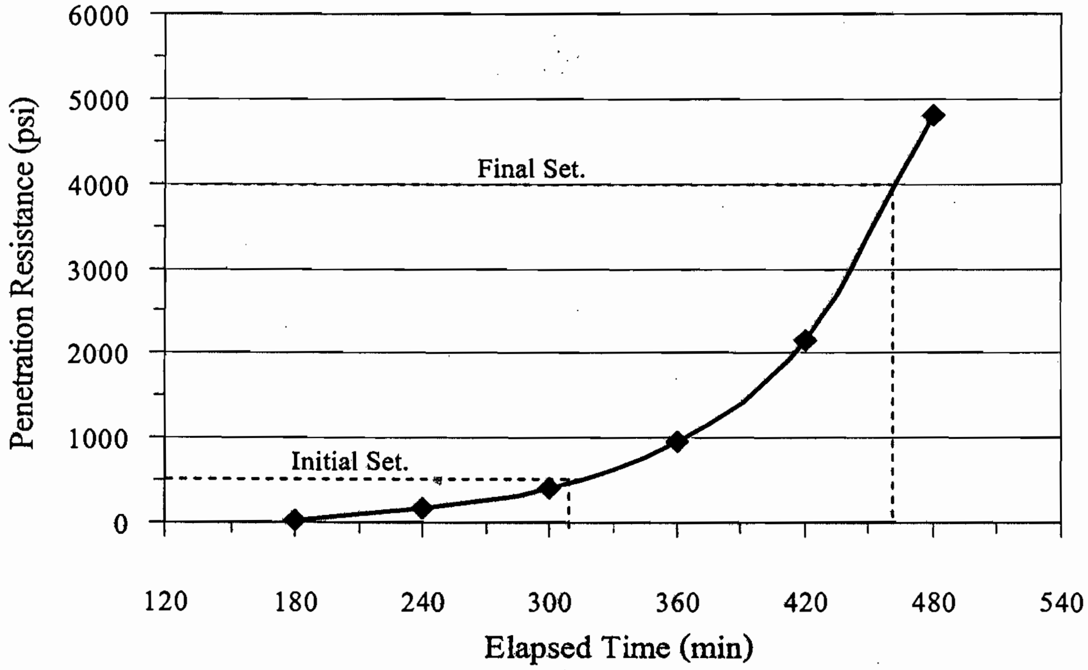


รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P30

ตารางที่ ข.14 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต G2P40

Specimen :	G2P40	Temp.	=	24	°C
W / B	= 0.72	Slump	=	6.0	cm

Elapsed Time (min)	sample 1			sample 2			Average Resistance (psi)
	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	Bearing Area (in)	Load (lb)	Resistance (psi)	
180	1	12	12	1	22	22	17
240	1	134	134	1	192	192	163
300	1/2	200	400	1/2	198	396	398
360	1/10	98	980	1/10	94	940	960
420	1/20	100	2000	1/20	114	2280	2140
480	1/40	116	4640	1/40	124	4960	4800
510							
540							
570							
Initial Set.	310	min		Final Set.	460	min	



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานกับเวลาหลังการผสมของคอนกรีต G2P40

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : CT1W	Date of Casting : 21 / 07 / 2003
W / B = 0.70	Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	24/07/2003	1	3.780	10.00	19.80	2432	78.50	136.6	177.38	178.12
		2	3.730	10.00	19.90	2388	78.50	138.0	179.20	
		3	3.760	10.00	20.00	2395	78.50	136.9	177.77	
7	28/07/2003	1	3.710	10.05	19.60	2387	79.29	176.7	227.18	235.35
		2	3.720	9.90	20.20	2394	76.94	183.8	243.52	
		3	3.740	10.40	20.30	2170	84.91	177.9	213.58	
14	04/08/2003	1	3.660	9.94	20.00	2359	77.56	199.7	262.46	280.18
		2	3.660	9.95	20.04	2350	77.72	206.6	270.99	
		3	3.670	10.00	20.10	2326	78.50	215.7	280.10	
28	18/08/2003	1	3.700	9.97	20.08	2361	78.03	245.8	321.11	319.24
		2	3.730	9.97	20.09	2379	78.03	239.9	313.40	
		3	3.790	10.02	20.25	2375	78.81	249.9	323.22	
60	19/09/2003	1	3.700	10.03	20.05	2337	78.97	285.6	368.65	362.13
		2	3.730	9.95	20.13	2384	77.72	258.4	338.93	
		3	3.730	9.95	20.25	2370	77.72	288.8	378.80	
90	19/10/2003	1	3.700	10.00	20.23	2330	78.50	275.4	357.62	370.79
		2	3.700	10.00	20.17	2337	78.50	285.6	370.87	
		3	3.700	10.04	20.20	2315	79.13	298.0	383.89	
180	17/01/2004	1	3.680	10.05	19.96	2325	79.29	299.6	385.19	385.18
		2	3.760	10.09	20.14	2336	79.92	309.6	394.89	
		3	3.720	10.07	20.10	2325	79.60	293.2	375.46	
270	16/04/2004	1	3.750	10.00	20.17	2368	78.50	299.2	388.53	392.38
		2	3.760	10.00	20.30	2360	78.50	302.3	392.55	
		3	3.730	10.00	20.20	2352	78.50	305.0	396.06	
360	15/07/2004	1	3.730	9.98	20.10	2373	78.19	308.0	401.56	397.45
		2	3.740	9.97	20.06	2389	78.03	302.3	394.92	
		3	3.790	10.04	20.10	2383	79.129	307.3	395.87	

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT5W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : CT5W	Date of Casting : 22 / 07 / 2003
W / B = 0.70	Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	25/07/2003	1	3.699	9.96	20.10	2362	77.91	88.5	115.79	122.27
		2	3.697	10.00	20.00	2354	78.54	94.4	122.52	
		3	3.715	10.10	20.20	2295	80.12	101.0	128.50	
7	29/07/2003	1	3.666	9.98	20.02	2341	78.23	137.6	179.31	183.20
		2	3.669	9.97	20.17	2330	78.07	144.5	188.68	
		3	3.676	10.01	20.19	2314	78.70	140.2	181.60	
14	05/08/2003	1	3.699	9.99	20.13	2344	78.38	198.3	257.89	251.70
		2	3.714	10.02	20.27	2324	78.85	189.9	245.49	
		3	3.715	10.05	20.06	2335	79.33	195.9	251.73	
28	19/08/2003	1	3.724	10.00	20.21	2346	78.54	249.0	323.18	316.11
		2	3.725	10.09	20.13	2314	79.96	242.4	309.02	
		3	3.728	10.06	20.15	2328	79.49	246.5	316.13	
60	20/09/2003	1	3.743	9.99	20.30	2352	78.38	283.6	368.82	372.63
		2	3.734	9.94	20.30	2370	77.60	286.6	376.48	
		3	3.760	9.99	20.50	2340	78.38	286.5	372.59	
90	20/10/2003	1	3.749	10.01	20.40	2335	78.70	322.7	418.00	393.92
		2	3.758	10.10	20.20	2322	80.12	297.4	378.39	
		3	3.777	10.12	20.20	2325	80.44	304.1	385.39	
180	18/01/2004	1	3.700	10.01	20.07	2343	78.70	319.8	414.24	414.82
		2	3.704	10.01	20.10	2342	78.70	320.8	415.53	
		3	3.704	10.00	20.10	2346	78.54	319.5	414.68	
270	17/04/2004	1	3.655	9.99	20.10	2320	78.38	318.6	414.34	422.80
		2	3.655	9.98	20.02	2334	78.23	319.5	416.34	
		3	3.687	10.02	20.08	2329	78.85	338.6	437.72	
360	16/07/2004	1	3.709	10.00	20.00	2361	78.54	340.1	441.42	429.04
		2	3.711	10.00	20.00	2362	78.54	323.6	420.00	
		3	3.748	10.00	20.00	2386	78.54	328.0	425.71	

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : OP10W	Date of Casting : 24 / 07 / 2003
W / B = 0.72	Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	27/07/2003	1	3.677	10.00	20.02	2339	78.54	99.0	128.49	127.49
		2	3.681	9.98	20.06	2346	78.23	98.3	128.10	
		3	3.682	9.99	20.00	2349	78.38	96.8	125.89	
7	31/07/2003	1	3.734	10.05	20.06	2347	79.33	134.1	172.32	174.58
		2	3.735	10.01	20.22	2347	78.70	137.4	177.98	
		3	3.736	10.04	20.05	2354	79.17	134.7	173.44	
14	07/08/2003	1	3.767	10.05	20.30	2339	79.33	156.2	200.72	213.54
		2	3.771	10.02	20.25	2362	78.85	172.6	223.12	
		3	3.774	10.08	20.18	2344	79.80	169.7	216.77	
28	21/08/2003	1	3.690	10.03	19.99	2336	79.01	190.0	245.13	245.13
		2	3.693	9.99	20.07	2348	78.38	198.3	257.89	
		3	3.709	10.02	19.94	2359	78.85	204.9	264.88	
60	22/09/2003	1	3.724	10.00	20.10	2359	78.54	213.5	277.10	281.39
		2	3.744	10.04	20.10	2353	79.17	217.2	279.66	
		3	3.753	10.06	20.00	2361	79.49	224.1	287.40	
90	22/10/2003	1	3.709	10.01	20.07	2348	78.70	225.0	291.44	291.57
		2	3.710	10.00	20.10	2350	78.54	219.9	285.41	
		3	3.726	10.00	20.30	2337	78.54	229.5	297.87	
180	20/01/2004	1	3.753	10.03	20.20	2351	79.01	241.3	311.31	308.24
		2	3.757	10.05	20.01	2367	79.33	237.5	305.19	
		3	3.755	10.03	20.10	2364	79.01	238.9	308.22	
270	19/04/2004	1	3.731	10.06	20.08	2338	79.49	234.2	300.35	310.39
		2	3.731	10.00	20.13	2360	78.54	241.3	313.18	
		3	3.732	10.03	20.04	2357	79.01	246.2	317.63	
360	18/07/2004	1	3.702	10.00	20.00	2357	78.54	251.8	326.81	320.49
		2	3.708	10.00	20.00	2361	78.54	246.1	319.41	
		3	3.714	10.00	20.00	2364	78.54	242.9	315.26	

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : OP20W	Date of Casting : 30 / 07 / 2003
W / B = 0.77	Slump = 6.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	02/08/2003	1	3.624	10.02	20.08	2289	78.85	88.3	114.15	109.36
		2	3.624	9.98	20.15	2299	78.23	79.6	103.73	
		3	3.625	10.04	20.00	2289	79.17	85.6	110.22	
7	06/08/2003	1	3.646	10.01	20.24	2289	78.70	115.8	150.00	150.00
		2	3.646	10.01	20.20	2294	78.70	130.3	168.78	
		3	3.648	10.01	20.20	2295	78.70	130.6	169.17	
14	13/08/2003	1	3.696	10.02	20.44	2293	78.85	149.3	193.00	184.50
		2	3.700	10.04	20.31	2301	79.17	139.9	180.13	
		3	3.704	10.03	20.24	2316	79.01	139.8	180.36	
28	27/08/2003	1	3.620	10.00	20.19	2283	78.54	176.3	228.82	212.47
		2	3.631	10.01	20.15	2290	78.70	179.0	231.86	
		3	3.639	10.00	20.22	2291	78.54	163.7	212.47	
60	28/09/2003	1	3.650	10.00	20.20	2301	78.54	174.2	226.09	246.87
		2	3.655	10.02	20.20	2295	78.85	194.2	251.05	
		3	3.667	10.01	20.10	2318	78.70	203.4	263.47	
90	28/10/2003	1	3.590	10.00	20.07	2277	78.54	196.3	254.78	254.65
		2	3.603	10.01	20.05	2283	78.70	196.6	254.66	
		3	3.612	9.99	20.16	2286	78.38	195.7	254.51	
180	26/01/2004	1	3.641	10.01	20.14	2297	78.70	207.4	268.65	266.13
		2	3.643	10.02	20.13	2295	78.85	205.7	265.91	
		3	3.645	10.02	20.15	2294	78.85	204.1	263.84	
270	25/04/2004	1	3.625	9.99	20.03	2309	78.38	211.3	274.80	269.57
		2	3.632	10.03	20.07	2290	79.01	206.5	266.42	
		3	3.658	9.99	20.14	2317	78.38	205.7	267.51	
360	24/07/2004	1	3.652	10.00	20.00	2325	78.54	206.0	267.37	269.70
		2	3.673	10.00	20.00	2338	78.54	207.2	268.92	
		3	3.680	10.00	20.00	2343	78.54	210.2	272.82	

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP30W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : OP30W	Date of Casting : 04 / 08 / 2003
W / B = 0.87	Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	07/08/2003	1	3.572	9.97	20.10	2276	78.07	56.1	73.25	80.21
		2	3.572	9.97	20.13	2273	78.07	63.2	82.52	
		3	3.579	9.97	20.00	2292	78.07	65.0	84.87	
7	11/08/2003	1	3.583	10.00	20.05	2275	78.54	78.7	102.14	107.64
		2	3.604	10.00	20.12	2281	78.54	81.1	105.26	
		3	3.605	10.00	20.12	2281	78.54	89.0	115.51	
14	18/08/2003	1	3.604	9.98	20.18	2283	78.23	92.9	121.06	127.00
		2	3.605	9.97	20.23	2283	78.07	93.0	121.43	
		3	3.607	9.99	20.21	2277	78.38	106.5	138.50	
28	01/09/2003	1	3.634	10.00	20.10	2302	78.54	119.4	154.97	150.14
		2	3.636	10.00	20.20	2292	78.54	116.0	150.56	
		3	3.646	9.98	20.20	2307	78.23	111.2	144.91	
60	03/10/2003	1	3.660	10.10	20.25	2256	80.12	134.4	171.00	174.42
		2	3.627	10.00	20.17	2290	78.54	134.9	175.09	
		3	3.657	10.00	20.30	2294	78.54	136.5	177.16	
90	02/11/2003	1	3.606	9.97	20.20	2287	78.07	143.6	187.50	187.85
		2	3.615	10.02	20.10	2281	78.85	145.2	187.70	
		3	3.617	10.01	20.10	2287	78.70	145.4	188.34	
180	31/01/2004	1	3.631	10.02	20.06	2295	78.85	150.6	194.68	193.26
		2	3.632	10.03	20.27	2268	79.01	143.5	185.14	
		3	3.635	10.05	20.14	2275	79.33	155.6	199.95	
270	30/04/2004	1	3.613	10.01	20.15	2278	78.70	150.5	194.94	197.43
		2	3.62	10.04	19.96	2291	79.17	156.4	201.38	
		3	3.625	10.00	20.18	2287	78.54	151.0	195.98	
360	30/07/2004	1	3.673	10.00	20.00	2338	78.54	156.2	202.73	202.17
		2	3.688	10.00	20.00	2348	78.54	155.7	202.08	
		3	3.693	10.00	20.00	2351	78.54	155.4	201.69	

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP40W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : OP40W	Date of Casting : 07 / 08 / 2003
W / B = 0.95	Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	10/08/2003	1	3.554	10.02	20.08	2245	78.85	32.6	42.14	42.00
		2	3.555	10.01	20.16	2241	78.70	32.6	42.23	
		3	3.557	10.02	20.17	2236	78.85	32.2	41.63	
7	14/08/2003	1	3.540	10.00	20.19	2232	78.54	45.0	58.41	54.16
		2	3.543	10.01	20.16	2233	78.70	44.7	57.90	
		3	3.545	10.03	20.16	2226	79.01	35.8	46.19	
14	21/08/2003	1	3.542	10.02	20.07	2238	78.85	58.9	76.14	75.89
		2	3.549	10.02	20.27	2220	78.85	59.3	76.66	
		3	3.554	10.01	20.09	2248	78.70	57.8	74.87	
28	04/09/2003	1	3.624	10.00	20.30	2273	78.54	78.5	101.89	99.09
		2	3.631	10.00	20.40	2266	78.54	78.3	101.63	
		3	3.635	10.10	20.10	2257	80.12	73.7	93.77	
60	06/10/2003	1	3.530	10.00	20.10	2236	78.54	78.5	101.89	107.68
		2	3.532	10.01	20.00	2244	78.70	77.8	100.77	
		3	3.538	9.97	20.10	2255	78.07	92.2	120.39	
90	05/11/2003	1	3.514	9.99	20.00	2242	78.38	93.0	120.95	115.17
		2	3.516	10.00	20.00	2238	78.54	82.9	107.60	
		3	3.517	10.01	20.10	2223	78.70	90.3	116.97	
180	03/02/2004	1	3.570	10.01	20.24	2241	78.70	98.2	127.20	118.34
		2	3.572	10.02	20.20	2243	78.85	90.4	116.86	
		3	3.575	10.00	20.20	2253	78.54	85.5	110.97	
270	03/05/2004	1	3.555	10.01	20.07	2251	78.70	94.8	122.80	119.77
		2	3.562	10.01	20.13	2248	78.70	89.7	116.19	
		3	3.575	10.08	20.00	2240	79.80	94.2	120.33	
360	01/08/2004	1	3.517	10.02	20.00	2230	78.85	91.1	117.77	118.45
		2	3.54	10.02	20.14	2229	78.85	96.2	124.36	
		3	3.565	10.05	20.14	2231	79.327	88.1	113.21	

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G1P10W	Date of Casting : 09 / 08 / 2003
W / B = 0.72	Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	12/08/2003	1	3.727	10.00	20.08	2363	78.54	121.2	157.31	157.59
		2	3.728	10.03	20.07	2351	79.01	125.8	162.30	
		3	3.728	10.00	20.20	2350	78.54	118.0	153.15	
7	16/08/2003	1	3.743	10.02	20.08	2364	78.85	170.9	220.93	224.22
		2	3.744	10.01	20.12	2365	78.70	172.1	222.92	
		3	3.750	10.04	20.24	2340	79.17	177.7	228.80	
14	23/08/2003	1	3.767	10.00	20.25	2369	78.54	213.4	276.97	264.34
		2	3.762	10.05	20.16	2352	79.33	204.2	262.40	
		3	3.775	10.05	20.23	2352	79.33	197.4	253.66	
28	06/09/2003	1	3.701	10.00	20.00	2356	78.54	254.0	329.67	300.55
		2	3.713	10.00	20.20	2340	78.54	215.0	279.05	
		3	3.716	10.00	20.20	2342	78.54	225.7	292.94	
60	08/10/2003	1	3.731	10.06	20.10	2335	79.49	279.6	358.58	349.99
		2	3.733	10.03	20.20	2339	79.01	267.2	344.73	
		3	3.735	10.03	20.10	2352	79.01	268.7	346.66	
90	07/11/2003	1	3.757	10.01	20.10	2375	78.70	291.9	378.10	375.58
		2	3.759	10.03	20.20	2355	79.01	298.6	385.24	
		3	3.76	10.00	20.20	2370	78.54	280.0	363.41	
180	05/02/2004	1	3.740	9.99	21.14	2257	78.38	315.8	410.70	389.82
		2	3.744	10.00	20.27	2352	78.54	286.8	372.24	
		3	3.745	10.00	20.15	2366	78.54	297.8	386.51	
270	05/05/2004	1	3.687	10.04	20.02	2326	79.17	306.1	394.13	396.78
		2	3.71	10.03	19.93	2356	79.01	309.6	399.43	
		3	3.723	9.98	20.20	2356	78.23	274.50	357.70	
360	03/08/2004	1	3.77	9.99	20.16	2386	78.38	308.9	401.72	401.67
		2	3.722	10.03	19.99	2357	79.01	314.2	405.36	
		3	3.718	10.00	20.14	2350	78.54	306.6	397.94	

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G1P20W	Date of Casting : 12 / 08 / 2003
W / B = 0.73	Slump = 7.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm) Diameter	Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
3	14/08/2003	1	3.743	10.01	20.13	2363	78.70	108.3	140.28	139.73
		2	3.744	10.00	20.31	2347	78.54	110.0	142.77	
		3	3.746	10.00	20.23	2358	78.54	104.9	136.15	
7	19/08/2003	1	3.751	9.99	20.12	2378	78.38	147.0	191.17	191.31
		2	3.752	10.00	20.25	2359	78.54	147.1	190.92	
		3	3.753	10.01	20.10	2373	78.70	148.1	191.84	
14	26/08/2003	1	3.730	10.00	20.09	2364	78.54	158.8	206.11	225.89
		2	3.731	10.03	20.08	2352	79.01	205.4	265.00	
		3	3.733	10.02	20.07	2359	78.85	159.8	206.58	
28	09/09/2003	1	3.714	10.00	20.12	2350	78.54	199.5	258.93	269.26
		2	3.725	9.98	20.07	2373	78.23	206.2	268.70	
		3	3.735	9.95	20.03	2398	77.76	213.7	280.16	
60	11/10/2003	1	3.775	10.02	20.20	2370	78.85	257.4	332.75	316.49
		2	3.780	10.08	20.20	2345	79.80	245.1	313.09	
		3	3.799	10.08	20.20	2357	79.80	237.7	303.63	
90	10/11/2003	1	3.730	9.98	20.20	2361	78.23	256.0	333.60	334.18
		2	3.734	10.00	20.20	2354	78.54	256.4	332.78	
		3	3.735	10.00	20.20	2354	78.54	259.0	336.16	
180	08/02/2004	1	3.724	10.00	20.16	2352	78.54	270.8	351.47	346.76
		2	3.766	10.02	20.27	2356	78.85	270.8	350.07	
		3	3.767	10.00	20.30	2363	78.54	261.0	338.75	
270	08/05/2004	1	3.716	10.00	20.00	2366	78.54	271.7	352.64	356.12
		2	3.724	10.03	20.08	2347	79.01	285.4	368.21	
		3	3.738	10.04	20.22	2335	79.17	269.9	347.52	
360	06/08/2004	1	3.737	9.98	20.14	2372	78.23	296.1	385.85	358.55
		2	3.775	10.03	20.05	2383	79.01	256.1	330.41	
		3	3.766	10.00	20.24	2369	78.54	276.9	359.39	

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G1P30W	Date of Casting : 14 / 08 / 2003
W / B = 0.73	Slump = 7.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	17/08/2003	1	3.683	10.00	20.04	2340	78.54	93.7	121.61	120.66
		2	3.683	9.97	20.07	2351	78.07	92.2	120.39	
		3	3.687	10.02	20.04	2333	78.85	92.8	119.96	
7	21/08/2003	1	3.741	10.05	20.06	2351	79.33	138.7	178.23	172.07
		2	3.746	10.06	20.15	2339	79.49	139.1	178.39	
		3	3.748	10.05	20.20	2339	79.33	124.2	159.60	
14	28/08/2003	1	3.673	10.00	19.90	2350	78.54	160.6	208.44	208.53
		2	3.680	10.00	20.10	2331	78.54	157.7	204.68	
		3	3.683	10.00	20.00	2345	78.54	163.7	212.47	
28	11/09/2003	1	3.657	10.02	20.00	2319	78.85	178.1	230.23	237.86
		2	3.667	9.99	20.10	2328	78.38	188.7	245.40	
		3	3.692	10.01	20.10	2334	78.70	183.7	237.95	
60	13/10/2003	1	3.750	10.06	20.10	2347	79.49	211.9	271.75	285.30
		2	3.755	10.01	20.30	2350	78.70	220.7	285.87	
		3	3.773	10.03	20.40	2341	79.01	231.2	298.28	
90	12/11/2003	1	3.662	9.99	20.00	2336	78.38	250.3	325.51	294.90
		2	3.664	10.02	20.00	2323	78.85	215.7	278.84	
		3	3.665	10.00	20.00	2333	78.54	216.0	280.35	
180	10/02/2004	1	3.682	10.01	20.14	2323	78.70	234.1	303.23	302.08
		2	3.721	10.00	20.22	2343	78.54	229.6	298.00	
		3	3.700	10.00	20.00	2355	78.54	235.0	305.01	
270	10/05/2004	1	3.715	10.03	20.19	2329	79.01	236.4	304.99	306.77
		2	3.727	10.06	20.11	2332	79.49	237.6	304.71	
		3	3.730	10.01	20.17	2350	78.70	239.8	310.61	
360	08/08/2004	1	3.716	9.99	20.11	2357	78.38	223.5	290.66	308.23
		2	3.729	10.00	20.15	2356	78.54	262.0	340.05	
		3	3.766	10.02	19.94	2395	78.854	227.4	293.97	

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G1P40W	Date of Casting : 16 / 08 / 2003
W / B = 0.74	Slump = 7.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	19/08/2003	1	3.689	10.00	20.05	2343	78.54	92.7	120.32	117.62
		2	3.692	10.00	20.05	2345	78.54	92.4	119.93	
		3	3.693	9.99	20.10	2344	78.38	86.6	112.62	
7	23/08/2003	1	3.722	10.02	20.08	2351	78.85	127.7	165.08	154.77
		2	3.728	10.03	20.14	2343	79.01	110.3	142.30	
		3	3.737	10.02	20.22	2344	78.85	121.4	156.94	
14	30/08/2003	1	3.740	10.00	20.10	2369	78.54	136.5	177.16	187.11
		2	3.742	10.00	20.10	2370	78.54	143.8	186.64	
		3	3.744	10.00	20.10	2372	78.54	152.2	197.54	
28	12/09/2003	1	3.681	10.03	20.00	2329	79.01	167.1	215.58	226.27
		2	3.682	10.00	20.10	2332	78.54	175.6	227.91	
		3	3.686	10.00	20.00	2347	78.54	181.3	235.31	
60	15/10/2003	1	3.704	10.00	20.20	2335	78.54	205.7	266.98	266.92
		2	3.711	10.07	20.10	2318	79.64	204.1	261.23	
		3	3.715	10.00	20.20	2342	78.54	210.0	272.56	
90	14/11/2003	1	3.637	10.02	19.90	2318	78.85	204.4	264.23	270.33
		2	3.637	10.01	19.80	2334	78.70	213.3	276.29	
		3	3.640	10.00	20.00	2317	78.54	208.4	270.48	
180	12/02/2004	1	3.711	10.02	20.20	2330	78.85	209.7	271.08	276.75
		2	3.752	10.11	20.21	2313	80.28	216.0	274.28	
		3	3.755	10.00	20.30	2355	78.54	219.5	284.89	
270	12/05/2004	1	3.668	10.00	20.11	2322	78.54	216.1	280.48	280.59
		2	3.694	10.05	20.14	2312	79.33	213.8	274.74	
		3	3.696	10.05	20.01	2328	79.33	223.0	286.56	
360	10/08/2004	1	3.692	9.95	20.10	2362	77.76	210.8	276.35	285.60
		2	3.706	10.04	20.11	2328	79.17	223.9	288.29	
		3	3.706	9.98	20.20	2345	78.226	224.2	292.16	

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G2P10W	Date of Casting : 19 / 08 / 2003
W / B = 0.68	Slump = 5.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	22/08/2003	1	3.752	10.00	20.14	2372	78.54	138.7	180.02	176.49
		2	3.753	10.03	20.08	2366	79.01	130.0	167.72	
		3	3.753	10.01	20.20	2361	78.70	140.3	181.73	
7	26/08/2003	1	3.744	10.02	20.16	2355	78.85	184.6	238.64	238.88
		2	3.746	10.00	20.18	2364	78.54	183.7	238.42	
		3	3.747	10.03	20.09	2361	79.01	185.7	239.58	
14	02/09/2003	1	3.680	10.00	20.10	2331	78.54	214.7	278.66	284.80
		2	3.684	10.00	20.20	2322	78.54	223.8	290.47	
		3	3.687	10.00	20.10	2336	78.54	219.8	285.28	
28	16/09/2003	1	3.693	10.01	20.00	2346	78.70	252.1	326.55	318.92
		2	3.711	9.98	20.12	2358	78.23	237.7	309.75	
		3	3.718	10.04	19.96	2353	79.17	248.9	320.48	
60	18/10/2003	1	3.730	10.05	20.04	2346	79.33	309.0	397.07	374.41
		2	3.743	10.00	20.13	2367	78.54	270.4	350.95	
		3	3.745	10.04	20.09	2355	79.17	291.4	375.20	
90	17/11/2003	1	3.782	10.06	20.28	2346	79.49	297.3	381.28	389.91
		2	3.786	10.06	20.20	2358	79.49	310.6	398.33	
		3	3.788	10.05	20.25	2358	79.33	303.6	390.13	
180	15/02/2004	1	3.754	10.02	20.36	2338	78.85	306.4	396.09	400.38
		2	3.757	10.01	20.30	2352	78.70	309.7	401.16	
		3	3.759	10.00	20.30	2358	78.54	311.2	403.91	
270	15/05/2004	1	3.722	10.04	19.99	2352	79.17	319.6	411.51	410.91
		2	3.737	10.02	20.16	2351	78.85	312.4	403.85	
		3	3.748	10.03	20.10	2360	79.01	323.5	417.36	
360	13/08/2004	1	3.714	9.99	20.05	2363	78.38	329.8	428.90	418.68
		2	3.721	10.01	20.08	2355	78.70	323.4	418.90	
		3	3.731	10.02	20.12	2352	78.854	315.8	408.24	

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G2P20W	Date of Casting : 21 / 08 / 2003
W / B = 0.70	Slump = 6.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	24/08/2003	1	3.718	10.00	20.04	2362	78.54	124.4	161.46	170.37
		2	3.719	9.98	20.09	2366	78.23	127.6	166.28	
		3	3.723	9.99	20.15	2357	78.38	141.0	183.37	
7	28/08/2003	1	3.749	10.00	20.10	2375	78.54	178.1	231.16	229.81
		2	3.755	10.00	20.20	2367	78.54	172.3	223.63	
		3	3.757	10.00	20.10	2380	78.54	180.8	234.66	
14	04/09/2003	1	3.742	10.00	20.10	2370	78.54	219.5	284.89	275.28
		2	3.744	10.00	20.10	2372	78.54	205.4	266.59	
		3	3.747	10.00	20.10	2374	78.54	211.4	274.38	
28	18/09/2003	1	3.776	10.02	20.30	2359	78.85	252.9	326.93	315.51
		2	3.785	10.05	20.10	2374	79.33	240.8	309.43	
		3	3.788	10.04	20.30	2357	79.17	240.9	310.18	
60	20/10/2003	1	3.781	10.07	20.10	2362	79.64	288.5	369.26	369.97
		2	3.782	10.07	20.15	2357	79.64	296.7	379.75	
		3	3.786	10.04	20.30	2356	79.17	280.3	360.91	
90	19/11/2003	1	3.694	10.02	19.97	2346	78.85	285.6	369.20	386.31
		2	3.697	10.02	20.05	2338	78.85	311.5	402.68	
		3	3.699	10.00	20.10	2343	78.54	298.2	387.03	
180	17/02/2004	1	3.712	10.01	20.00	2358	78.70	289.1	374.47	395.05
		2	3.716	10.00	20.21	2341	78.54	312.7	405.85	
		3	3.718	10.00	20.10	2355	78.54	311.9	404.81	
270	17/05/2004	1	3.724	10.01	19.99	2367	78.70	322.6	417.87	405.23
		2	3.734	10.00	20.20	2354	78.54	301.6	391.45	
		3	3.796	10.13	20.20	2332	80.60	321.3	406.38	
360	15/08/2004	1	3.763	10.01	20.09	2380	78.70	303.8	393.51	407.78
		2	3.773	10.02	20.15	2375	78.85	330.9	427.76	
		3	3.802	10.06	20.22	2366	79.485	313.5	402.05	

ตารางที่ **ค.13** ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G2P30W　　Date of Casting : 23 / 08 / 2003

W / B = 0.71　　Slump = 6.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	26/ 8/2003	1	3.727	10.03	19.95	2364	79.01	113.1	145.92	150.22
		2	3.728	10.00	20.09	2363	78.54	109.1	141.60	
		3	3.728	10.00	20.12	2359	78.54	125.7	163.15	
7	30/08/2003	1	3.706	10.00	20.10	2348	78.54	165.0	214.15	208.88
		2	3.709	10.00	20.00	2361	78.54	152.4	197.80	
		3	3.714	10.00	20.10	2353	78.54	165.4	214.67	
14	06/09/2003	1	3.711	10.00	20.00	2362	78.54	198.2	257.24	247.60
		2	3.721	10.00	20.20	2345	78.54	183.6	238.29	
		3	3.722	10.00	20.00	2369	78.54	190.5	247.25	
28	20/09/2003	1	3.683	10.00	20.10	2333	78.54	232.7	302.02	301.20
		2	3.695	10.04	19.95	2339	79.17	252.5	325.11	
		3	3.705	10.00	20.10	2347	78.54	213.0	276.45	
60	22/10/2003	1	3.738	10.02	20.10	2358	78.85	281.5	363.90	355.94
		2	3.744	10.02	20.16	2355	78.85	271.7	351.23	
		3	3.747	10.06	20.04	2352	79.49	275.0	352.68	
90	21/11/2003	1	3.757	10.02	20.06	2375	78.85	285.2	368.68	367.75
		2	3.759	10.10	20.17	2326	80.12	251.00	319.35	
		3	3.761	10.10	20.20	2324	80.12	288.3	366.81	
180	19/02/2004	1	3.698	10.03	20.09	2330	79.01	285.9	368.85	375.57
		2	3.705	10.00	20.08	2349	78.54	289.4	375.61	
		3	3.707	10.01	20.10	2344	78.70	295.1	382.25	
270	19/05/2004	1	3.729	10.03	20.20	2336	79.01	295.7	381.50	380.70
		2	3.775	10.01	20.24	2370	78.70	292.3	378.62	
		3	3.789	10.02	20.23	2375	78.85	295.5	382.00	
360	17/08/2004	1	3.707	10.01	19.96	2360	78.70	306.5	397.01	387.84
		2	3.718	10.00	20.03	2363	78.54	296.5	384.83	
		3	3.742	9.98	20.06	2385	78.226	292.9	381.68	

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40W ที่บ่มในน้ำประปา

Spacimen : G2P40W	Date of Casting : 26 / 08 / 2003
W / B = 0.72	Slump = 6.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height					
3	29/08/2003	1	3.707	10.00	20.00	2360	78.54	94.8	123.04	117.37
		2	3.707	10.00	20.00	2360	78.54	87.8	113.96	
		3	3.711	10.00	20.10	2351	78.54	88.7	115.12	
7	02/09/2003	1	3.763	10.00	20.30	2360	78.54	135.1	175.35	181.84
		2	3.770	10.00	20.20	2376	78.54	139.0	180.41	
		3	3.774	10.00	20.20	2379	78.54	146.2	189.75	
14	09/09/2003	1	3.699	9.98	20.20	2341	78.23	183.7	239.38	237.21
		2	3.700	10.02	20.13	2331	78.85	180.4	233.21	
		3	3.711	9.99	20.18	2346	78.38	183.8	239.03	
28	23/09/2003	1	3.731	10.02	20.20	2342	78.85	209.2	270.44	275.41
		2	3.741	10.03	20.20	2344	79.01	212.7	274.41	
		3	3.745	10.06	20.20	2332	79.49	219.4	281.37	
60	25/10/2003	1	3.726	10.03	20.09	2347	79.01	252.1	325.25	316.85
		2	3.730	10.00	20.10	2363	78.54	256.3	332.65	
		3	3.730	10.04	20.16	2337	79.17	227.3	292.67	
90	24/11/2003	1	3.708	10.00	20.03	2357	78.54	245.5	318.63	321.58
		2	3.709	10.02	20.17	2332	78.85	248.8	321.63	
		3	3.710	10.05	20.15	2321	79.33	252.5	324.47	
180	22/02/2004	1	3.724	10.04	20.10	2340	79.17	256.1	329.75	329.68
		2	3.788	10.09	20.24	2341	79.96	256.9	327.51	
		3	3.750	10.05	20.16	2345	79.33	258.2	331.79	
270	22/05/2004	1	3.694	10.03	20.00	2338	79.01	250.0	322.54	337.07
		2	3.778	10.07	20.26	2341	79.64	272.5	348.78	
		3	3.853	10.15	20.31	2345	80.91	269.8	339.90	
360	20/08/2004	1	3.737	10.03	20.11	2352	79.01	273.9	353.37	340.03
		2	3.761	10.03	20.18	2359	79.01	262.8	339.05	
		3	3.773	10.06	20.27	2342	79.485	255.5	327.67	

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1S ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : CT1S Date of Casting : 21 / 07 / 2003 W / B = 0.70 Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	19/09/2003	1	3.720	3.779	1.6	10.02	20.15	2341	78.85	268.9	27411	347.61	358.70
		2	3.760	3.812	1.4	10.05	20.30	2335	79.33	279.8	28522	359.55	
		3	3.810	3.894	2.2	10.02	20.08	2406	78.85	285.4	29093	368.94	
90	19/10/2003	1	3.650	3.703	1.5	9.98	19.83	2354	78.19	288.1	29368	375.62	375.59
		2	3.730	3.791	1.6	10.02	19.99	2368	78.81	289.9	29551	374.95	
		3	3.770	3.835	1.7	10.00	20.22	2375	78.50	289.7	29531	376.19	
180	17/01/2004	1	3.710	3.757	1.3	9.97	19.97	2381	78.03	300.7	30652	392.83	392.83
		2	3.760	3.809	1.3	10.05	20.18	2350	79.29	309.5	31549	397.91	
		3	3.770	3.820	1.3	10.00	20.10	2389	78.50	298.6	30438	387.75	
270	16/04/2004	1	3.690	3.750	1.6	10.00	20.10	2339	78.50	302.2	30805	392.42	389.57
		2	3.750	3.810	1.6	10.00	20.18	2367	78.50	303.9	30979	394.63	
		3	3.760	3.830	1.9	10.00	20.34	2355	78.50	293.9	29959	381.65	
360	15/07/2004	1	3.710	3.773	1.7	10.10	20.10	2305	80.08	298.4	30418	379.85	385.37
		2	3.730	3.809	2.1	10.09	20.13	2319	79.92	304.9	31081	388.90	
		3	3.750	3.823	1.9	10.09	20.05	2340	79.92	303.7	30958	387.37	

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT5S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : CT5S   Date of Casting : 22 / 07 / 2003   W / B = 0.70   Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	20/09/2003	1	3.727	3.773	1.2	10.00	20.20	2349	78.54	289.6	29521	375.87	374.54
		2	3.745	3.801	1.5	10.00	20.30	2349	78.54	296.0	30173	384.18	
		3	3.804	3.881	2.0	10.15	20.30	2316	80.91	288.6	29419	363.58	
90	20/10/2003	1	3.681	3.755	2.0	10.03	20.10	2318	79.01	310.6	31662	400.72	399.19
		2	3.598	3.678	2.2	10.01	19.80	2309	78.70	310.6	31662	402.32	
		3	3.713	3.779	1.8	10.02	20.20	2331	78.85	305.2	31111	394.54	
180	18/01/2004	1	3.687	3.754	1.8	10.01	20.04	2338	78.70	332.7	33914	430.95	431.39
		2	3.674	3.726	1.4	10.00	20.05	2333	78.54	332.6	33904	431.68	
		3	3.675	3.735	1.6	10.00	20.00	2340	78.54	332.5	33894	431.55	
270	17/04/2004	1	3.692	3.756	1.7	10.00	20.18	2329	78.54	324.3	33058	420.91	431.69
		2	3.694	3.735	1.1	10.00	20.10	2340	78.54	344.4	35107	447.00	
		3	3.703	3.748	1.2	10.03	20.14	2327	79.01	331.1	33751	427.17	
360	16/07/2004	1	3.707	3.792	2.3	10.00	20.00	2360	78.54	339.5	34608	440.64	426.71
		2	3.718	3.807	2.4	10.00	20.00	2367	78.54	317.6	32375	412.21	
		3	3.712	3.797	2.3	10.00	20.00	2363	78.54	329.2	33558	427.27	

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : OP10S   Date of Casting : 24 / 07 / 2003   W / B = 0.72   Slump = 6.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	22/09/2003	1	3.709	3.745	1.0	10.00	20.10	2349	78.54	217.4	22161	282.16	278.27
		2	3.716	3.751	0.9	10.02	20.20	2333	78.85	212.0	21611	274.06	
		3	3.724	3.754	0.8	10.02	20.10	2350	78.85	215.5	21967	278.58	
90	22/10/2003	1	3.749	3.778	0.8	10.06	20.15	2341	79.49	231.1	23558	296.38	300.41
		2	3.753	3.786	0.9	10.05	20.20	2342	79.33	236.9	24149	304.42	
		3	3.729	3.757	0.8	10.02	20.22	2339	78.85	232.4	23690	300.43	
180	20/01/2004	1	3.726	3.769	1.2	10.02	20.06	2356	78.85	251.3	25617	324.86	324.81
		2	3.727	3.770	1.2	10.00	20.10	2361	78.54	245.9	25066	319.15	
		3	3.730	3.774	1.2	10.02	20.02	2363	78.85	255.6	26055	330.42	
270	19/04/2004	1	3.732	3.741	0.2	9.99	20.24	2352	78.38	255.2	26014	331.89	331.87
		2	3.734	3.740	0.2	10.02	20.09	2357	78.85	255.9	26086	330.81	
		3	3.735	3.743	0.2	10.00	20.17	2358	78.54	256.5	26147	332.91	
360	18/07/2004	1	3.716	3.749	0.9	10.00	20.00	2366	78.54	264.8	26993	343.68	340.22
		2	3.717	3.748	0.8	10.00	20.00	2366	78.54	258.3	26330	335.25	
		3	3.715	3.745	0.8	10.00	20.00	2365	78.54	263.3	26840	341.74	

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : OP20S Date of Casting : 30 / 07 / 2003 W / B = 0.77 Slump = 6.0 cm

Age	Test	No.	Weight (kg)			Dimension (cm)		Density	Area	Load	Load	Stress	Average
(days)	Date		Initial	Test	Change (%)	Diameter	Height	(kg/m^3)	(cm^2)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
60	28/09/2003	1	3.631	3.694	1.7	10.00	20.20	2289	78.54	185.3	18889	240.50	244.11
		2	3.644	3.711	1.8	10.03	20.20	2283	79.01	192.2	19592	247.97	
		3	3.672	3.733	1.7	10.04	20.10	2308	79.17	189.4	19307	243.87	
90	28/10/2003	1	3.686	3.738	1.4	10.06	20.25	2290	79.49	207.2	21121	265.73	265.25
		2	3.690	3.749	1.6	10.00	20.23	2322	78.54	204.8	20877	265.81	
		3	3.691	3.746	1.5	10.05	20.16	2308	79.33	205.6	20958	264.20	
180	26/01/2004	1	3.650	3.706	1.5	10.01	20.14	2303	78.70	214.2	21835	277.45	285.92
		2	3.651	3.713	1.7	10.00	20.14	2308	78.54	220.1	22436	285.67	
		3	3.653	3.715	1.7	10.00	20.10	2314	78.54	227.0	23140	294.62	
270	25/04/2004	1	3.651	3.712	1.7	10.04	20.10	2294	79.17	224.8	22915	289.45	289.42
		2	3.660	3.720	1.6	10.01	20.25	2297	78.70	225.3	22966	291.83	
		3	3.662	3.715	1.4	10.02	20.14	2306	78.85	222.0	22630	286.98	
360	19/07/2004	1	3.614	3.657	1.2	10.00	20.00	2301	78.54	222.6	22691	288.91	287.44
		2	3.624	3.669	1.2	10.00	20.00	2307	78.54	225.5	22987	292.68	
		3	3.624	3.666	1.2	10.00	20.00	2307	78.54	216.3	22049	280.74	

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP30S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : OP30S   Date of Casting : 04 / 08 / 2003   W / B = 0.87   Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	03/10/2003	1	3.629	3.663	0.9	10.04	19.94	2299	79.17	140.1	14281	180.39	176.92
		2	3.659	3.697	1.0	10.09	20.43	2240	79.96	131.7	13425	167.90	
		3	3.681	3.724	1.2	10.00	20.45	2292	78.54	140.6	14332	182.48	
90	02/11/2003	1	3.614	3.659	1.2	10.01	20.20	2273	78.70	143.9	14669	186.39	189.69
		2	3.616	3.662	1.3	10.04	20.10	2272	79.17	147.1	14995	189.40	
		3	3.624	3.665	1.1	10.03	20.00	2293	79.01	149.8	15270	193.26	
180	31/01/2004	1	3.618	3.672	1.5	10.00	20.31	2268	78.54	166.8	17003	216.49	206.38
		2	3.624	3.675	1.4	10.04	20.10	2277	79.17	159.3	16239	205.11	
		3	3.620	3.671	1.4	10.00	20.10	2293	78.54	152.2	15515	197.54	
270	30/04/2004	1	3.639	3.683	1.2	10.05	20.30	2260	79.33	171.8	17513	220.77	213.32
		2	3.652	3.687	1.0	10.03	20.24	2284	79.01	163.7	16687	211.20	
		3	3.657	3.699	1.1	10.02	20.15	2302	78.85	160.9	16402	208.00	
360	30/07/2004	1	3.616	3.649	0.9	10.00	20.00	2302	78.54	157.2	16024	204.03	212.34
		2	3.634	3.671	1.0	10.00	20.00	2313	78.54	166.2	16942	215.71	
		3	3.636	3.669	0.9	10.00	20.00	2315	78.54	167.4	17064	217.27	

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP40S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : OP40S   Date of Casting : 07 / 08 / 2003   W / B = 0.95   Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	06/10/2003	1	3.532	3.572	1.1	9.99	20.20	2231	78.38	90.2	9195	117.31	112.98
		2	3.533	3.577	1.2	10.03	20.00	2236	79.01	90.2	9195	116.37	
		3	3.534	3.563	0.8	10.00	20.10	2239	78.54	81.1	8267	105.26	
90	05/11/2003	1	3.550	3.595	1.3	10.04	20.00	2242	79.17	91.4	9317	117.68	120.65
		2	3.553	3.596	1.2	10.03	20.20	2226	79.01	94.8	9664	122.31	
		3	3.553	3.598	1.3	10.06	20.10	2224	79.49	95.1	9694	121.96	
180	03/02/2004	1	3.526	3.570	1.2	10.03	20.09	2221	79.01	100.3	10224	129.40	131.22
		2	3.529	3.591	1.8	10.00	20.20	2224	78.54	102.4	10438	132.90	
		3	3.529	3.585	1.6	10.00	20.10	2235	78.54	101.2	10316	131.35	
270	03/05/2004	1	3.485	3.538	1.5	10.02	20.10	2199	78.85	100.6	10255	130.05	132.50
		2	3.518	3.556	1.1	10.03	20.01	2225	79.01	105.3	10734	135.85	
		3	3.526	3.583	1.6	10.00	20.14	2229	78.54	101.4	10336	131.61	
360	01/08/2004	1	3.500	3.571	2.0	10.00	20.07	2220	78.54	95.6	9745	124.08	123.45
		2	3.550	3.621	2.0	10.05	19.98	2240	79.33	97.8	9969	125.67	
		3	3.554	3.608	1.5	10.01	20.18	2238	78.70	93.1	9490	120.59	

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G1P10S   Date of Casting : 09 / 08 / 2003   W / B = 0.72   Slump = 8.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	08/10/2003	1	3.742	3.801	1.6	10.04	20.20	2340	79.17	277.9	28328	357.82	347.18
		2	3.742	3.812	1.9	10.00	20.20	2359	78.54	267.2	27238	346.80	
		3	3.667	3.743	2.1	10.00	20.10	2323	78.54	259.6	26463	336.93	
90	07/11/2003	1	3.699	3.762	1.7	10.00	20.00	2355	78.54	295.4	30112	383.40	380.44
		2	3.748	3.816	1.8	10.04	20.10	2355	79.17	293.2	29888	377.52	
		3	3.720	3.785	1.7	10.00	20.00	2368	78.54	293.1	29878	380.41	
180	05/02/2004	1	3.721	3.792	1.9	10.07	20.11	2323	79.64	315.1	32120	403.30	403.14
		2	3.726	3.795	1.9	10.02	20.23	2336	78.85	303.6	30948	392.47	
		3	3.727	3.795	1.8	10.00	20.10	2361	78.54	318.7	32487	413.64	
270	05/05/2004	1	3.684	3.750	1.8	10.00	20.19	2323	78.54	314.9	32100	408.71	413.21
		2	3.694	3.759	1.8	10.02	20.08	2333	78.85	321.0	32722	414.96	
		3	3.695	3.761	1.8	10.03	20.03	2335	79.01	322.4	32864	415.94	
360	03/08/2004	1	3.702	3.767	1.8	9.98	20.15	2349	78.23	310.5	31651	404.61	410.18
		2	3.709	3.763	1.5	9.97	20.04	2371	78.07	318.8	32497	416.26	
		3	3.760	3.816	1.5	9.99	20.22	2372	78.38	315.0	32110	409.66	

ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G1P20S   Date of Casting : 12 / 08 / 2003   W / B = 0.73   Slump = 7.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	11/10/2003	1	3.721	3.760	1.0	10.01	20.20	2341	78.70	251.4	25627	325.64	316.58
		2	3.724	3.771	1.3	10.03	20.10	2345	79.01	241.0	24567	310.93	
		3	3.727	3.768	1.1	10.00	20.10	2361	78.54	241.3	24597	313.18	
90	10/11/2003	1	3.741	3.790	1.3	10.01	20.20	2353	78.70	262.9	26799	340.54	341.43
		2	3.764	3.814	1.3	10.04	20.10	2365	79.17	263.3	26840	339.02	
		3	3.75	3.800	1.3	10.00	20.15	2370	78.54	265.6	27074	344.72	
180	08/02/2004	1	3.706	3.752	1.2	10.00	20.19	2337	78.54	288.9	29450	374.96	369.52
		2	3.778	3.826	1.3	10.05	20.34	2341	79.33	289.4	29501	371.88	
		3	3.779	3.830	1.3	10.00	20.15	2388	78.54	278.7	28410	361.72	
270	08/05/2004	1	3.701	3.755	1.5	10.02	20.22	2321	78.85	292.7	29837	378.38	377.12
		2	3.711	3.761	1.3	10.00	20.15	2345	78.54	291.0	29664	377.69	
		3	3.747	3.805	1.5	10.02	20.29	2342	78.85	290.3	29592	375.28	
360	06/08/2004	1	3.767	3.819	1.4	10.00	20.26	2367	78.54	275.5	28084	357.57	366.38
		2	3.793	3.845	1.4	10.00	20.24	2386	78.54	281.9	28736	365.88	
		3	3.798	3.861	1.7	10.03	20.26	2373	79.01	291.2	29684	375.69	

ตารางที่ ค.23 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G1P30S Date of Casting : 14 / 08 / 2003 W / B = 0.73 Slump = 7.0 cm

Age	Test	No.	Weight (kg)			Dimension (cm)		Density	Area	Load	Load	Stress	Average
(days)	Date		Initial	Test	Change (%)	Diameter	Height	(kg/m^3)	(cm^2)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
60	13/10/2003	1	3.731	3.785	1.4	10.04	20.10	2345	79.17	227.3	23170	292.67	288.43
		2	3.735	3.795	1.6	10.03	20.40	2317	79.01	223.4	22773	288.22	
		3	3.736	3.792	1.5	10.02	20.20	2345	78.85	220.0	22426	284.40	
90	12/11/2003	1	3.659	3.715	1.5	10.04	20.00	2311	79.17	236.1	24067	304.00	306.13
		2	3.678	3.730	1.4	10.06	20.10	2302	79.49	240.2	24485	308.05	
		3	3.666	3.720	1.5	10.05	20.00	2311	79.33	238.4	24302	306.35	
180	10/02/2004	1	3.651	3.713	1.7	10.03	19.94	2317	79.01	262.0	26707	338.02	330.16
		2	3.722	3.783	1.6	10.04	20.03	2347	79.17	250.6	25545	322.67	
		3	3.715	3.778	1.7	10.00	20.00	2365	78.54	254.1	25902	329.80	
270	10/05/2004	1	3.691	3.751	1.6	10.03	20.06	2329	79.01	254.5	25943	328.34	333.26
		2	3.715	3.780	1.7	10.00	20.17	2345	78.54	259.8	26483	337.19	
		3	3.715	3.773	1.6	10.04	20.05	2340	79.17	259.6	26463	334.26	
360	08/08/2004	1	3.717	3.778	1.6	9.98	20.12	2362	78.23	231.6	23609	301.80	315.37
		2	3.730	3.794	1.7	10.04	20.20	2332	79.17	248.6	25341	320.09	
		3	3.760	3.806	1.2	10.03	20.06	2372	79.01	251.3	25617	324.21	

ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G1P40S Date of Casting : 16 / 08 / 2003 W / B = 0.74 Slump = 7.0 cm

Age	Test	No.	Weight (kg)			Dimension (cm)		Density	Area	Load	Load	Stress	Average
(days)	Date		Initial	Test	Change (%)	Diameter	Height	(kg/m^3)	(cm^2)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
60	15/10/2003	1	3.703	3.745	1.1	10.08	20.00	2320	79.80	207.3	21131	264.80	268.62
		2	3.704	3.740	1.0	10.02	20.20	2325	78.85	192.6	19633	248.98	
		3	3.705	3.744	1.1	10.05	20.10	2324	79.33	227.3	23170	292.08	
90	14/11/2003	1	3.680	3.720	1.1	10.00	20.10	2331	78.54	214.5	21865	278.40	280.79
		2	3.681	3.718	1.0	10.02	20.00	2334	78.85	218.8	22304	282.85	
		3	3.685	3.722	1.0	10.00	20.00	2346	78.54	216.6	22080	281.13	
180	12/02/2004	1	3.643	3.684	1.1	10.03	19.97	2309	79.01	234.9	23945	303.06	301.89
		2	3.710	3.750	1.1	10.03	20.21	2323	79.01	234.5	23904	302.54	
		3	3.715	3.755	1.1	10.00	20.28	2332	78.54	231.2	23568	300.07	
270	12/05/2004	1	3.645	3.689	1.2	9.99	20.13	2310	78.38	237.7	24230	309.13	307.98
		2	3.666	3.710	1.2	10.00	19.95	2340	78.54	236.3	24088	306.69	
		3	3.669	3.722	1.4	10.00	20.06	2329	78.54	237.4	24200	308.12	
360	10/08/2004	1	3.677	3.721	1.2	9.99	19.91	2356	78.38	221.8	22610	288.45	289.11
		2	3.679	3.722	1.2	10.01	19.99	2339	78.70	218.7	22294	283.28	
		3	3.691	3.736	1.2	9.99	20.02	2352	78.38	227.3	23170	295.60	

ตารางที่ ค.25 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G2P10S Date of Casting : 19 / 08 / 2003 W / B = 0.68 Slump = 5.5 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	18/10/2003	1	3.728	3.780	1.4	10.00	20.10	2362	78.54	298.7	30449	387.68	383.07
		2	3.760	3.806	1.2	10.04	20.13	2359	79.17	294.3	30000	378.93	
		3	3.785	3.838	1.4	10.11	20.27	2326	80.28	301.3	30714	382.59	
90	17/11/2003	1	3.736	3.799	1.7	10.00	20.26	2348	78.54	314.5	32059	408.19	408.21
		2	3.776	3.829	1.4	10.06	20.01	2374	79.49	324.3	33058	415.90	
		3	3.755	3.815	1.6	10.00	20.10	2379	78.54	308.6	31458	400.53	
180	15/02/2004	1	3.739	3.803	1.7	10.02	19.97	2374	78.85	340.5	34709	440.17	440.16
		2	3.804	3.866	1.6	10.07	20.13	2373	79.64	356.8	36371	456.67	
		3	3.750	3.815	1.7	10.00	20.00	2387	78.54	326.4	33272	423.63	
270	15/05/2004	1	3.718	3.788	1.9	10.00	20.20	2344	78.54	342.1	34873	444.01	449.38
		2	3.719	3.773	1.5	10.05	20.05	2338	79.33	356.0	36290	457.47	
		3	3.740	3.798	1.6	10.03	20.10	2355	79.01	346.2	35291	446.65	
360	13/08/2004	1	3.744	3.817	1.9	10.00	20.12	2369	78.54	298.8	30459	387.81	431.45
		2	3.759	3.815	1.5	10.03	20.00	2379	79.01	335.3	34179	432.59	
		3	3.766	3.829	1.7	10.04	20.02	2376	79.17	334.2	34067	430.31	

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ค.26 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G2P20S   Date of Casting : 21 / 08 / 2003   W / B = 0.70   Slump = 6.0 cm

Age	Test	No.	Weight (kg)			Dimension (cm)		Density	Area	Load	Load	Stress	Average
(days)	Date		Initial	Test	Change (%)	Diameter	Height	(kg/m^3)	(cm^2)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
60	20/10/2003	1	3.758	3.800	1.1	10.03	20.20	2355	79.01	292.5	29817	377.37	376.61
		2	3.766	3.803	1.0	10.04	20.10	2367	79.17	301.1	30693	387.69	
		3	3.849	3.898	1.3	10.13	20.20	2364	80.60	288.4	29399	364.77	
90	19/11/2003	1	3.703	3.745	1.1	10.00	20.03	2354	78.54	301.6	30744	391.45	397.59
		2	3.734	3.777	1.2	10.03	20.14	2347	79.01	312.9	31896	403.69	
		3	3.740	3.783	1.1	10.03	20.10	2355	79.01	308.2	31417	397.62	
180	17/02/2004	1	3.727	3.777	1.3	10.02	20.12	2349	78.85	330.0	33639	426.60	429.21
		2	3.768	3.809	1.1	10.04	20.26	2349	79.17	335.1	34159	431.47	
		3	3.745	3.795	1.3	10.02	20.20	2351	78.85	332.3	33874	429.57	
270	17/05/2004	1	3.681	3.726	1.2	10.03	19.77	2356	79.01	335.2	34169	432.46	433.07
		2	3.713	3.777	1.7	10.05	20.12	2326	79.33	339.6	34618	436.39	
		3	3.732	3.773	1.1	10.02	20.10	2355	78.85	332.9	33935	430.35	
360	15/08/2004	1	3.737	3.786	1.3	9.98	19.99	2390	78.23	319.8	32599	416.73	413.98
		2	3.781	3.821	1.1	10.01	20.15	2384	78.70	314.5	32059	407.37	
		3	3.807	3.855	1.3	10.04	20.00	2404	79.17	324.5	33078	417.82	

ตารางที่ ค.27 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G2P30S Date of Casting : 23 / 08 / 2003 W / B = 0.71 Slump = 6.0 cm

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg) Initial	Weight (kg) Test	Weight (kg) Change (%)	Dimension (cm) Diameter	Dimension (cm) Height	Density (kg/m^3)	Area (cm^2)	Load (kN)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
60	22/10/2003	1	3.703	3.754	1.4	9.98	20.14	2350	78.23	287.8	29337	375.03	360.96
		2	3.707	3.759	1.4	10.02	19.96	2355	78.85	278.6	28400	360.15	
		3	3.771	3.814	1.1	10.08	20.10	2351	79.80	272.2	27747	347.70	
90	21/11/2003	1	3.707	3.761	1.5	10.02	20.25	2322	78.85	279.7	28512	361.57	380.18
		2	3.717	3.769	1.4	10.02	20.04	2352	78.85	308.8	31478	399.19	
		3	3.711	3.763	1.4	10.01	20.10	2346	78.70	293.2	29888	379.78	
180	19/02/2004	1	3.683	3.733	1.4	10.02	19.96	2340	78.85	309.2	31519	399.71	406.86
		2	3.718	3.772	1.5	10.01	20.13	2347	78.70	319.8	32599	414.24	
		3	3.705	3.755	1.3	10.00	20.00	2359	78.54	313.3	31937	406.63	
270	19/05/2004	1	3.691	3.737	1.2	10.04	19.89	2344	79.17	319.5	32569	411.38	412.68
		2	3.728	3.773	1.2	10.03	20.10	2347	79.01	315.2	32130	406.65	
		3	3.756	3.815	1.6	10.08	20.13	2338	79.80	328.8	33517	420.00	
360	17/08/2004	1	3.762	3.808	1.2	10.04	20.10	2364	79.17	304.8	31070	392.45	394.39
		2	3.786	3.832	1.2	10.04	20.19	2369	79.17	298.5	30428	384.34	
		3	3.787	3.836	1.3	10.00	20.27	2379	78.54	313.1	31916	406.37	

ตารางที่ ค.28 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40S เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Spacimen : G2P40S Date of Casting : 26 / 08 / 2003 W / B = 0.72 Slump = 6.0 cm

Age	Test	No.	Weight (kg)			Dimension (cm)		Density	Area	Load	Load	Stress	Average
(days)	Date		Initial	Test	Change (%)	Diameter	Height	(kg/m^3)	(cm^2)	(kN)	(kg)	(ksc)	(ksc)
60	25/10/2003	1	3.715	3.753	1.0	10.01	20.14	2344	78.70	244.6	24934	316.83	321.15
		2	3.716	3.744	0.8	10.03	20.06	2345	79.01	248.8	25362	320.99	
		3	3.766	3.791	0.7	10.03	20.30	2348	79.01	252.4	25729	325.63	
90	24/11/2003	1	3.742	3.750	0.2	10.00	20.25	2353	78.54	253.5	25841	329.02	339.21
		2	3.747	3.771	0.6	10.09	20.14	2327	79.96	273.8	27910	349.05	
		3	3.745	3.765	0.5	10.03	20.10	2358	79.01	263.2	26830	339.57	
180	22/02/2004	1	3.742	3.780	1.0	10.02	20.34	2333	78.85	281.9	28736	364.42	357.72
		2	3.754	3.788	0.9	10.06	20.21	2337	79.49	277.3	28267	355.63	
		3	3.755	3.789	0.9	10.03	20.20	2353	79.01	273.7	27900	353.11	
270	22/05/2004	1	3.628	3.668	1.1	9.98	19.93	2327	78.23	278.1	28349	362.39	366.46
		2	3.672	3.715	1.2	10.02	20.08	2319	78.85	286.1	29164	369.85	
		3	3.701	3.735	0.9	10.05	20.00	2333	79.33	285.7	29123	367.13	
360	20/08/2004	1	3.725	3.757	0.9	10.01	20.23	2340	78.70	265.4	27054	343.77	342.41
		2	3.725	3.752	0.7	10.02	20.09	2351	78.85	254.5	25943	329.00	
		3	3.744	3.770	0.7	10.02	20.07	2366	78.85	274.2	27951	354.46	

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งคอนกรีต

ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ง.1 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1

Spacimen : CT1	Date of Casting : 21 / 07 / 2003	G_1 = 9.8425 in
W / B = 0.70	Slump = 6.5 cm	G_2 = 9.8425 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6563	11.7119	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6565	11.7121	0.0002	0.0002	0.0025	0.0025	0.0025
14	11.6568	11.7124	0.0005	0.0005	0.0055	0.0050	0.0053
28	11.6570	11.7125	0.0007	0.0006	0.0071	0.0060	0.0066
42	11.6580	11.7132	0.0017	0.0013	0.0172	0.0131	0.0151
56	11.6582	11.7131	0.0019	0.0012	0.0192	0.0121	0.0156
70	11.6584	11.7136	0.0021	0.0017	0.0212	0.0171	0.0192
84	11.6587	11.7143	0.0024	0.0024	0.0242	0.0242	0.0242
98	11.6589	11.7142	0.0026	0.0023	0.0262	0.0232	0.0247
112	11.6593	11.7143	0.0030	0.0024	0.0303	0.0242	0.0272
126	11.6597	11.7145	0.0034	0.0026	0.0343	0.0262	0.0303
140	11.6597	11.7146	0.0034	0.0027	0.0343	0.0272	0.0308
154	11.6600	11.7144	0.0037	0.0025	0.0374	0.0252	0.0313
168	11.6600	11.7145	0.0037	0.0026	0.0374	0.0262	0.0318
182	11.6600	11.7148	0.0037	0.0029	0.0374	0.0292	0.0333
196	11.6600	11.7150	0.0037	0.0031	0.0374	0.0312	0.0343
210	11.6599	11.7151	0.0036	0.0032	0.0363	0.0322	0.0343
224	11.6601	11.7152	0.0038	0.0033	0.0384	0.0332	0.0358
238	11.6603	11.7155	0.0040	0.0036	0.0404	0.0363	0.0383
252	11.6605	11.7157	0.0042	0.0038	0.0424	0.0383	0.0403
266	11.6606	11.7157	0.0043	0.0038	0.0434	0.0383	0.0408
280	11.6607	11.7158	0.0044	0.0039	0.0444	0.0393	0.0418
294	11.6610	11.7160	0.0047	0.0041	0.0474	0.0413	0.0444
308	11.6611	11.7162	0.0048	0.0043	0.0485	0.0433	0.0459
322	11.6611	11.7162	0.0048	0.0043	0.0485	0.0433	0.0459
336	11.6612	11.7162	0.0049	0.0043	0.0495	0.0433	0.0464
350	11.6612	11.7162	0.0049	0.0043	0.0495	0.0433	0.0464
364	11.6613	11.7163	0.0050	0.0044	0.0505	0.0443	0.0474

ตารางที่ ง.2 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตควบคุม CT5

Spacimen : CT5	Date of Casting : 22 / 07 / 2003	G_1 = 9.9882 in
W / B = 0.70	Slump = 6.5 cm	G_2 = 9.9055 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6811	11.7384	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6811	11.7385	0.0001	0.0001	0.0007	0.0007	0.0007
14	11.6812	11.7385	0.0001	0.0001	0.0009	0.0009	0.0009
28	11.6812	11.7385	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
42	11.6814	11.7386	0.0003	0.0002	0.0030	0.0020	0.0025
56	11.6816	11.7387	0.0005	0.0003	0.0050	0.0030	0.0040
70	11.6818	11.7389	0.0007	0.0005	0.0070	0.0050	0.0060
84	11.6820	11.7391	0.0009	0.0007	0.0090	0.0071	0.0080
98	11.6821	11.7393	0.0010	0.0009	0.0100	0.0091	0.0095
112	11.6823	11.7395	0.0012	0.0011	0.0120	0.0111	0.0116
126	11.6824	11.7396	0.0013	0.0012	0.0130	0.0121	0.0126
140	11.6825	11.7397	0.0014	0.0013	0.0140	0.0131	0.0136
154	11.6826	11.7397	0.0015	0.0013	0.0150	0.0131	0.0141
168	11.6826	11.7397	0.0015	0.0013	0.0150	0.0131	0.0141
182	11.6829	11.7402	0.0018	0.0018	0.0180	0.0182	0.0181
196	11.6830	11.7403	0.0019	0.0019	0.0190	0.0192	0.0191
210	11.6830	11.7407	0.0019	0.0023	0.0190	0.0232	0.0211
224	11.6830	11.7408	0.0019	0.0024	0.0190	0.0242	0.0216
238	11.6834	11.7411	0.0023	0.0027	0.0230	0.0273	0.0251
252	11.6835	11.7413	0.0024	0.0029	0.0240	0.0293	0.0267
266	11.6836	11.7414	0.0025	0.0030	0.0250	0.0303	0.0277
280	11.6837	11.7415	0.0026	0.0031	0.0260	0.0313	0.0287
294	11.6841	11.7421	0.0030	0.0037	0.0300	0.0374	0.0337
308	11.6841	11.7421	0.0030	0.0037	0.0300	0.0374	0.0337
322	11.6843	11.7423	0.0032	0.0039	0.0320	0.0394	0.0357
336	11.6846	11.7425	0.0035	0.0041	0.0350	0.0414	0.0382
350	11.6846	11.7425	0.0035	0.0041	0.0350	0.0414	0.0382
364	11.6846	11.7425	0.0035	0.0041	0.0350	0.0414	0.0382

ตารางที่ ง.3 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP10

Spacimen : OP10	Date of Casting : 24 / 07 / 2003	G_1 = 9.9213 in
W / B = 0.72	Slump = 6.5 cm	G_2 = 9.9213 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6787	11.7428	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6789	11.7430	0.0002	0.0002	0.0020	0.0020	0.0020
14	11.6792	11.7432	0.0005	0.0004	0.0050	0.0040	0.0045
28	11.6794	11.7435	0.0007	0.0007	0.0071	0.0071	0.0071
42	11.6797	11.7438	0.0010	0.0010	0.0101	0.0101	0.0101
56	11.6800	11.7440	0.0013	0.0012	0.0131	0.0121	0.0126
70	11.6804	11.7443	0.0017	0.0015	0.0171	0.0151	0.0161
84	11.6805	11.7444	0.0018	0.0016	0.0181	0.0161	0.0171
98	11.6808	11.7447	0.0021	0.0019	0.0212	0.0192	0.0202
112	11.6810	11.7448	0.0023	0.0020	0.0232	0.0202	0.0217
126	11.6810	11.7449	0.0023	0.0021	0.0232	0.0212	0.0222
140	11.6812	11.7451	0.0025	0.0023	0.0252	0.0232	0.0242
154	11.6814	11.7454	0.0027	0.0026	0.0272	0.0262	0.0267
168	11.6817	11.7458	0.0030	0.0030	0.0302	0.0302	0.0302
182	11.6819	11.7460	0.0032	0.0032	0.0323	0.0323	0.0323
196	11.6823	11.7462	0.0036	0.0034	0.0363	0.0343	0.0353
210	11.6826	11.7464	0.0039	0.0036	0.0393	0.0363	0.0378
224	11.6827	11.7464	0.0040	0.0036	0.0403	0.0363	0.0383
238	11.6829	11.7466	0.0042	0.0038	0.0423	0.0383	0.0403
252	11.6829	11.7471	0.0042	0.0043	0.0423	0.0433	0.0428
266	11.6831	11.7473	0.0044	0.0045	0.0443	0.0454	0.0449
280	11.6832	11.7473	0.0045	0.0045	0.0454	0.0454	0.0454
294	11.6835	11.7475	0.0048	0.0047	0.0484	0.0474	0.0479
308	11.6837	11.7475	0.0050	0.0047	0.0504	0.0474	0.0489
322	11.6838	11.7477	0.0051	0.0049	0.0514	0.0494	0.0504
336	11.6841	11.7480	0.0054	0.0052	0.0544	0.0524	0.0534
350	11.6843	11.7481	0.0056	0.0053	0.0564	0.0534	0.0549
364	11.6845	11.7481	0.0058	0.0053	0.0585	0.0534	0.0559

ตารางที่ ง.4 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP20

Spacimen : OP20	Date of Casting : 30 / 07 / 2003	G_1 = 9.9016 in
W / B = 0.77	Slump = 6.0 cm	G_2 = 9.9173 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.7035	11.7603	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7036	11.7604	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.7037	11.7605	0.0002	0.0002	0.0020	0.0020	0.0020
28	11.7040	11.7609	0.0005	0.0006	0.0050	0.0061	0.0055
42	11.7043	11.7612	0.0008	0.0009	0.0081	0.0091	0.0086
56	11.7047	11.7614	0.0012	0.0011	0.0121	0.0111	0.0116
70	11.7047	11.7615	0.0012	0.0012	0.0121	0.0121	0.0121
84	11.7050	11.7617	0.0015	0.0014	0.0151	0.0141	0.0146
98	11.7052	11.7621	0.0017	0.0018	0.0172	0.0182	0.0177
112	11.7053	11.7624	0.0018	0.0021	0.0182	0.0212	0.0197
126	11.7053	11.7626	0.0018	0.0023	0.0182	0.0232	0.0207
140	11.7055	11.7629	0.0020	0.0026	0.0202	0.0262	0.0232
154	11.7057	11.7632	0.0022	0.0029	0.0222	0.0292	0.0257
168	11.7058	11.7634	0.0023	0.0031	0.0232	0.0313	0.0272
182	11.7060	11.7636	0.0025	0.0033	0.0252	0.0333	0.0293
196	11.7060	11.7637	0.0025	0.0034	0.0252	0.0343	0.0298
210	11.7062	11.7638	0.0027	0.0035	0.0273	0.0353	0.0313
224	11.7064	11.7640	0.0029	0.0037	0.0293	0.0373	0.0333
238	11.7068	11.7642	0.0033	0.0039	0.0333	0.0393	0.0363
252	11.7070	11.7643	0.0035	0.0040	0.0353	0.0403	0.0378
266	11.7071	11.7643	0.0036	0.0040	0.0364	0.0403	0.0383
280	11.7074	11.7644	0.0039	0.0041	0.0394	0.0413	0.0404
294	11.7076	11.7646	0.0041	0.0043	0.0414	0.0434	0.0424
308	11.7079	11.7648	0.0044	0.0045	0.0444	0.0454	0.0449
322	11.7080	11.7649	0.0045	0.0046	0.0454	0.0464	0.0459
336	11.7082	11.7652	0.0047	0.0049	0.0475	0.0494	0.0484
350	11.7083	11.7654	0.0048	0.0051	0.0485	0.0514	0.0500
364	11.7085	11.7655	0.0050	0.0052	0.0505	0.0524	0.0515

ตารางที่ ง.5 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP30

Spacimen : OP30	Date of Casting : 04 / 08 / 2003	G_1 = 9.8819 in
W / B = 0.87	Slump = 7.0 cm	G_2 = 9.9213 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6683	11.7584	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6685	11.7585	0.0002	0.0001	0.0020	0.0010	0.0015
14	11.6686	11.7587	0.0003	0.0003	0.0030	0.0030	0.0030
28	11.6688	11.7588	0.0005	0.0004	0.0051	0.0040	0.0045
42	11.6688	11.7591	0.0005	0.0007	0.0051	0.0071	0.0061
56	11.6691	11.7594	0.0008	0.0010	0.0081	0.0101	0.0091
70	11.6692	11.7595	0.0009	0.0011	0.0091	0.0111	0.0101
84	11.6693	11.7599	0.0010	0.0015	0.0101	0.0151	0.0126
98	11.6696	11.7599	0.0013	0.0015	0.0132	0.0151	0.0141
112	11.6698	11.7601	0.0015	0.0017	0.0152	0.0171	0.0162
126	11.6700	11.7604	0.0017	0.0020	0.0172	0.0202	0.0187
140	11.6702	11.7606	0.0019	0.0022	0.0192	0.0222	0.0207
154	11.6702	11.7608	0.0019	0.0024	0.0192	0.0242	0.0217
168	11.6705	11.7610	0.0022	0.0026	0.0223	0.0262	0.0242
182	11.6707	11.7611	0.0024	0.0027	0.0243	0.0272	0.0258
196	11.6707	11.7612	0.0024	0.0028	0.0243	0.0282	0.0263
210	11.6711	11.7615	0.0028	0.0031	0.0283	0.0312	0.0298
224	11.6714	11.7617	0.0031	0.0033	0.0314	0.0333	0.0323
238	11.6715	11.7619	0.0032	0.0035	0.0324	0.0353	0.0338
252	11.6717	11.7619	0.0034	0.0035	0.0344	0.0353	0.0348
266	11.6718	11.7621	0.0035	0.0037	0.0354	0.0373	0.0364
280	11.6722	11.7623	0.0039	0.0039	0.0395	0.0393	0.0394
294	11.6724	11.7624	0.0041	0.0040	0.0415	0.0403	0.0409
308	11.6725	11.7625	0.0042	0.0041	0.0425	0.0413	0.0419
322	11.6725	11.7625	0.0042	0.0041	0.0425	0.0413	0.0419
336	11.6726	11.7626	0.0043	0.0042	0.0435	0.0423	0.0429
350	11.6728	11.7628	0.0045	0.0044	0.0455	0.0443	0.0449
364	11.6729	11.7629	0.0046	0.0045	0.0465	0.0454	0.0460

ตารางที่ ง.6 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต OP40

Spacimen : OP40	Date of Casting : 07 / 08 / 2003	G_1	=	9.9213	in
W / B = 0.95	Slump = 8.0 cm	G_2	=	9.9213	in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.7053	11.7619	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7056	11.7625	0.0003	0.0006	0.0030	0.0060	0.0045
14	11.7061	11.7631	0.0008	0.0012	0.0081	0.0121	0.0101
28	11.7062	11.7635	0.0009	0.0016	0.0091	0.0161	0.0126
42	11.7064	11.7638	0.0011	0.0019	0.0111	0.0192	0.0151
56	11.7067	11.7643	0.0014	0.0024	0.0141	0.0242	0.0192
70	11.7070	11.7643	0.0017	0.0024	0.0171	0.0242	0.0207
84	11.7074	11.7646	0.0021	0.0027	0.0212	0.0272	0.0242
98	11.7077	11.7647	0.0024	0.0028	0.0242	0.0282	0.0262
112	11.7081	11.7650	0.0028	0.0031	0.0282	0.0312	0.0297
126	11.7082	11.7652	0.0029	0.0033	0.0292	0.0333	0.0312
140	11.7084	11.7654	0.0031	0.0035	0.0312	0.0353	0.0333
154	11.7087	11.7654	0.0034	0.0035	0.0343	0.0353	0.0348
168	11.7089	11.7658	0.0036	0.0039	0.0363	0.0393	0.0378
182	11.7090	11.7660	0.0037	0.0041	0.0373	0.0413	0.0393
196	11.7092	11.7661	0.0039	0.0042	0.0393	0.0423	0.0408
210	11.7095	11.7663	0.0042	0.0044	0.0423	0.0443	0.0433
224	11.7096	11.7663	0.0043	0.0044	0.0433	0.0443	0.0438
238	11.7099	11.7666	0.0046	0.0047	0.0464	0.0474	0.0469
252	11.7101	11.7669	0.0048	0.0050	0.0484	0.0504	0.0494
266	11.7103	11.7671	0.0050	0.0052	0.0504	0.0524	0.0514
280	11.7103	11.7673	0.0050	0.0054	0.0504	0.0544	0.0524
294	11.7106	11.7676	0.0053	0.0057	0.0534	0.0575	0.0554
308	11.7108	11.7679	0.0055	0.0060	0.0554	0.0605	0.0580
322	11.7109	11.7681	0.0056	0.0062	0.0564	0.0625	0.0595
336	11.7112	11.7684	0.0059	0.0065	0.0595	0.0655	0.0625
350	11.7114	11.7685	0.0061	0.0066	0.0615	0.0665	0.0640
364	11.7115	11.7685	0.0062	0.0066	0.0625	0.0665	0.0645

ตารางที่ ง.7 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P10

Spacimen : G1P10	Date of Casting : 09 / 08 / 2003	G_1 = 9.9173 in
W / B = 0.72	Slump = 8.0 cm	G_2 = 9.9213 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6823	11.7424	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6825	11.7425	0.0002	0.0001	0.0020	0.0010	0.0015
14	11.6827	11.7427	0.0004	0.0003	0.0040	0.0030	0.0035
28	11.6829	11.7430	0.0006	0.0006	0.0061	0.0060	0.0060
42	11.6832	11.7432	0.0009	0.0008	0.0091	0.0081	0.0086
56	11.6835	11.7434	0.0012	0.0010	0.0121	0.0101	0.0111
70	11.6837	11.7437	0.0014	0.0013	0.0141	0.0131	0.0136
84	11.6839	11.7439	0.0016	0.0015	0.0161	0.0151	0.0156
98	11.6839	11.7440	0.0016	0.0016	0.0161	0.0161	0.0161
112	11.6841	11.7443	0.0018	0.0019	0.0182	0.0192	0.0187
126	11.6844	11.7445	0.0021	0.0021	0.0212	0.0212	0.0212
140	11.6847	11.7447	0.0024	0.0023	0.0242	0.0232	0.0237
154	11.6849	11.7448	0.0026	0.0024	0.0262	0.0242	0.0252
168	11.6852	11.7452	0.0029	0.0028	0.0292	0.0282	0.0287
182	11.6854	11.7454	0.0031	0.0030	0.0313	0.0302	0.0307
196	11.6855	11.7456	0.0032	0.0032	0.0323	0.0323	0.0323
210	11.6857	11.7459	0.0034	0.0035	0.0343	0.0353	0.0348
224	11.6857	11.7460	0.0034	0.0036	0.0343	0.0363	0.0353
238	11.6859	11.7462	0.0036	0.0038	0.0363	0.0383	0.0373
252	11.6860	11.7463	0.0037	0.0039	0.0373	0.0393	0.0383
266	11.6863	11.7465	0.0040	0.0041	0.0403	0.0413	0.0408
280	11.6865	11.7466	0.0042	0.0042	0.0424	0.0423	0.0423
294	11.6867	11.7468	0.0044	0.0044	0.0444	0.0443	0.0444
308	11.6868	11.7468	0.0045	0.0044	0.0454	0.0443	0.0449
322	11.6871	11.7470	0.0048	0.0046	0.0484	0.0464	0.0474
336	11.6873	11.7473	0.0050	0.0049	0.0504	0.0494	0.0499
350	11.6874	11.7474	0.0051	0.0050	0.0514	0.0504	0.0509
364	11.6876	11.7476	0.0053	0.0052	0.0534	0.0524	0.0529

ตารางที่ ง.8 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P20

Spacimen : G1P20	Date of Casting : 12 / 08 / 2003	G_1 = 9.8937 in
W / B = 0.73	Slump = 7.5 cm	G_2 = 9.9213 in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.6757	11.7323	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6758	11.7324	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.6760	11.7326	0.0003	0.0003	0.0030	0.0030	0.0030
28	11.6762	11.7328	0.0005	0.0005	0.0051	0.0050	0.0050
42	11.6764	11.7331	0.0007	0.0008	0.0071	0.0081	0.0076
56	11.6767	11.7333	0.0010	0.0010	0.0101	0.0101	0.0101
70	11.6769	11.7335	0.0012	0.0012	0.0121	0.0121	0.0121
84	11.6772	11.7337	0.0015	0.0014	0.0152	0.0141	0.0146
98	11.6774	11.7339	0.0017	0.0016	0.0172	0.0161	0.0167
112	11.6776	11.7341	0.0019	0.0018	0.0192	0.0181	0.0187
126	11.6776	11.7343	0.0019	0.0020	0.0192	0.0202	0.0197
140	11.6778	11.7345	0.0021	0.0022	0.0212	0.0222	0.0217
154	11.6780	11.7348	0.0023	0.0025	0.0232	0.0252	0.0242
168	11.6780	11.7349	0.0023	0.0026	0.0232	0.0262	0.0247
182	11.6782	11.7352	0.0025	0.0029	0.0253	0.0292	0.0272
196	11.6782	11.7353	0.0025	0.0030	0.0253	0.0302	0.0278
210	11.6784	11.7355	0.0027	0.0032	0.0273	0.0323	0.0298
224	11.6787	11.7357	0.0030	0.0034	0.0303	0.0343	0.0323
238	11.6790	11.7359	0.0033	0.0036	0.0334	0.0363	0.0348
252	11.6792	11.7359	0.0035	0.0036	0.0354	0.0363	0.0358
266	11.6793	11.7359	0.0036	0.0036	0.0364	0.0363	0.0363
280	11.6796	11.7361	0.0039	0.0038	0.0394	0.0383	0.0389
294	11.6799	11.7363	0.0042	0.0040	0.0425	0.0403	0.0414
308	11.6802	11.7365	0.0045	0.0042	0.0455	0.0423	0.0439
322	11.6802	11.7366	0.0045	0.0043	0.0455	0.0433	0.0444
336	11.6804	11.7366	0.0047	0.0043	0.0475	0.0433	0.0454
350	11.6806	11.7368	0.0049	0.0045	0.0495	0.0454	0.0474
364	11.6808	11.7368	0.0051	0.0045	0.0515	0.0454	0.0485

ตารางที่ ง.9 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P30

Spacimen : G1P30	Date of Casting : 14 / 08 / 2003	G_1 = 9.8819 in
W / B = 0.73	Slump = 7.0 cm	G_2 = 9.9213 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.6697	11.7688	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.6698	11.7689	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.6700	11.7691	0.0003	0.0003	0.0030	0.0030	0.0030
28	11.6702	11.7692	0.0005	0.0004	0.0051	0.0040	0.0045
42	11.6704	11.7694	0.0007	0.0006	0.0071	0.0060	0.0066
56	11.6705	11.7696	0.0008	0.0008	0.0081	0.0081	0.0081
70	11.6707	11.7697	0.0010	0.0009	0.0101	0.0091	0.0096
84	11.6709	11.7700	0.0012	0.0012	0.0121	0.0121	0.0121
98	11.6712	11.7702	0.0015	0.0014	0.0152	0.0141	0.0146
112	11.6713	11.7703	0.0016	0.0015	0.0162	0.0151	0.0157
126	11.6715	11.7706	0.0018	0.0018	0.0182	0.0181	0.0182
140	11.6716	11.7708	0.0019	0.0020	0.0192	0.0202	0.0197
154	11.6716	11.7710	0.0019	0.0022	0.0192	0.0222	0.0207
168	11.6718	11.7712	0.0021	0.0024	0.0213	0.0242	0.0227
182	11.6720	11.7714	0.0023	0.0026	0.0233	0.0262	0.0247
196	11.6721	11.7715	0.0024	0.0027	0.0243	0.0272	0.0258
210	11.6724	11.7718	0.0027	0.0030	0.0273	0.0302	0.0288
224	11.6727	11.7720	0.0030	0.0032	0.0304	0.0323	0.0313
238	11.6729	11.7722	0.0032	0.0034	0.0324	0.0343	0.0333
252	11.6731	11.7723	0.0034	0.0035	0.0344	0.0353	0.0348
266	11.6732	11.7724	0.0035	0.0036	0.0354	0.0363	0.0359
280	11.6734	11.7726	0.0037	0.0038	0.0374	0.0383	0.0379
294	11.6736	11.7727	0.0039	0.0039	0.0395	0.0393	0.0394
308	11.6737	11.7728	0.0040	0.0040	0.0405	0.0403	0.0404
322	11.6737	11.7728	0.0040	0.0040	0.0405	0.0403	0.0404
336	11.6740	11.7730	0.0043	0.0042	0.0435	0.0423	0.0429
350	11.6742	11.7731	0.0045	0.0043	0.0455	0.0433	0.0444
364	11.6743	11.7732	0.0046	0.0044	0.0465	0.0443	0.0454

ตารางที่ ง.10 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G1P40

Spacimen : G1P40	Date of Casting : 16 / 08 / 2003	G_1 = 9.8819 in
W / B = 0.74	Slump = 7.0 cm	G_2 = 9.9016 in

Age (days)	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average (%)
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1 (L_i)	11.7822	11.7162	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7824	11.7164	0.0002	0.0002	0.0020	0.0020	0.0020
14	11.7826	11.7165	0.0004	0.0003	0.0040	0.0030	0.0035
28	11.7827	11.7167	0.0005	0.0005	0.0051	0.0050	0.0051
42	11.7830	11.7169	0.0008	0.0007	0.0081	0.0071	0.0076
56	11.7833	11.7171	0.0011	0.0009	0.0111	0.0091	0.0101
70	11.7835	11.7171	0.0013	0.0009	0.0132	0.0091	0.0111
84	11.7837	11.7174	0.0015	0.0012	0.0152	0.0121	0.0136
98	11.7837	11.7175	0.0015	0.0013	0.0152	0.0131	0.0142
112	11.7839	11.7177	0.0017	0.0015	0.0172	0.0151	0.0162
126	11.7839	11.7178	0.0017	0.0016	0.0172	0.0162	0.0167
140	11.7841	11.7180	0.0019	0.0018	0.0192	0.0182	0.0187
154	11.7842	11.7180	0.0020	0.0018	0.0202	0.0182	0.0192
168	11.7844	11.7183	0.0022	0.0021	0.0223	0.0212	0.0217
182	11.7846	11.7186	0.0024	0.0024	0.0243	0.0242	0.0243
196	11.7848	11.7187	0.0026	0.0025	0.0263	0.0252	0.0258
210	11.7849	11.7187	0.0027	0.0025	0.0273	0.0252	0.0263
224	11.7850	11.7188	0.0028	0.0026	0.0283	0.0263	0.0273
238	11.7852	11.7191	0.0030	0.0029	0.0304	0.0293	0.0298
252	11.7854	11.7193	0.0032	0.0031	0.0324	0.0313	0.0318
266	11.7855	11.7194	0.0033	0.0032	0.0334	0.0323	0.0329
280	11.7855	11.7196	0.0033	0.0034	0.0334	0.0343	0.0339
294	11.7856	11.7198	0.0034	0.0036	0.0344	0.0364	0.0354
308	11.7858	11.7199	0.0036	0.0037	0.0364	0.0374	0.0369
322	11.7861	11.7201	0.0039	0.0039	0.0395	0.0394	0.0394
336	11.7863	11.7202	0.0041	0.0040	0.0415	0.0404	0.0409
350	11.7864	11.7202	0.0042	0.0040	0.0425	0.0404	0.0414
364	11.7865	11.7203	0.0043	0.0041	0.0435	0.0414	0.0425

ตารางที่ ง.11 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P10

Spacimen : G2P10	Date of Casting : 19 / 08 / 2003	G_1 =	9.9055	in
W / B = 0.68	Slump = 5.5 cm	G_2 =	9.9213	in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.7236	11.7630	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7237	11.7631	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.7239	11.7632	0.0003	0.0002	0.0030	0.0020	0.0025
28	11.7241	11.7634	0.0005	0.0004	0.0050	0.0040	0.0045
42	11.7243	11.7636	0.0007	0.0006	0.0071	0.0060	0.0066
56	11.7244	11.7638	0.0008	0.0008	0.0081	0.0081	0.0081
70	11.7246	11.7641	0.0010	0.0011	0.0101	0.0111	0.0106
84	11.7248	11.7643	0.0012	0.0013	0.0121	0.0131	0.0126
98	11.7249	11.7645	0.0013	0.0015	0.0131	0.0151	0.0141
112	11.7252	11.7648	0.0016	0.0018	0.0162	0.0181	0.0171
126	11.7254	11.7650	0.0018	0.0020	0.0182	0.0202	0.0192
140	11.7255	11.7651	0.0019	0.0021	0.0192	0.0212	0.0202
154	11.7258	11.7653	0.0022	0.0023	0.0222	0.0232	0.0227
168	11.7261	11.7656	0.0025	0.0026	0.0252	0.0262	0.0257
182	11.7263	11.7658	0.0027	0.0028	0.0273	0.0282	0.0277
196	11.7263	11.7659	0.0027	0.0029	0.0273	0.0292	0.0282
210	11.7263	11.7660	0.0027	0.0030	0.0273	0.0302	0.0287
224	11.7266	11.7662	0.0030	0.0032	0.0303	0.0323	0.0313
238	11.7267	11.7663	0.0031	0.0033	0.0313	0.0333	0.0323
252	11.7270	11.7665	0.0034	0.0035	0.0343	0.0353	0.0348
266	11.7272	11.7667	0.0036	0.0037	0.0363	0.0373	0.0368
280	11.7273	11.7667	0.0037	0.0037	0.0374	0.0373	0.0373
294	11.7275	11.7669	0.0039	0.0039	0.0394	0.0393	0.0393
308	11.7276	11.7670	0.0040	0.0040	0.0404	0.0403	0.0403
322	11.7279	11.7672	0.0043	0.0042	0.0434	0.0423	0.0429
336	11.7281	11.7673	0.0045	0.0043	0.0454	0.0433	0.0444
350	11.7282	11.7673	0.0046	0.0043	0.0464	0.0433	0.0449
364	11.7283	11.7675	0.0047	0.0045	0.0474	0.0454	0.0464

ตารางที่ ง.12 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P20

Spacimen : G2P20	Date of Casting : 21 / 08 / 2003	G_1 = 9.9213	in
W / B = 0.70	Slump = 6.0 cm	G_2 = 9.8701	in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.7537	11.6847	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7538	11.6848	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.7539	11.6848	0.0002	0.0001	0.0020	0.0010	0.0015
28	11.7541	11.6850	0.0004	0.0003	0.0040	0.0030	0.0035
42	11.7544	11.6853	0.0007	0.0006	0.0071	0.0061	0.0066
56	11.7546	11.6854	0.0009	0.0007	0.0091	0.0071	0.0081
70	11.7549	11.6857	0.0012	0.0010	0.0121	0.0101	0.0111
84	11.7551	11.6858	0.0014	0.0011	0.0141	0.0111	0.0126
98	11.7553	11.6859	0.0016	0.0012	0.0161	0.0122	0.0141
112	11.7555	11.6861	0.0018	0.0014	0.0181	0.0142	0.0162
126	11.7556	11.6862	0.0019	0.0015	0.0192	0.0152	0.0172
140	11.7557	11.6864	0.0020	0.0017	0.0202	0.0172	0.0187
154	11.7559	11.6866	0.0022	0.0019	0.0222	0.0193	0.0207
168	11.7559	11.6867	0.0022	0.0020	0.0222	0.0203	0.0212
182	11.7561	11.6870	0.0024	0.0023	0.0242	0.0233	0.0237
196	11.7561	11.6871	0.0024	0.0024	0.0242	0.0243	0.0243
210	11.7562	11.6873	0.0025	0.0026	0.0252	0.0263	0.0258
224	11.7564	11.6875	0.0027	0.0028	0.0272	0.0284	0.0278
238	11.7565	11.6877	0.0028	0.0030	0.0282	0.0304	0.0293
252	11.7568	11.6880	0.0031	0.0033	0.0312	0.0334	0.0323
266	11.7569	11.6881	0.0032	0.0034	0.0323	0.0344	0.0334
280	11.7571	11.6882	0.0034	0.0035	0.0343	0.0355	0.0349
294	11.7573	11.6883	0.0036	0.0036	0.0363	0.0365	0.0364
308	11.7574	11.6884	0.0037	0.0037	0.0373	0.0375	0.0374
322	11.7576	11.6886	0.0039	0.0039	0.0393	0.0395	0.0394
336	11.7577	11.6887	0.0040	0.0040	0.0403	0.0405	0.0404
350	11.7579	11.6889	0.0042	0.0042	0.0423	0.0426	0.0424
364	11.7579	11.6890	0.0042	0.0043	0.0423	0.0436	0.0429

ตารางที่ ง.13 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P30

Spacimen : G2P30	Date of Casting : 23 / 08 / 2003	G_1 = 9.8976 in
W / B = 0.71	Slump = 6.0 cm	G_2 = 9.9213 in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.8512	11.6741	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.8513	11.6742	0.0001	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010
14	11.8514	11.6743	0.0002	0.0002	0.0020	0.0020	0.0020
28	11.8516	11.6744	0.0004	0.0003	0.0040	0.0030	0.0035
42	11.8517	11.6746	0.0005	0.0005	0.0051	0.0050	0.0050
56	11.8519	11.6748	0.0007	0.0007	0.0071	0.0071	0.0071
70	11.8521	11.6750	0.0009	0.0009	0.0091	0.0091	0.0091
84	11.8521	11.6751	0.0009	0.0010	0.0091	0.0101	0.0096
98	11.8523	11.6754	0.0011	0.0013	0.0111	0.0131	0.0121
112	11.8525	11.6755	0.0013	0.0014	0.0131	0.0141	0.0136
126	11.8527	11.6757	0.0015	0.0016	0.0152	0.0161	0.0156
140	11.8528	11.6759	0.0016	0.0018	0.0162	0.0181	0.0172
154	11.8528	11.6760	0.0016	0.0019	0.0162	0.0192	0.0177
168	11.8530	11.6763	0.0018	0.0022	0.0182	0.0222	0.0202
182	11.8531	11.6765	0.0019	0.0024	0.0192	0.0242	0.0217
196	11.8532	11.6766	0.0020	0.0025	0.0202	0.0252	0.0227
210	11.8534	11.6768	0.0022	0.0027	0.0222	0.0272	0.0247
224	11.8535	11.6770	0.0023	0.0029	0.0232	0.0292	0.0262
238	11.8535	11.6770	0.0023	0.0029	0.0232	0.0292	0.0262
252	11.8538	11.6772	0.0026	0.0031	0.0263	0.0312	0.0288
266	11.8540	11.6773	0.0028	0.0032	0.0283	0.0323	0.0303
280	11.8541	11.6775	0.0029	0.0034	0.0293	0.0343	0.0318
294	11.8543	11.6778	0.0031	0.0037	0.0313	0.0373	0.0343
308	11.8545	11.6779	0.0033	0.0038	0.0333	0.0383	0.0358
322	11.8546	11.6779	0.0034	0.0038	0.0344	0.0383	0.0363
336	11.8547	11.6780	0.0035	0.0039	0.0354	0.0393	0.0373
350	11.8549	11.6781	0.0037	0.0040	0.0374	0.0403	0.0389
364	11.8550	11.6782	0.0038	0.0041	0.0384	0.0413	0.0399

ตารางที่ ง.14 การขยายตัวของแท่งคอนกรีต G2P40

Spacimen : G2P40	Date of Casting : 26 / 08 / 2003	G_1 = 9.8976	in
W / B = 0.72	Slump = 6.0 cm	G_2 = 9.9213	in

Age	L_x (in)		Diff. Length (in)		Expansion (%)		Average
(days)	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	(%)
1 (L_i)	11.7242	11.7631	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	11.7243	11.7633	0.0001	0.0002	0.0010	0.0020	0.0015
14	11.7245	11.7634	0.0003	0.0003	0.0030	0.0030	0.0030
28	11.7246	11.7635	0.0004	0.0004	0.0040	0.0040	0.0040
42	11.7247	11.7637	0.0005	0.0006	0.0051	0.0060	0.0055
56	11.7249	11.7638	0.0007	0.0007	0.0071	0.0071	0.0071
70	11.7251	11.7640	0.0009	0.0009	0.0091	0.0091	0.0091
84	11.7253	11.7642	0.0011	0.0011	0.0111	0.0111	0.0111
98	11.7255	11.7642	0.0013	0.0011	0.0131	0.0111	0.0121
112	11.7257	11.7643	0.0015	0.0012	0.0152	0.0121	0.0136
126	11.7259	11.7644	0.0017	0.0013	0.0172	0.0131	0.0151
140	11.7260	11.7646	0.0018	0.0015	0.0182	0.0151	0.0167
154	11.7261	11.7646	0.0019	0.0015	0.0192	0.0151	0.0172
168	11.7263	11.7647	0.0021	0.0016	0.0212	0.0161	0.0187
182	11.7264	11.7649	0.0022	0.0018	0.0222	0.0181	0.0202
196	11.7266	11.7650	0.0024	0.0019	0.0242	0.0192	0.0217
210	11.7268	11.7652	0.0026	0.0021	0.0263	0.0212	0.0237
224	11.7269	11.7652	0.0027	0.0021	0.0273	0.0212	0.0242
238	11.7271	11.7655	0.0029	0.0024	0.0293	0.0242	0.0267
252	11.7272	11.7656	0.0030	0.0025	0.0303	0.0252	0.0278
266	11.7274	11.7658	0.0032	0.0027	0.0323	0.0272	0.0298
280	11.7274	11.7659	0.0032	0.0028	0.0323	0.0282	0.0303
294	11.7275	11.7660	0.0033	0.0029	0.0333	0.0292	0.0313
308	11.7276	11.7662	0.0034	0.0031	0.0344	0.0312	0.0328
322	11.7277	11.7662	0.0035	0.0031	0.0354	0.0312	0.0333
336	11.7279	11.7663	0.0037	0.0032	0.0374	0.0323	0.0348
350	11.7280	11.7664	0.0038	0.0033	0.0384	0.0333	0.0358
364	11.7281	11.7664	0.0039	0.0033	0.0394	0.0333	0.0363

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล นายธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง

วัน เดือน ปีเกิด 12 มิถุนายน 2522

ประวัติการศึกษา

ระดับอาชีวศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2542

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2545

ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2547

ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว.) ประจำปี 2545

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, “การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต”, **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2**, 26-27 ตุลาคม 2547, โรงแรมเชียงใหม่พลาซ่า จ. เชียงใหม่, หน้า 17-22.

ณัฐพงศ์ มกระธัช, ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง และรัฐพล สมนา, 2547, “ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินและวัสดุปอซโซลานในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ”, **เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2**, 28 เมษายน 2547, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 83-107.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์

วันที่ 22 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547

ข้าพเจ้า (นาย/~~นาง/นางสาว~~) ธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง รหัสประจำตัว 45400307
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☑ โท ○ เอก
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
อยู่บ้านเลขที่ 118/23 ตรอก/ซอย 2 ถนน สุขเสมอ
ตำบล/แขวง ท่าตะเภา อำเภอ/เขต เมือง จังหวัด ชุมพร
รหัสไปรษณีย์ 86000 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณะชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ .... ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายธิรสิทธิ์ แซ่ติ้ง)

ลงชื่อ .... ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ .... พยาน
(รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

ลงชื่อ .... พยาน
(ผศ.ดร.ธวัชชัย เหล่าศิริหงษ์ทอง)