

ผลกระทบของเจ้าเกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดและ
การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

นายสรภพ ก้านบัวแก้ว วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2552

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(รศ.เอนก สิริพานิชกร)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....
(ผศ.ดร.สมิตร ส่องพิริยะกิจ)

กรรมการ

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำล้างอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายสรภพ ก้านบัวแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่อกำล้างอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ามาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15-20 (ความละเอียดปานกลาง) และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ความละเอียดมาก) รวมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดจึงมีความละเอียดอย่างละ 3 ขนาด จากนั้นนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อหล่อคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 90 และ 360 วันและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 และ 360 วัน

ผลการวิจัยพบว่าที่อายุ 90 วันคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและไม่สามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อปรับปรุงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ความละเอียดปานกลางในอัตราร้อยละ 10 และความละเอียดมากในอัตราร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 และ 360 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่า

คอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หรือเถ้าปาล์ม น้ำมันเพิ่มขึ้นพบว่าการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตมีแนวโน้มลดต่ำลง และท้ายสุดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังอัดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านคุณสมบัติของเถ้า ความละเอียด และการแทนที่ปูนซีเมนต์อีกด้วย

คำสำคัญ : การแทรกซึมคลอไรด์ / กำลังอัด / เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ / เถ้าปาล์มน้ำมัน

Thesis Title	Effect of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash on Compressive Strength and Chloride Penetration of Concrete
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Sorrapop Kanbourkaew
Thesis Advisors	Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2552

Abstract

The objectives of this research are to study the effects of rice husk-bark ash (RHBA) and palm oil fuel ash (POFA) on compressive strength and chloride penetration of concrete. Rice husk-bark ash and palm oil fuel ash, by-products from biomass power plants, were ground until the particles retained on a sieve No. 325 of 15-20 % (medium fineness) and less than 5% (high fineness) by weight. Three different finenesses of RBHA and POFA (including RBHA and POFA as directly received from the power plants) were used to replace Portland cement type I at 10, 20, 30 and 40% by weight of binder to cast concrete. Compressive strengths of concretes were determined at the ages of 7, 28, 90 and 360 days while chloride penetration of concretes were determined at the ages of 90 and 360 days.

The results revealed that at the age of 90 days, the unground rice husk-bark ash and palm oil fuel ash were not suitable for using as a cement replacement in concrete because the concrete produced low compressive strength and high chloride penetration as compared to use of the control concrete. Additionally, with 10% and 40% replacement of Portland cement type I by medium fineness and high fineness of rice husk-bark ash, respectively, the compressive strengths of concretes were as high as that of the control concrete and the values of chloride penetration were lower than that of the control concrete at 90 and 360 days. When high fineness of palm oil fuel ash was used to replace Portland cement at 30 % by weight of binder, it produced higher compressive strength and lower chloride penetration of concrete as compared to the control concrete at 90 and 360 days. In addition, concrete containing RHBA or POFA with higher replacement of Portland cement tended to have lower chloride penetration than the one with lower replacement of Portland cement. Finally, it was found that the

chloride penetration of concrete depended not only on the compressive strength of concrete but also depends on properties of ash, fineness, and replacement of Portland cement.

Keywords : Chloride Penetration / Compressive Strength / Rice Husk-Bark Ash / Palm Oil Fuel Ash

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณบริษัท ไทยเพาเวอร์ซัพพลาย จำกัด และบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนตัวอย่างเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณกรรมการสอบทุกท่าน ซึ่งได้แก่ รศ. เอนก ศิริพานิชกร และ ผศ.ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ ที่สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร ที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในด้านวิชาการและการปฏิบัติตั้งแต่เริ่มวางแผนงานวิจัย ขอขอบคุณ นายณัฐพงศ์ มกระธัช ที่ให้คำแนะนำในระหว่างการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ในห้องวิจัยคอนกรีตที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในช่วงระหว่างการทดสอบ และขอขอบคุณ พ่อ และแม่ ที่ให้กำลังใจและให้การศึกษามาตั้งแต่ระดับอนุบาลจนถึงระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามและหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้ดีและมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปริมาณจำนวนมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นผลพลอยได้ที่ไม่ก่อประโยชน์มาเป็นสิ่งที่มีประโยชน์และสร้างคุณค่าในงานคอนกรีตต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฌ
รายการรูปประกอบ	ฎ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ถ้ำเกลบ-เปลือกไม้และถ้ำปล้ำมน้ำมัน	4
2.2 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	4
2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาของถ้ำเกลบ-เปลือกไม้และถ้ำปล้ำมน้ำมัน	6
3. วิธีการทดสอบ	9
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	9
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	9
3.3 วิธีการทดสอบ	11
3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	16
4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	18
4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ	18
4.2 องค์ประกอบเคมี	24

4.3 ความต้องการน้ำของคอนกรีตสด	26
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต	28
4.5 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	41
4.6 การเปรียบเทียบเส้นแกลบ-เปลือกไม้และเส้นปาล์มน้ำมัน	49
5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	59
ก. ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	59
ข. ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต	82
ประวัติผู้วิจัย	87

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา	13
4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ	21
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	25
4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	29
4.4 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1	43
4.5 การเปรียบเทียบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 40 ที่อายุ 360 วัน	50
ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT1	60
ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT5	61
ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR10	62
ก.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR20	63
ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R10	64
ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R20	65
ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R30	66
ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R40	67
ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R10	68
ก.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R20	69
ก.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R30	70
ก.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R40	71
ก.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10	72
ก.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20	73
ก.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10	74
ก.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20	75
ก.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30	76
ก.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40	77

ก.19	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10	78
ก.20	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20	79
ก.21	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30	80
ก.22	ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40	81
ข.1	ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน ของตัวอย่าง CT,OR,G1R และG2R	83
ข.2	ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน ของตัวอย่าง CT,OP,G1P และG2P	84
ข.3	ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน ของตัวอย่าง CT,OR,G1R และG2R	85
ข.4	ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน ของตัวอย่าง CT,OP,G1P และG2P	86

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยอีพอกซี (Epoxy)	10
3.2 อ่างแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์	10
3.3 การตัดตัวอย่างคอนกรีต	14
3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่หล่ออีพอกซี (Epoxy)	15
3.5 ตัวอย่างที่นำมาแช่ในสารละลายคลอไรด์	15
3.6 ตัวอย่างที่ทำการผ่าซีกเพื่อฉีดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3)	16
4.1 รูปถ่ายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5	19
4.2 รูปถ่ายกำลังสูงของเส้นใยกลาส-เปลือกไม้	19
4.3 รูปถ่ายกำลังสูงของเส้นใยปาล์มน้ำมัน	20
4.4 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเส้นใยกลาส-เปลือกไม้	22
4.5 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเส้นใยปาล์มน้ำมัน	23
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ OR	32
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ G1R	33
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ G2R	33
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 วัน	34
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 90 วัน	34
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยกลาส-เปลือกไม้ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 360 วัน	35
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน OP	38
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน G1P	38
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน G2P	39
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 วัน	39

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเก้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 90 วัน	40
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเก้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 360 วัน	40
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเก้าเกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน	44
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเก้าเกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 360 วัน	45
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าเกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 ที่ อายุ 360 วัน	46
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเก้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน	48
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเก้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 360 วัน	48
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 20 ที่ อายุ 360 วัน	49
ข.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันของตัวอย่าง CT,OR,G1R และG2R	88
ข.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันของตัวอย่าง CT,OP,G1P และG2P	89
ข.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วันของตัวอย่าง CT,OR,G1R และG2R	90
ข.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วันของตัวอย่าง CT,OP,G1P และG2R	91

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร ทำให้มีวัสดุที่เกิดจากผลิตผลทางการเกษตรมากมาย ทั้งที่ใช้เป็นประโยชน์ทางการค้าและบางส่วนเป็นของเหลือใช้หรือใช้ไม่ได้ ทำให้เกิดปัญหาทางด้านมลภาวะและสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างมากมาย เช่น แกลบ, เปลือกไม้ และกากปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

แกลบเป็นของเหลือที่ได้มาจากการสีข้าว เปลือกไม้ได้มาจากไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ทำเชื้อกระดาษ ส่วนกากปาล์มน้ำมัน เป็นส่วนที่เหลือจากการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งในแต่ละวันมีปริมาณที่สูงแต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อยเป็นผลทำให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมา อย่างไรก็ตามได้มีการพยายามนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อให้เกิดประโยชน์ เช่น มีการนำแกลบ-เปลือกไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และยังมีการนำกากปาล์มน้ำมันมาเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถนำวัสดุเหลือใช้มาทำประโยชน์ได้และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม แต่ยังมีปัญหาที่เกิดจากแกลบ-เปลือกไม้ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะเป็นผงและน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการนำไปทิ้ง ดังนั้นหากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ก็จะลดปัญหาดังกล่าวได้อย่างมาก

แกลบ-เปลือกไม้และกากปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีแกลบ-เปลือกไม้จากกระบวนการผลิตถึง 100,000 ตันต่อปีและกากปาล์มน้ำมันมีปริมาณ 107,000 ตันต่อปี (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ปัจจุบันมีงานวิจัยและพัฒนาในด้านคุณสมบัติต่างๆของแกลบ-เปลือกไม้ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545; จตุพล ตั้งปกาทิต และคณะ, 2548; Makaratat และคณะ, 2004) และกากปาล์มน้ำมัน (Tangchirapat และคณะ, 2007; จักพล กลั่นมันคง และคณะ, 2543; Tay และคณะ, 1990; Hussin และ Awal, 1996; Jaturapitakkul และคณะ, 2007) อย่างต่อเนื่อง แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในเรื่องกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต ซึ่งพบว่าแกลบ-เปลือกไม้และกากปาล์มน้ำมันสามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุพอโซลานที่ดีได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่นำแกลบ-เปลือกไม้และกากปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตยังเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น จึงจำเป็นต้องมีงานวิจัยที่มากขึ้นเพื่อเป็นการยืนยันและพัฒนาคุณภาพของแกลบ-เปลือกไม้และกากปาล์มน้ำมันก่อนการนำไปใช้ในงานจริง

การศึกษาคูณสมบัติในด้านความทนทานของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันยังมีไม่มากและการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีตเพราะการใช้งานคอนกรีตในบางกรณีมีความเสี่ยงต่อสถานะที่มีสารละลายคลอไรด์ เช่นการใช้งานคอนกรีตในน้ำทะเล เมื่อสารละลายคลอไรด์ไม่สามารถแทรกซึมเข้าเนื้อคอนกรีตได้หรือแทรกซึมได้ช้าก็จะสร้างความเสียหายต่อคอนกรีตได้น้อย จึงกล่าวได้ว่าการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเป็นปัจจัยที่บ่งบอกความคงทนของคอนกรีต ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาคอนกรีตที่ผสมถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกันเป็นวัสดุปอชโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อศึกษากำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีทั้ง 2 ข้อนี้สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานสูงได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันที่ความละเอียด และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างกัน
2. ศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างกัน
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันเพื่อหาอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษานี้ได้นำถั่วแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของบริษัท ไทย เพาเวอร์ พัพหลาย จำกัด และถั่วปาล์มน้ำมันจากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) โดยแบ่งเป็น 3 ความละเอียดคือ ความละเอียดจากแหล่งผลิตโดยตรง, ความละเอียดปานกลางที่ผ่านการบดให้มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 และความละเอียดมากที่มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดและลักษณะรูปร่าง รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน

หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ไม่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 300 กก/ซม² ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทุกส่วนผสมให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. โดยการปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 90 และ 360 วันและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 และ 360 วัน

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงที่มาของงานวิจัยใน บทที่ 2 ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมันและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันตามมาตรฐานต่างๆ รวมถึงการทดสอบคุณภาพกำลังอัดของคอนกรีต และการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน คุณสมบัติของคอนกรีต กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและบทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปของผลการทดสอบและข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตต่อไป ส่วนภาคผนวกแสดงการคำนวณกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงที่มา ปัญหา และการนำไปใช้ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งทั้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และกล่าวถึงการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

2.1 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลบางแห่งได้มีการใช้เถ้าจากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาเป็นวัตถุดิบในการเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 800-900°C เมื่อเผาเสร็จจะมีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เหลือจากการเผาชั่งกองทิ้งไว้และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิและป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจายในบริเวณใกล้เคียง เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีปริมาณที่มากจึงเกิดปัญหาในการจัดเก็บและหาที่ทิ้ง

นอกจากแกลบและเปลือกไม้แล้วยังมีโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ ทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม มาเป็นวัตถุดิบในการเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน ซึ่งวัสดุเหล่านี้มาจากการผลิตน้ำมันปาล์ม เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น ได้มีการนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการดีให้เป็นเส้นใยจากนั้นจึงนำไปเผากับกะลาปาล์ม โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 700-1000°C เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นสิ่งที่เหลือจากการเผา ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาและฟุ้งกระจาย อีกทั้งยังมีปริมาณมาก ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน ความทนทานของคอนกรีตหมายถึง การทนทานต่อสภาพการกัดกร่อน ไม่ว่าจะเป็นทางเคมี ทางกล หรือทางกายภาพ การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตคือ การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตโดยมีน้ำเป็นตัวนำพา ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า และน้ำที่ซึมคลอไรด์ละลายอยู่จะซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีตไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต เป็นผลทำให้เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเป็นสนิมและเกิดการเป่งของสนิมเหล็กและดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมให้เกิดรอยร้าว

และหลุดล่อนออกมาในที่สุด การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจึงเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายคลอไรด์ การทดสอบหาการซึมแทรกคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน ปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ในด้านการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตทำขึ้นในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยมีงานวิจัยในด้านการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตน้อยมาก

Bai และคณะ (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shove Buryness ประเทศอังกฤษ Thomas รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้นมีผลต่อการซึมผ่านคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลการทดสอบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

ในประเทศไทย ปรินญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โช้ศรี (2548) ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 ถึง 80 ทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถต้านทานการแทรกซึมได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบทำให้ความสามารถในการต้านทานดีขึ้น ส่วนความสามารถในการรับกำลังอัด คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน ให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก อิทธิพลของการเกื้อหนุนกัน (Synergic Effect) ระหว่างวัสดุปอซโซลานทั้งสอง

จากการศึกษาข้างต้นเห็นได้ว่าการศึกษาในด้านการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน มีความสำคัญที่ใช้ยืนยันว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีในงานคอนกรีตได้ จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็น

ประโยชน์ในการพัฒนาและยืนยันการใช้เถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้เป็นที่ยอมรับมากขึ้น

2.3 งานวิจัยที่ผ่านมาของเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมัน

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2545) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้ พบว่าเถาเกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบด มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอชโซลานที่ต่ำมาก และได้พัฒนาคุณภาพเถาเกลบ-เปลือกไม้โดยการนำมาบดละเอียด ทำให้เถาเกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดี สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ ต่อมาจตุพล ตั้งปกาศิต (2548) ได้ศึกษาดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานของเถาเกลบ-เปลือกไม้ที่มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 พบว่าปฏิกิริยาปอชโซลานของเถาเกลบ-เปลือกไม้เริ่มต้นที่อายุ 3 วัน และมอร์ตาร์ที่มีเถาเกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน

ณัฐพงษ์ มกระรัช (2547) ได้ศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้ พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่เถาเกลบ-เปลือกไม้ในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานยิ่งขึ้น ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดมากที่มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการขยายตัวมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถาเกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดปานกลางและบดละเอียดมากให้สูงขึ้น และเมื่อแทนที่เถาเกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงๆ (ร้อยละ 30 และ 40) ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากอีกด้วย

ส่วนงานวิจัยด้านคอนกรีตกำลังสูง วันชัย สะตะ และคณะ (2546) ได้ศึกษาการใช้เถาเกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้เถาเกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดที่มีขนาดข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 2 พบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 ที่อายุ 90 วัน อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นมีราคาแพงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนเถาเกลบ-เปลือกไม้นั้นมีราคาถูกกว่า ทั้งยังช่วยลดการนำเถาเหล่านี้ไปทิ้งและเป็นการลดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมไปในตัวด้วย

ปี ค.ศ. 1990 มีการศึกษาการใช้เถาปลาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตโดย Tay (1990) ซึ่งได้นำเถาปลาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันให้กำลังอัดที่ต่ำ ความหนาแน่นน้อย และมีการดูดซึมน้ำมาก ทั้งนี้เพราะเถาปลาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดมีอนุภาคขนาดใหญ่จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีต (Tay และ Show , 1995)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal (1996) ทำการปรับปรุงคุณภาพเถาปลาล์มน้ำมันโดยการบดเถาปลาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน แต่หลังจากนั้นคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้ โดยที่คอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ของวัสดุประสานมีกำลังอัดสูงที่สุด และคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันยังมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอกลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว Ishida และคณะ(1999) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถาปลาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยบ่มแท่งคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่าการหดตัวน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติในการเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต

จักรพล กลั่นมันคง และคณะ (2543) ทำการศึกษาเถาปลาล์มน้ำมันในประเทศไทย พบว่าเถาปลาล์มน้ำมันที่เพิ่มคุณภาพด้วยการบดให้มีความละเอียดสูงมีศักยภาพเพียงพอสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน และการศึกษาต่อมาของ สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ (2545) พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 มีค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tangchirapat และคณะ (2007) ที่พบว่าเถาปลาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากมีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 90 และยังพบว่าสามารถต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้อีกด้วย ส่วน วันชัย สะตะ และคณะ (2546) ได้นำเถาปลาล์มน้ำมันมาใช้ผสมในคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาปลาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ให้กำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 100 ถึง 113 โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงสุด

การศึกษาคุณสมบัติของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้านกำลังอัด แต่การศึกษากการแทรกซึมผ่านคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน มีน้อยมาก ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการนำถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา การออกแบบและส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ วิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5
- 3.1.2 เถ้ากลบ-เปลือกไม้จาก บริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา
- 3.1.3 เถ้าปาล์มน้ำมันจาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)
- 3.1.4 ทราชแม่น้ำ
- 3.1.5 หินปูนย่อยขนาดโตสุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.2.1 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope)
- 3.2.2 เครื่องบด (Grinding Machine)
- 3.2.3 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 สำหรับวิเคราะห์ขนาด
- 3.2.4 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ
- 3.2.5 เครื่องผสมคอนกรีต
- 3.2.6 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.
- 3.2.7 ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต
- 3.2.8 เครื่องสำหรับตัดตัวอย่างคอนกรีต
- 3.2.9 อุปกรณ์สำหรับขัดผิวตัวอย่างคอนกรีต เช่น แปรงลวด เป็นต้น
- 3.2.10 เครื่องทดสอบกำลังอัด
- 3.2.11 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ความเข้มข้น 0.1 N
- 3.2.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วย Epoxy (รูปที่ 3.1)
- 3.2.13 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.14 Epoxy
- 3.2.15 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 3.2.16 อ่างแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (รูปที่ 3.2)
- 3.2.17 กระบอกฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด



รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยอีพอกซี (Eproxy)



รูปที่ 3.2 อ่างแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

3.3 วิธีการทดสอบ

วิธีการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมวัสดุ จนถึงการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ดังนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) จากบริษัทไทยเพาเวอร์ซัพพลายจำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา โดย RHBA ที่ได้จากโรงงานโดยตรงนำมาตากแดดให้แห้งใช้สัญลักษณ์ OR จากนั้นนำมาบดให้มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 15 – 20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G1R และ G2R ตามลำดับ

นำเถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) จาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด (มหาชน) จังหวัดชุมพร โดย POFA ที่ได้จากโรงงานโดยตรงนำมาตากแดดให้แห้งใช้สัญลักษณ์ OP จากนั้นนำมาบดให้มีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 15 – 20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G1P และ G2P ตามลำดับ

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.2.1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (American Society for Testing and Materials, 2009) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยการทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ทดสอบ

3.3.2.2 ทดสอบน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ซึ่งทำโดยการนำเอาตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ข้างบนตะแกรงเบอร์ 325

3.3.2.4 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันโดยการทดสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer Microtrac (Standard Range Analyzer : Model 7997-10 : Size 0.7 to 700 microns)

3.3.2.5 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ- เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ศึกษา

3.3.2.6 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ- เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

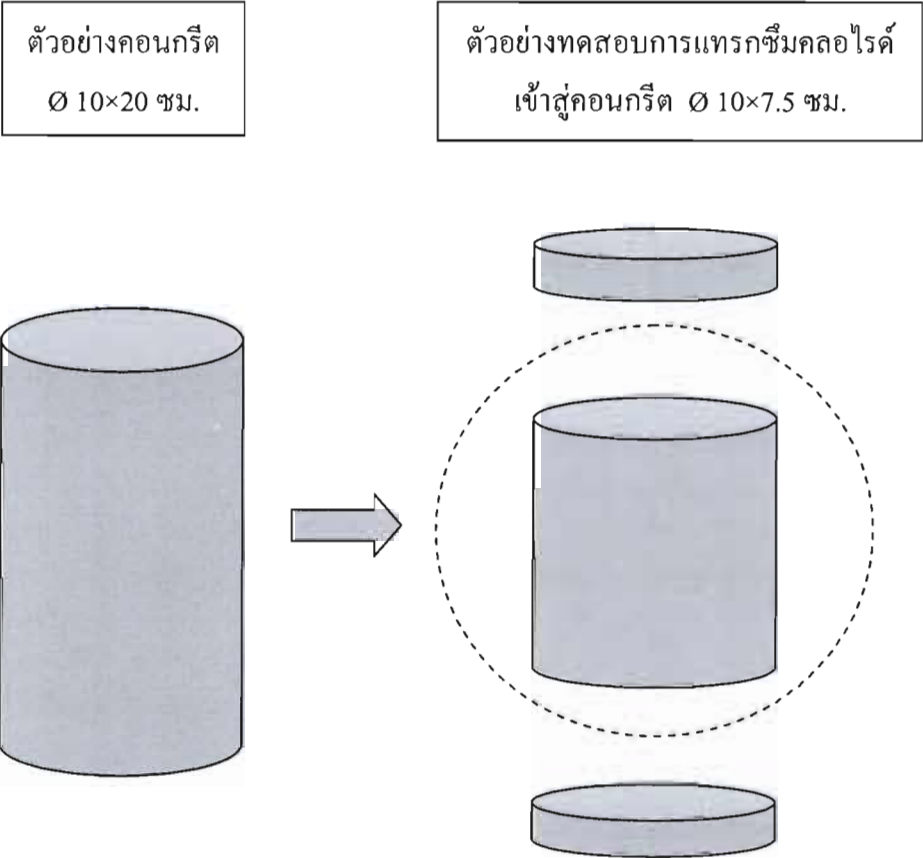
การศึกษานี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 300 กก/ซม² ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตทุกส่วนผสมให้อยู่ในช่วงระหว่าง 5-10 ซม. โดยปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้หรือเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 3.1 ทำการถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปา ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 90 และ 360 วัน สำหรับการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต นำคอนกรีตภายหลังจากบ่มในน้ำประปา 14 วันมาตัดและหล่ออีพอกซี (Epoxy) หุ้มตัวอย่างอีก 1 วันจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักจนคอนกรีตมีอายุ 90 และ 360 วัน

✓ ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา

Mixes	Mix Proportion (kg/m ³)					W/B	Slump (cm)
	Cement	RHBA or POFA	Water	Sand	Coarse Aggregate		
CT1	300	0	210	915	1080	0.70	7.0
CT5	300	0	210	915	1080	0.70	6.0
OR10	270	30	216	900	1065	0.75	8.0
OR20	240	60	231	875	1035	0.81	7.5
G1R10	270	30	216	900	1065	0.74	9.0
G1R20	240	60	219	895	1055	0.74	8.0
G1R30	210	90	219	890	1050	0.75	8.0
G1R40	180	120	222	880	1040	0.77	7.5
G2R10	270	30	204	920	1085	0.69	7.0
G2R20	240	60	210	905	1070	0.71	6.5
G2R30	210	90	213	900	1060	0.71	6.5
G2R40	180	120	216	890	1050	0.72	7.5
OP10	270	30	216	900	1065	0.72	8.0
OP20	240	60	231	875	1035	0.77	7.0
G1P10	270	30	216	900	1065	0.72	8.0
G1P20	240	60	219	895	1055	0.73	9.0
G1P30	210	90	219	890	1050	0.73	8.0
G1P40	180	120	222	880	1040	0.74	9.5
G2P10	270	30	204	920	1085	0.68	5.5
G2P20	240	60	210	905	1070	0.70	6.5
G2P30	210	90	213	900	1060	0.71	7.5
G2P40	180	120	216	890	1050	0.72	9.0

3.3.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่ผ่านคอนกรีต

เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยนำคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่บ่มในน้ำประปา 14 วัน มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่าง โดยให้มีขนาดความสูง 7.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วทำความสะอาดผิวของก้อนตัวอย่างให้สะอาดปราศจากฝุ่น หลังจากนั้นทำการหล่ออีพอกซี (Epoxy) โดยรอบของตัวอย่าง ให้มีความหนาโดยรอบประมาณ 1 ซม. จากผิวตัวอย่างคอนกรีต และหล่อปิดหน้าตัดหนึ่งด้านให้เหลือหน้าตัดคอนกรีตไว้ด้านหนึ่งเพื่อให้สารละลายคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปได้เพียงด้านเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.4

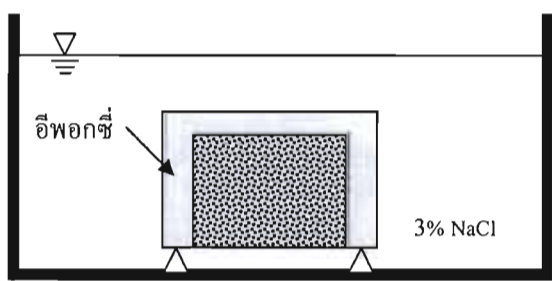


รูปที่ 3.3 การตัดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่หล่ออีพอกซี (Epoxy)

หลังจากหล่ออีพอกซีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างมาแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยวางตัวอย่างให้ด้านที่ไม่ได้ถูกอีพอกซีหล่อปิดคว่ำน้ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อถึงอายุทดสอบนำตัวอย่างขึ้นจากบ่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มาทำการกดตัวอย่างแบบผ่าซีก (Splitting) เพื่อให้ตัวอย่างแตกออกจากกันตามแนวยาวและฉีดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดลงบนผิวหน้าที่แตกของคอนกรีต เพื่อตรวจสอบความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่นำมาแช่ในสารละลายคลอไรด์

การฉีดสารเคมีซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) ความเข้มข้น 0.1 N ลงบนเนื้อคอนกรีตที่ทำการผ่าซีก ซึ่งหากคลอไรด์แทรกซึมไปถึงตำแหน่งใดสีของสารเคมีจะเปลี่ยนไป ทำให้สามารถทราบถึงความลึกของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่เนื้อคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.6) ทำการวัดความลึกทั้งหมด 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 2 เซนติเมตร และห่างจากขอบ 1 เซนติเมตร เฉลี่ยค่าที่ได้บันทึกผล



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างที่ทำการผ่าซีกเพื่อฉีดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3)

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

CT {1, 5} หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน

{O, G1, G2} {R, P} {10, 20, 30, 40} หมายถึง แก้วกลบ-เปลือกไม้และแก้วปาล์มน้ำมัน ที่มีความละเอียดและอัตราการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่างกัน โดยมีความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้

{O, G1, G2} หมายถึง ระดับความละเอียดของวัสดุ โดย O หมายถึงวัสดุก่อนบดซึ่งไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ, G1 คือวัสดุบดละเอียดปานกลางมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก และ G2 คือวัสดุบดละเอียดมากมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

{R, P} หมายถึง แก้วกลบ-เปลือกไม้และแก้วปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ

{10, 20, 30, 40} หมายถึง ปริมาณการแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

G2R10 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาก (มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

G1P10 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลาง (มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

OR20 หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้หยาบที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

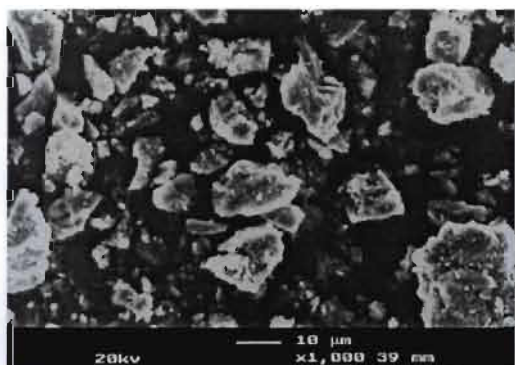
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตลอดจนผลกระทบของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วน ต่อกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ

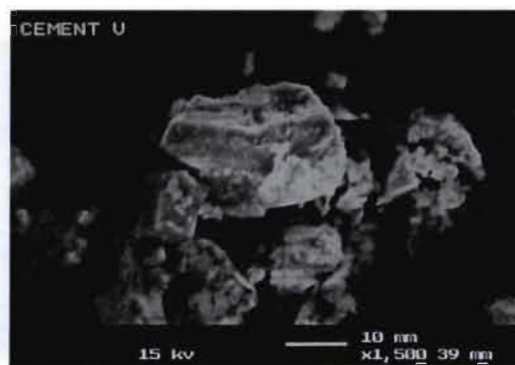
4.1.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 (รูปที่ 4.1) พบว่ามีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีเนื้อแน่น สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรง (OR) (รูปที่ 4.2ก.) มีลักษณะหยาบสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และผิวขรุขระ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบด G1R และ G2R (รูปที่ 4.2 ข. และ ค.) อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระ และมีขนาดเล็กกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด

ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงและผ่านการบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรง (OP) (รูปที่ 4.3ก.) มีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบ รูปร่างกลมมน ติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G1P และ G2P (รูปที่ 4.3ข. และ ค.) มีลักษณะอนุภาคคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งผลการศึกษาลำดับกับงานวิจัยของ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546)

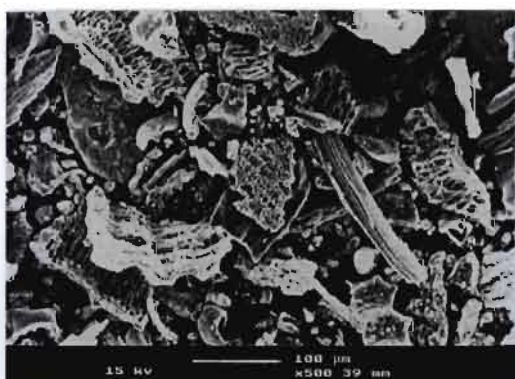


ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

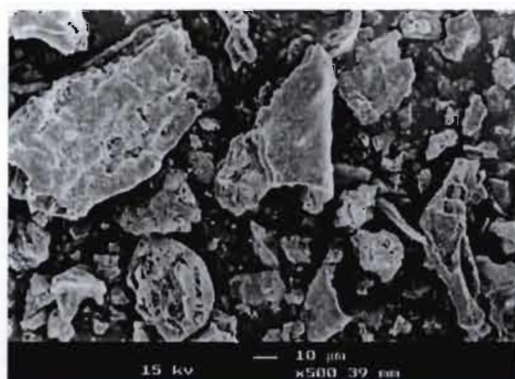


จ. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

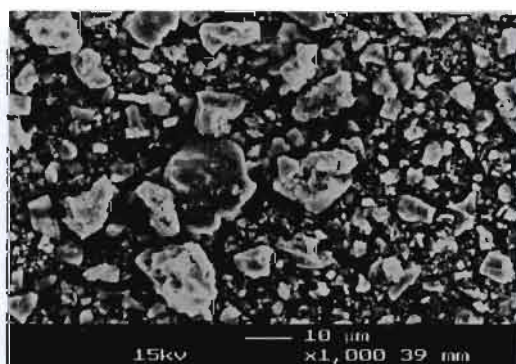
รูปที่ 4.1 รูปถ่ายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5



ก. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบด

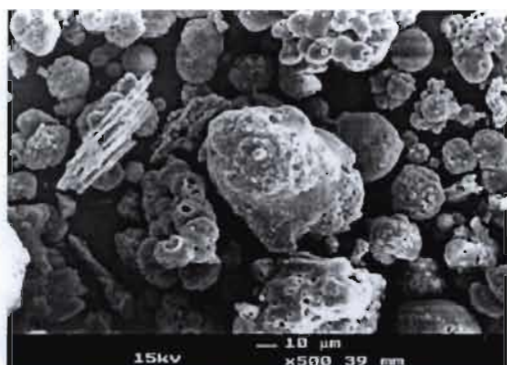


ข. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ความละเอียดปานกลาง

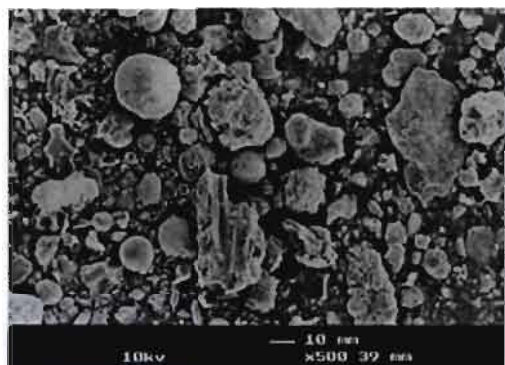


ค. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ความละเอียดสูงสุด

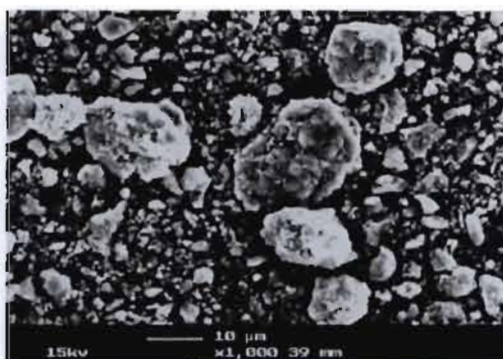
รูปที่ 4.2 รูปถ่ายกำลังสูงของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



ก. ถังปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด



ข. ถังปาล์มน้ำมันความละเอียดปานกลาง



ค. ถังปาล์มน้ำมันความละเอียดสูงสุด

รูปที่ 4.3 รูปถ่ายกำลังสูงของถังปาล์มน้ำมัน

4.1.2 ความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970)

ความถ่วงจำเพาะของถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R มีค่าเท่ากับ 2.03, 2.10 และ 2.15 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านมาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2545) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.89 ถึง 2.24 และมีค่าใกล้เคียงกับถ้ำเกลบที่มีค่าเท่ากับ 2.18 (Jaturapitakkul และ Roongreung, 2003) นอกจากนี้เห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีค่าเพิ่มขึ้นจากถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ OR ตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าถ้ำเกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุน แต่เมื่อผ่านการบดแล้ว ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง อนุภาคนี้น้อยลง ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนเถ้าปล้มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97, 2.17 และ 2.33 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการบดเถ้าปล้มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ เพราะว่อนุภาคของเถ้าปล้มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายใน อนุภาคสูง แต่เมื่อผ่านการบดแล้วทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Paya และคณะ, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และ Cheerarot (2003) ที่พบว่า การบดไม้เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ แต่ยังสามารถลดความพรุนได้ด้วยเช่นเดียวกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325 (%)	Median Particle Size, d ₅₀ (micron)
Cement Type I	3.14	N/A	14.7
Cement Type V	3.17	N/A	7.5
OR	2.03	68.7	75.3
G1R	2.10	16.9	27.5
G2R	2.15	1.9	10.9
OP	1.97	41.2	65.6
G1P	2.17	17.1	19.9
G2P	2.33	1.5	10.2

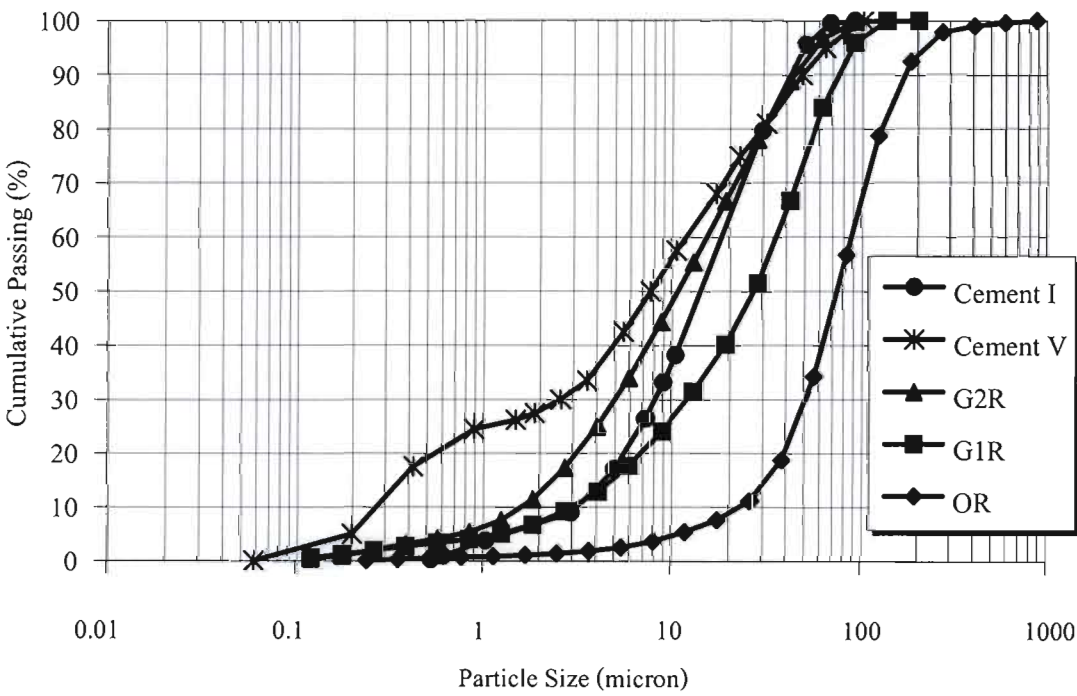
หมายเหตุ : N/A = Not Applied

4.1.3 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

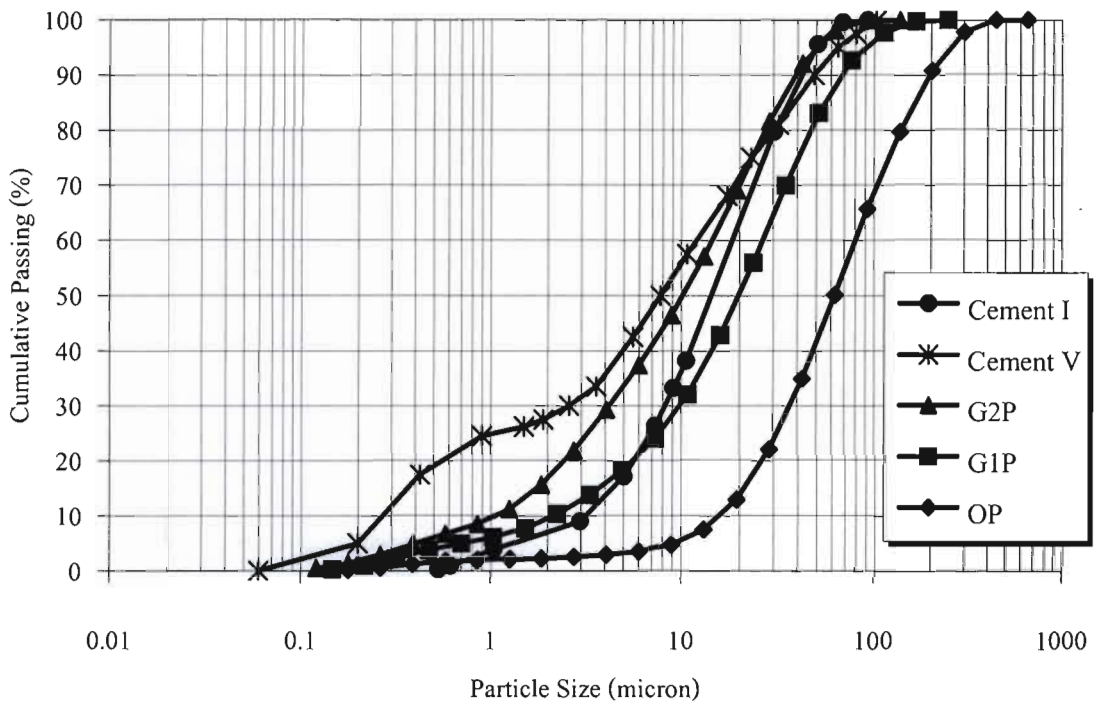
ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปล้มน้ำมันจากการศึกษาของวีรชาติ ตั้งจิรัชทร (2546) และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.7 ไมครอน ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 50 ไมครอน ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างอนุภาคนาขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ยังเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ มีค่าเท่ากับ 7.5 ไมครอน

สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรง (OR) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 25 ถึง 180 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 75.3 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่่มาก หลังจากปรับปรุงคุณภาพโดยการบดทำให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงเท่ากับ 27.5 (G1R) และ 10.9 (G2R) ไมครอน ตามลำดับ และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 80 และ 2 ถึง 40 ไมครอนตามลำดับ

ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) พบว่าร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 15 ถึง 200 ไมครอน มีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภทอย่างมาก จากเส้นกราฟ (รูปที่ 4.5) การกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนข้างทางด้านขวาอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่ามีความเท่ากับ 65.6 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก แต่หลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีการกระจายตัวของอนุภาคแคบลงและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงโดย G2P มีการกระจายตัวและขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาค G1P และ G2P ร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 2 ถึง 70 และ 1 ถึง 40 ไมครอน ตามลำดับและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.2 ไมครอนตามลำดับ โดยมีขนาดลดลงจากเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ประมาณ 3 และ 6 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปล้มน้ำมัน

4.1.4 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาค่าที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าร้อยละน้ำหนักของอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ OR มีค่าเท่ากับร้อยละ 68.7 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2008) กำหนดไว้ที่ไม่เกินร้อยละ 34 อยู่มาก ส่วนเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงลดลงจากเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ OR อย่างมาก คือมีค่าเท่ากับ 16.9 และ 1.9 ตามลำดับ

ส่วนเถ้าปล้มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 41.2, 17.1 และ 1.5 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเถ้าปล้มน้ำมัน OP ที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2009) กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 อยู่พอสมควร แต่หลังจากปรับปรุงคุณภาพโดยการบดเถ้าปล้มน้ำมัน G1P และ G2P มีร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงลดลงจากเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ OP

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดทั้งสองขนาด (G1 และ G2) มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยยังมีค่าใกล้เคียงและใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ ประกอบกับภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุทั้งสอง สามารถบอได้ว่าอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความพรุนเหลืออยู่

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.4 และ 62.4 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/C 150M (American Society for Testing and Materials, 2009) กำหนดไว้

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จากตารางที่ 4.2 พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 74.8 ผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.8 มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.5 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 4 แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 11.2 ซึ่งสูงกว่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2009) คือ ไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้พบว่าไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545; จตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ, 2548; Makaratat, et al., 2004) แม้ว่าจะมี LOI สูงกว่าที่กำหนดโดย ASTM C618

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน (G2P) มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.3 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 2.6 และ 2.0 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Tay และคณะ (1990) ที่พบว่ามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 34.3, 24.6 และ 14.9 ตามลำดับ และยังแตกต่างจากงานศึกษาของ Hussin และ Awal (1996) ที่มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 43.6, 11.4 และ 4.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาดังกัน และเมื่อพิจารณาเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่ามีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.9 มีปริมาณ SO_3 เพียงร้อยละ 0.5 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) เท่ากับร้อยละ 10.1

เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันแล้วไม่สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอชโซลาน Class N ได้ แต่วัสดุปอชโซลานที่ดีไม่สามารถจำแนกโดยใช้องค์ประกอบเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ต้องพิจารณาองค์ประกอบด้านอื่นๆด้วย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ (Tangchirapat และคณะ, 2007; จักพล กลั่นมันคง และคณะ, 2543; Tay และคณะ, 1990; Hussin และ Awal, 1996; Jaturapitakkul และคณะ, 2007)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Cement Type I	Cement Type V	RHBA (G2R)	POFA (G2P)
Silicon Dioxide (SiO ₂)	20.9	22.2	74.8	65.3
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	4.8	3.5	0.2	2. 6
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	5.6	0.8	2.0
Calciam Oxide (CaO)	65.4	62.4	5.9	6.4
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	1.0	0.6	3.1
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.3	0.1	0.2	0.4
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.4	0.2	2.0	5.7
Sulfur Trioxide (SO ₃)	2.7	1.1	0.5	0.5
Loss On Ignition (LOI)	1.0	1.7	11.2	10.1
Tricalcium Silicates (C ₃ S)	62.9	51.2	-	-
Dicalcium Silicates (C ₂ S)	12.5	24.9	-	-
Tricalcium Aluminate (C ₃ A)	6.8	0.0	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C ₄ AF)	10.4	17.0	-	-

หมายเหตุ : LOI ที่ระบุใน ASTM C 618 ให้มีไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมี LOI เกินไปเล็กน้อย

สำหรับสาเหตุที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเฉพาะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดบดละเอียดมาก (G2P และ G2R) เท่านั้น แต่ไม่วิเคราะห์เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอื่น เพราะการศึกษารอบคอบของเถ้าถ่านหินที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนแปลงมากนัก (Jaturapitakkul และ Roongreung, 2003; สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538)

4.3 ความต้องการน้ำของคอนกรีตสด

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตควบคุม CT1, CT5, คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 4.3 โดยออกแบบคอนกรีตควบคุมให้มีค่ายุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันใช้วิธีการปรับปริมาณน้ำเพื่อให้มีค่ายุบตัวอยู่ในช่วงเดียวกับคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีตควบคุม CT1 และคอนกรีตมาตรฐาน CT5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันคือ 0.70

4.3.1 ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในสัดส่วนที่สูงขึ้นคอนกรีตมีความต้องการน้ำมากขึ้น เช่น คอนกรีต OR10 และ OR20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 และ 0.81 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และ Waliuddin (1996) ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบให้สูงขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าแกลบสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีผิวขรุขระมาก มีความพรุนสูง มีการขัดกันระหว่างอนุภาค ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวที่เท่ากันจึงต้องการปริมาณน้ำที่มากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดโพรงอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีตและมีความพรุนสูง (Chindaprasirt และคณะ, 2005) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (G1R และ G2R) พบว่าความต้องการน้ำลดลง แต่แนวโน้มของความต้องการน้ำยังสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นเช่น คอนกรีต G1R10 และ G1R40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.74 และ 0.77 ตามลำดับ ซึ่งมีความต้องการน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ขึ้นอีก เห็นได้ว่าคอนกรีต G2R10 และ G2R40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.69 และ 0.72 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีความละเอียดมากขึ้นสามารถลดความพรุนและโพรงอากาศได้มากขึ้นเป็นผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตต่ำกว่ากรณีที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดน้อยกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้สูงขึ้น พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับความต้องการน้ำของเถ้าแกลบซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (1996) นอกจากนี้ค่า LOI ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่าสูงถึงร้อยละ 11.2 เป็นผลให้คอนกรีตดูดน้ำมากขึ้น (Makaratat และคณะ, 2004)

4.3.2 ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อพิจารณาความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันดังตารางที่ 4.3 พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับกลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ กล่าวคือความต้องการน้ำสูงขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นและการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นสามารถลดความต้องการน้ำลงได้ เช่น คอนกรีต OP10 และ OP20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.72 และ 0.77 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (G1P) พบว่าคอนกรีต G1P10 และ G1P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจากที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งเท่ากับ 0.72 และ 0.74 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันขึ้นอีก (G2P) พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1P โดยคอนกรีต G2P10 และ G2P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงและมีค่าเท่ากับ 0.68 และ 0.72 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีโพรงอากาศจำนวนมากและความพรุนสูง ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อมีการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นทำให้ความพรุนลดลง ส่งผลให้ความต้องการปริมาณน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P น้อยกว่า G1P แต่ยังมีค่าสูงขึ้นเมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นอีก อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 10.1 จึงทำให้มีการดูดน้ำสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Berg และ Kukko, 1991; เอนก ศิริพานิชกร, 2536)

4.3.3 เปรียบเทียบความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ส่วนใหญ่มีความต้องการน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น ที่ความละเอียดใกล้เคียงกันคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R10 และ G2R20 มี W/B เท่ากับ 0.69 และ 0.71 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P10 และ G2P20 มี W/B เท่ากับ 0.68 และ 0.70 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่า LOI ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงกว่าจึงมีการดูดซึมน้ำมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการน้ำมีค่าลดลง (Shiqun และ Della, 1986) ซึ่งตรงกันข้ามกับความต้องการน้ำของคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม อาจเป็นเพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ ส่วนเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่กลมตัน ผิวเรียบ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้นสามารถช่วยในการหล่อลื่นได้ดีกว่าอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม (Hansen, 1990) ซึ่งความต้องการน้ำที่แตกต่างกันนี้ส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีตตามกฎของ Abrams (Abrams, 1918)

4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4.4.1 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

ผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 กก/ซม² มีการปรับปริมาณน้ำเพื่อควบคุมให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว 5 ถึง 10 ซม. จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตควบคุม (CT1) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 299 กก/ซม² ซึ่งใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ ส่วนคอนกรีต CT5 ที่อายุ 7, 28, 90 และ 360 วันมีกำลังอัดเท่ากับ 192, 285, 348 และ 414 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 93, 95, 103 และ 108 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 28 วัน จากนั้นกำลังอัดจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึงอายุ 360 วัน

ผลการทดสอบของคอนกรีตควบคุม CT5 แสดงได้ชัดเจนว่ามีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ในช่วงอายุต้นๆ เมื่ออายุเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 90 วันขึ้นไป เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3S ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้กำลังอัดแก่คอนกรีตในช่วงอายุต้นๆต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงร้อยละ 11.4 ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นมีค่าต่ำ แต่มีปริมาณของ C_2S ซึ่งเป็นสารประกอบช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 2 เท่า ดังนั้นจึงสามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 90 วันให้สูงกว่าคอนกรีต CT1 ได้ (ประกาศ ทองประไพ, 2541)

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกเลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample	W/B	Slump (cm)	Compressive Strength (ksc) - (Normalized Strength to CT1, %)			
			7 days	28 days	90 days	360 days
CT1	0.70	7.0	205 - (100)	299 - (100)	339 - (100)	384 - (100)
CT5	0.70	6.0	192 - (93)	285 - (95)	348 - (103)	414 - (108)
OR10	0.75	8.0	170 - (83)	235 - (79)	278 - (82)	358 - (93)
OR20	0.81	7.5	126 - (62)	197 - (66)	245 - (72)	229 - (78)
G1R10	0.74	8.0	189 - (92)	283 - (95)	341 - (101)	405 - (105)
G1R20	0.74	7.5	179 - (87)	271 - (91)	319 - (94)	362 - (94)
G1R30	0.75	7.0	147 - (72)	243 - (81)	290 - (86)	323 - (84)
G1R40	0.77	6.5	129 - (63)	210 - (70)	265 - (78)	288 - (75)
G2R10	0.69	6.5	241 - (117)	345 - (116)	392 - (116)	422 - (110)
G2R20	0.71	7.5	214 - (104)	309 - (103)	361 - (106)	410 - (107)
G2R30	0.71	6.0	183 - (89)	294 - (98)	334 - (99)	377 - (98)
G2R40	0.72	8.0	178 - (87)	281 - (94)	324 - (96)	361 - (94)
OP10	0.72	8.0	160 - (78)	237 - (79)	271 - (90)	346 - (90)
OP20	0.77	7.0	137 - (67)	206 - (69)	236 - (70)	316 - (82)
G1P10	0.72	8.0	192 - (93)	280 - (94)	331 - (98)	375 - (98)
G1P20	0.73	9.0	175 - (85)	249 - (83)	294 - (87)	335 - (87)
G1P30	0.73	8.0	160 - (78)	227 - (76)	269 - (79)	310 - (81)
G1P40	0.74	9.5	138 - (67)	203 - (68)	246 - (72)	267 - (70)
G2P10	0.68	5.5	210 - (102)	303 - (101)	358 - (106)	396 - (103)
G2P20	0.70	6.5	197 - (96)	293 - (98)	344 - (102)	383 - (100)
G2P30	0.71	7.5	186 - (91)	277 - (93)	331 - (98)	364 - (95)
G2P40	0.72	9.0	175 - (85)	257 - (86)	299 - (88)	330 - (86)

4.4.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุ การทดสอบโดยการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดต่ำลง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีลักษณะที่คล้ายกันกล่าวคือ มีการเพิ่มของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 360 วัน เช่น คอนกรีต OR10 และ OR20 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 170 และ 126 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 83 และ 62 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นจนถึงอายุ 90 วันเท่ากับ 278 และ 245 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 82 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่ออายุ 360 วันมีการพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 358 และ 229 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 93 และ 75 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ นอกจากนั้นเห็นได้ชัดว่าคอนกรีต OR ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมากและไม่มีแนวโน้มที่จะพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ได้ เนื่องจากอัตราการเพิ่มของกำลังอัดใกล้เคียงกับกลุ่มของคอนกรีตควบคุม และการพัฒนากำลังอัดเริ่มมีค่าคงที่จึงส่งผลให้กำลังอัดที่อายุมากขึ้นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้คอนกรีตต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงตามกฎของ Abrams (1918) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OR) โดยไม่ผ่านการบด ไม่เหมาะที่จะนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากมีความพรุนสูงและมีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงทำให้กำลังอัดลดลงเพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ลงได้ ซึ่งตรงกับการศึกษาของณัฐพงษ์ มกระรัช (2547) ที่พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

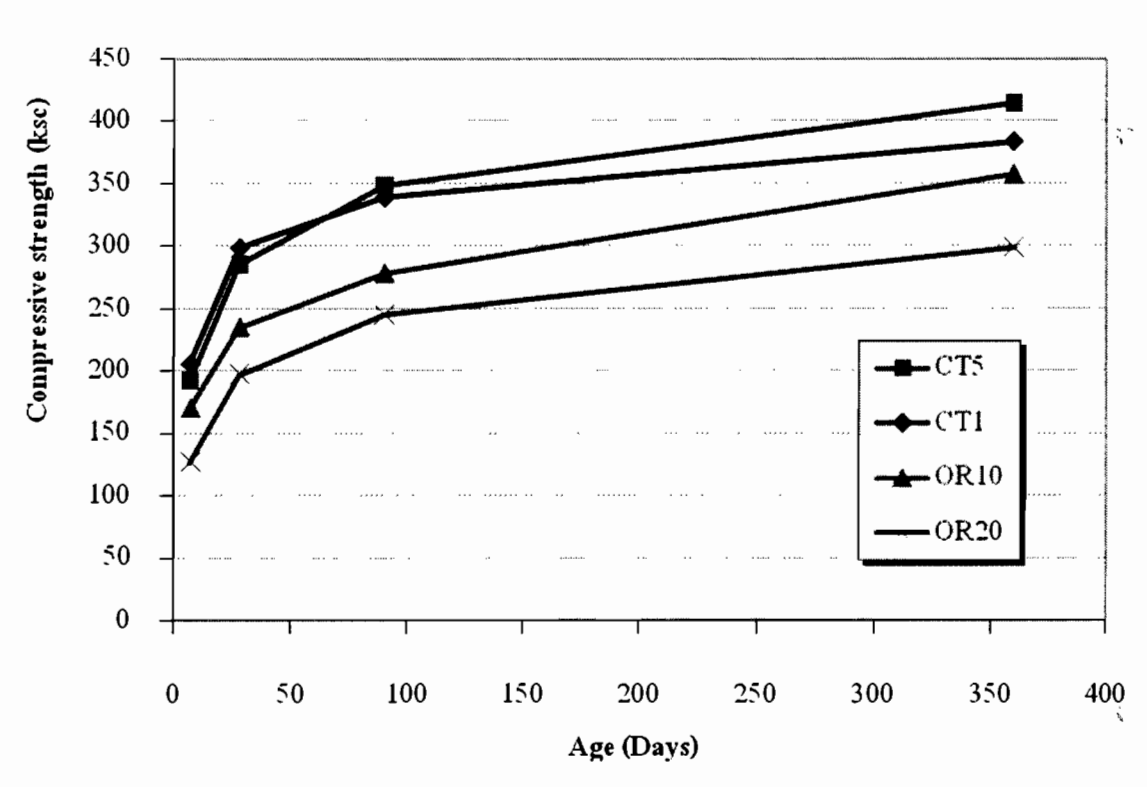
เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (G1R) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังอัดจะสูงขึ้น ที่อายุ 7 วันคอนกรีต G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 189, 179, 147 และ 129 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 92, 87, 72 และ 63 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 283, 271, 243 และ 210 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 95, 91, 81 และ 70 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ จากค่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันจะเห็นว่าอัตราการเพิ่มของกำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมไม่ต่างกันมากนักแสดงว่าในระยะเวลา 28 วันผลของปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ไม่ได้ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตควบคุม แต่ในช่วง 28 ถึง 360 วัน พบว่าอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ในอัตราร้อยละ 10 เพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อ

เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เห็นได้ชัดว่ากำลังอัดของคอนกรีต G1R เพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีต OR ในปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่เล็กและความพรุนที่ลดลงของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มาก

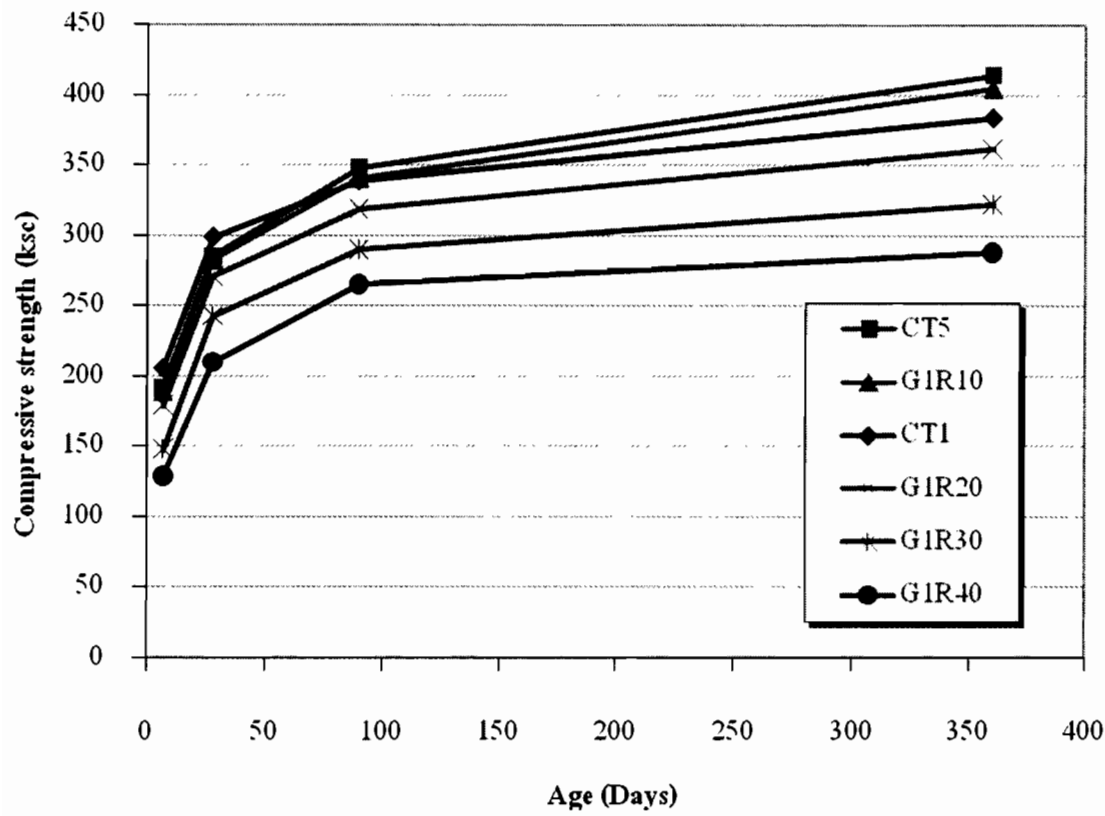
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมาก (G2R) พบว่าคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และ G1R แต่มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ดังแสดงในรูป 4.8 เช่น การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีต OR20, G1R20 และ G2R20 ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 197, 271 และ 309 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 66, 91 และ 103 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และแนวโน้มดังกล่าวยังเป็นเช่นเดิมเมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน และ 360 วัน ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R พบว่าคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 241, 214, 183 และ 178 กก/ซม² และพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 345, 309, 294 และ 281 กก/ซม² โดยที่อายุ 7 และ 28 วันคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังได้รวดเร็ว แต่ช่วงอายุ 28 ถึง 360 วัน อัตราการเพิ่มของกำลังอัดต่ำลงโดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 392, 361, 334 และ 324 กก/ซม² ตามลำดับ และกำลังอัดที่อายุ 360 วันเท่ากับ 422, 410, 377 และ 361 ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีต G2R ในทุกอัตราการแทนที่พบว่ากำลังอัดที่อายุ 90 และ 360 วันมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุมซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีต G2R30 และ G2R40 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วัน แต่สามารถพัฒนากำลังอัดให้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 90 และ 360 วัน ขณะที่คอนกรีต G2R10 และ G2R20 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ในทุกช่วงอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดที่สูงมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็ว อนุภาคที่เล็กมากได้แทรกไปตามช่องว่างต่างๆของคอนกรีต ทำให้เกิดการอัดแน่นในคอนกรีต ซึ่ง Isايا และ คณะ (2003) ได้กล่าวไว้ว่าการบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดสูงทำให้เถ้าแกลบมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ให้สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายกับค่ากำลังอัดที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในคอนกรีตของงานวิจัยที่ผ่านมา (Ismail และ Waliuddin, 1996; Zhang และ คณะ, 1996; Isايا และ คณะ, 2003) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบดวัสดุอาจยังมีความพรุนเหลืออยู่ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ให้สูงขึ้นอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานจึงสูงขึ้นด้วย มีผลทำให้กำลังอัดลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ikpong (1993) และ Ismail และ Waliuddin (1996) ที่

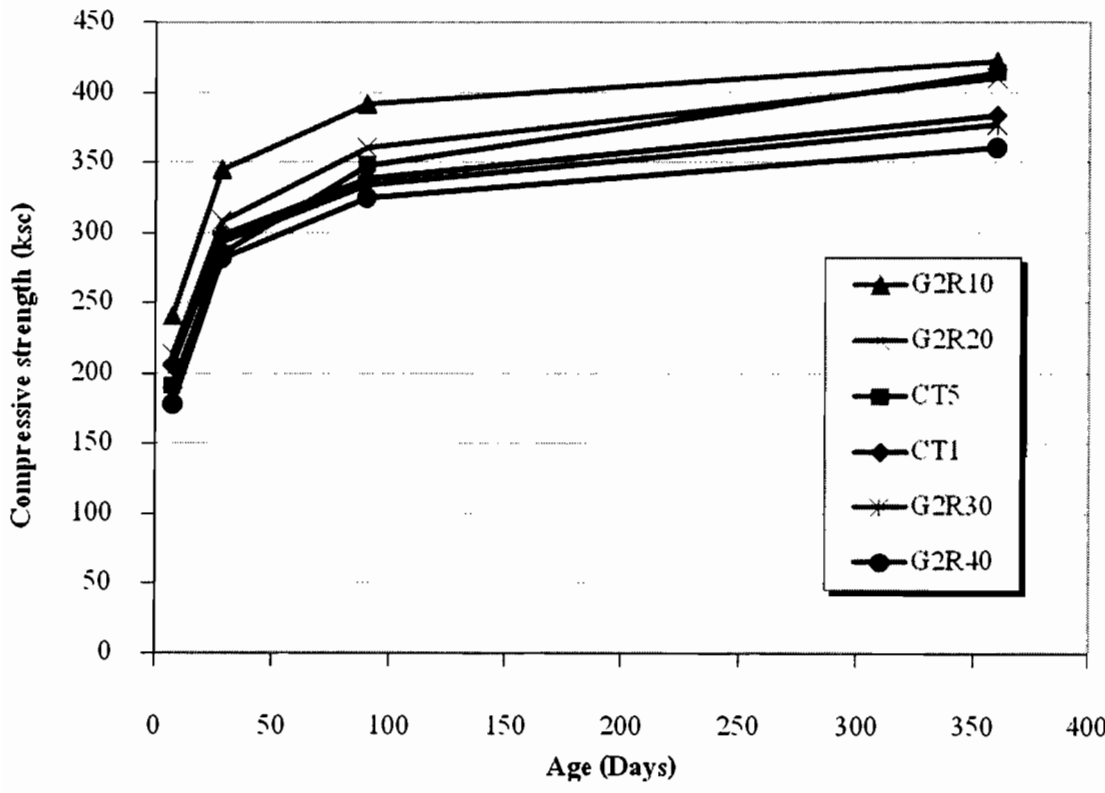
พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบให้สูงขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสูงขึ้นด้วย แต่การปรับปรุงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไม่ทำให้การพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เนื่องจากอนุภาคเล็กจึงทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ได้ดีกว่า



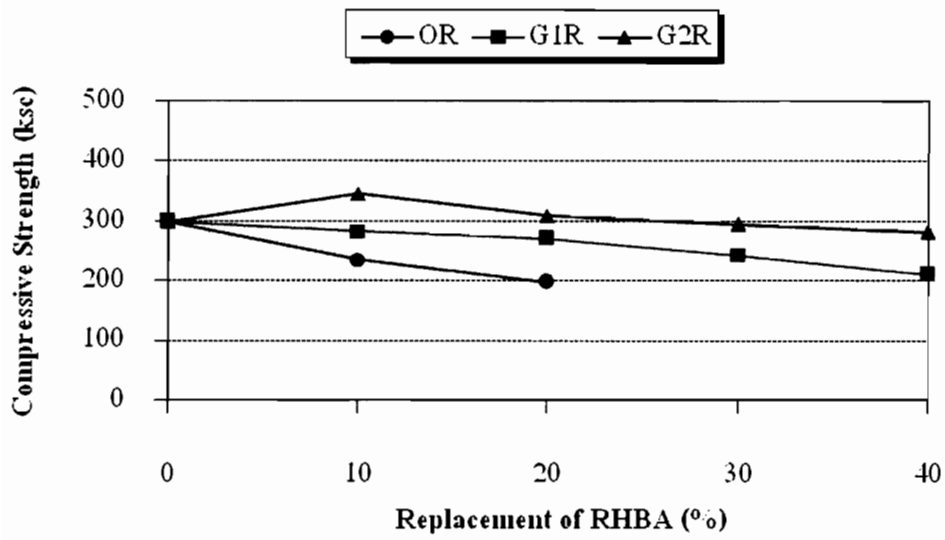
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



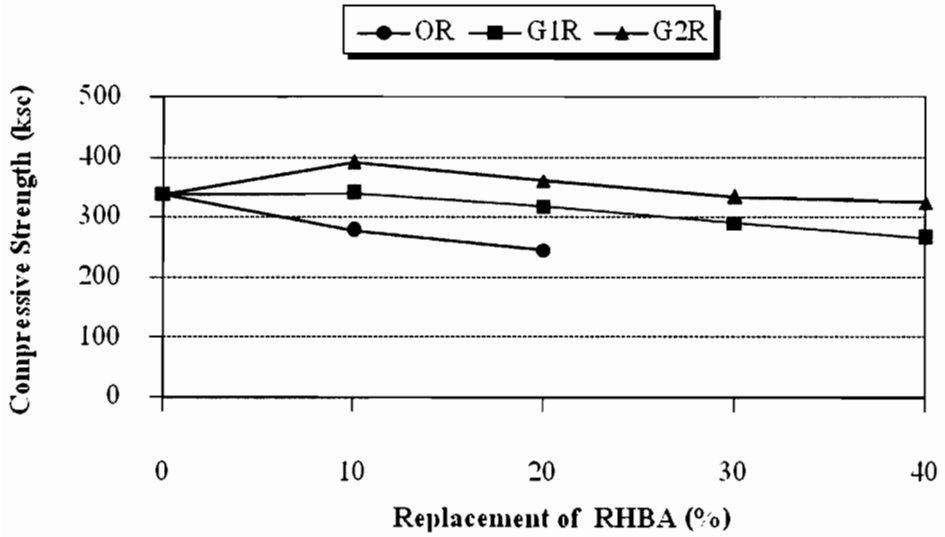
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



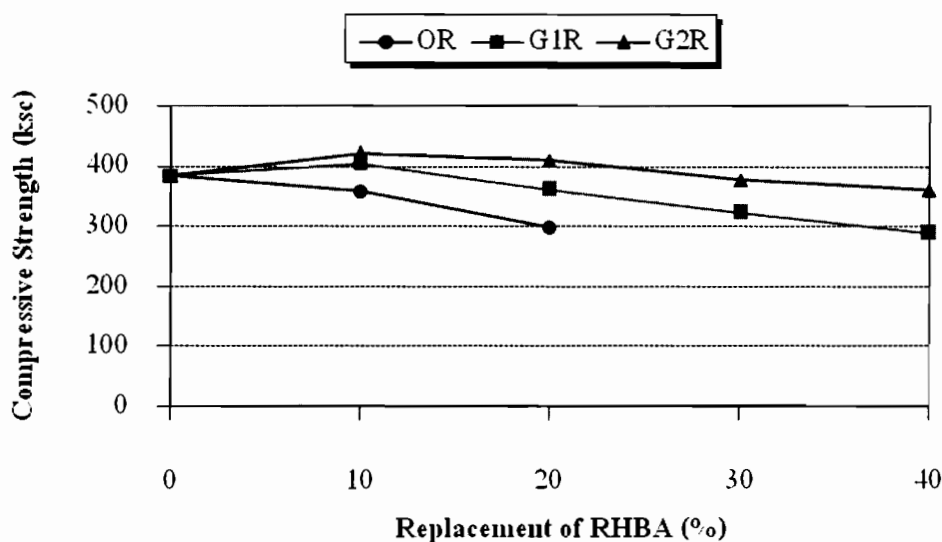
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 360 วัน

4.4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง OP โดยคอนกรีต OP10 และ OP20 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 160 และ 137 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 78 และ 67 ของคอนกรีตควบคุม และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 237 และ 206 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 79 และ 69 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันตามลำดับ แต่ยังคงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 แล้วเมื่ออายุ 360 วัน คอนกรีต OP10 และ OP20 มีกำลังอัดเท่ากับ 346 และ 316 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 90 และ 82 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และไม่มีคอนกรีตส่วนผสมใดที่สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (Tangchirapat และคณะ, 2007) นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นยังส่งผลให้กำลังอัดลดลงด้วย เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีความพรุนสูงและขนาดใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลทำให้กำลังอัดลดลงเพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้

เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น G1P ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน และอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะช้าลงในช่วงอายุ 28 ถึง 360 วัน ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวคล้ายกับการศึกษาของ (Tangchirapat และคณะ, 2007) ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อปรับปรุงขนาดให้มีความ

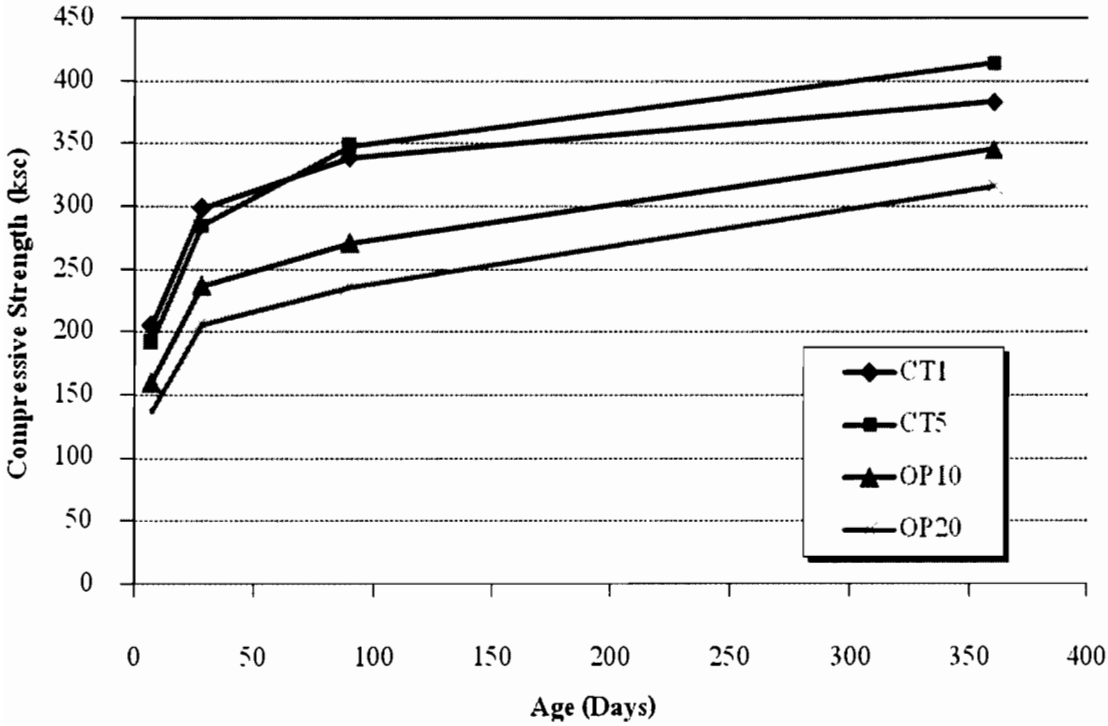
ละเอียดมากขึ้น และแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง โดยคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 192, 175, 160 และ 138 กก/ซม² ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน กำลังอัดพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 280, 249, 227 และ 203 กก/ซม² ซึ่งเห็นได้ว่าในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วันกำลังอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อพิจารณาร้อยละของกำลังอัดพบว่าที่อายุ 7 และ 28 วันไม่แตกต่างกันนัก ซึ่งที่อายุ 7 วันมีกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่าเท่ากับร้อยละ 93, 85, 78 และ 67 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ในขณะที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ยังคงเป็นร้อยละ 94, 83, 76 และ 68 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากที่อายุ 7 วันมากนัก นั่นแสดงให้เห็นว่าผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าปาล์มน้ำมันไม่ชัดเจนมากนักในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน แต่เมื่อคอนกรีตอายุ 90 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98, 87, 79 และ 72 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และเมื่ออายุ 360 วันคอนกรีตมีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 98, 87, 81 และ 70 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าปาล์มน้ำมันจะเด่นชัดเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน และคอนกรีต G1P10 สามารถพัฒนากำลังอัดเมื่อมีอายุ 90 วันให้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1 ได้

เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดให้ละเอียดมากขึ้น (G2P) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่พัฒนาตามอายุมีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P กล่าวคือคอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วันดังแสดงในรูป 4.14 เมื่อสังเกตจากค่าร้อยละของกำลังอัดจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ถึงร้อยละ 30 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน โดยที่อายุ 7 วันคอนกรีต G2P10, G2P20 และ G2P30 มีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 102, 96 และ 91 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน แม้ว่ากำลังอัดคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากจากอายุ 7 วัน แต่ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มของกำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งสังเกตได้จากค่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วันไม่แตกต่างจากที่อายุ 7 วันมากนัก แต่ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถส่งผลให้กำลังอัด ใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 และ 360 วัน โดยที่อายุ 90 วัน คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีกำลังอัดเท่ากับ 358, 344, 331 และ 299 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 106, 102, 98 และ 88 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่ออายุ 360 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 396, 383, 364 และ 330 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 100, 95 และ 86 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าที่อายุ 7 วันขึ้นไป คอนกรีต G2P10 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ทุกอายุการทดสอบ ส่วนคอนกรีต G2P20 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วันและสามารถพัฒนาให้มากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ

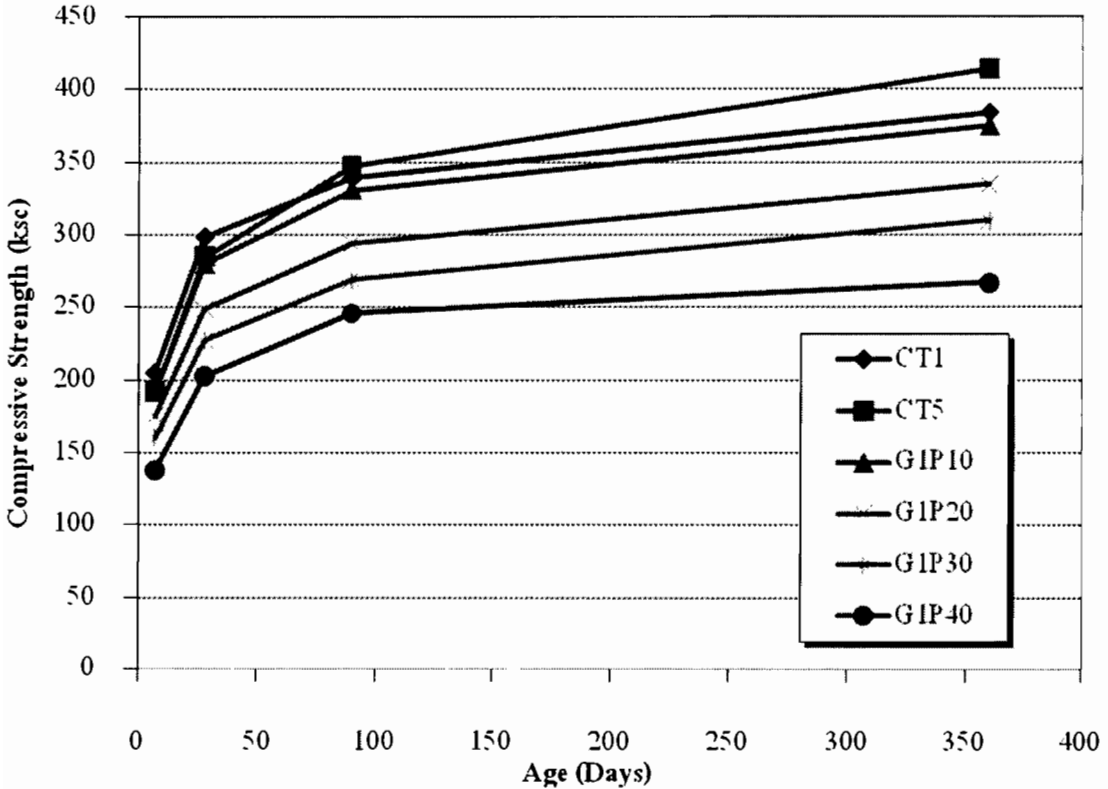
90 และ 360 วัน และหากพิจารณาคอนกรีต G2P30 ถือว่าค่ากำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีในทุกอายุการทดสอบ ซึ่งพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G2P มีการพัฒนากำลังอัดมากกว่าคอนกรีต OP และ G1P อย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของจตุพล ตั้งปกาศิตและคณะ (2548) ที่พบว่าวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

รูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 28, 90 และ 360 วันตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีอยู่แม้ว่าจะบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม แต่การบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.2 ไมครอน สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้สูงถึงร้อยละ 40 และยังคงให้กำลังอัดที่อายุ 28, 90 และ 360 วันเป็นที่น่าพอใจ (ประมาณร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม)

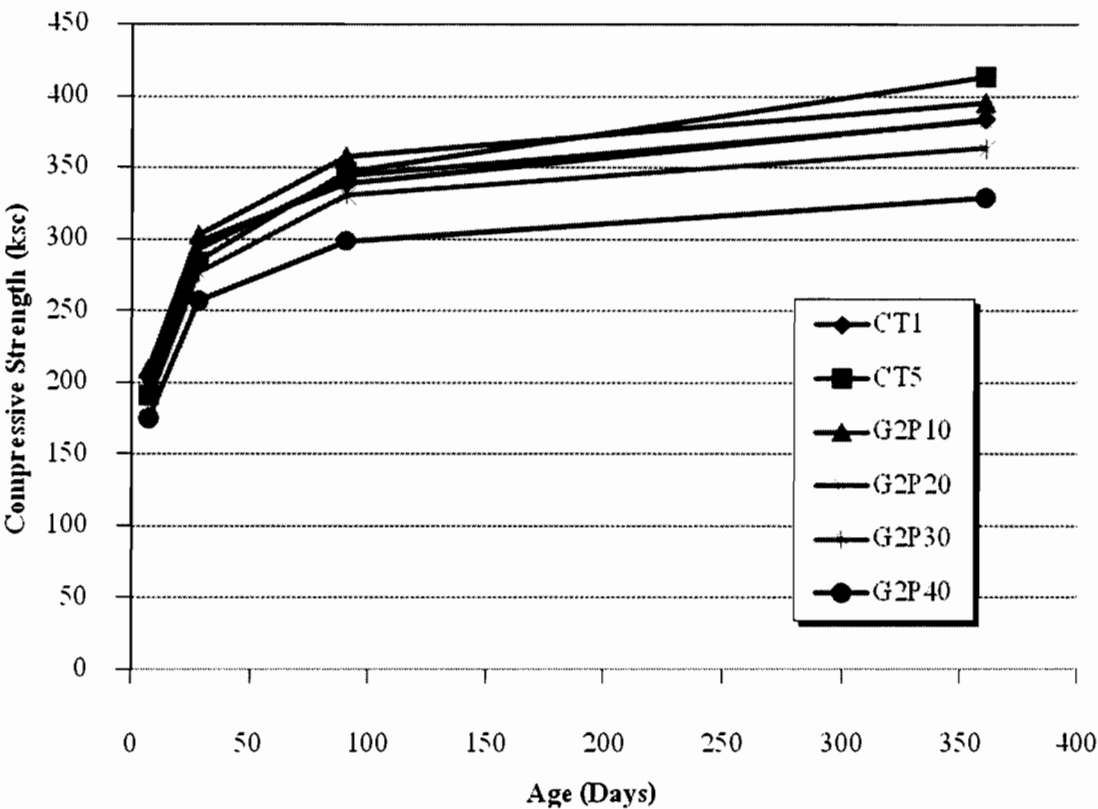
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดระดับเดียวกันและแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณเท่ากันที่อายุ 90 และ 360 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่มากนัก โดยการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด G2 ในอัตราร้อยละ 20 ที่อายุ 90 วันมีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 106 และ 102 ตามลำดับ และอายุ 360 วันมีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 107 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยมอร์ตาร์ดที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันของจตุพล ตั้งปกาศิตและคณะ (2548) ที่พบว่ามอร์ตาร์ดที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ดที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยจากการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณค่าตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในอัตราร้อยละ 20 พบว่ามอร์ตาร์ดมีกำลังอัดที่อายุ 90 วันคิดเป็นร้อยละ 107 และ 105 ของมอร์ตาร์ดควบคุมตามลำดับ การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้กำลังอัดสูงกว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงร้อยละ 2 และเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตในทุกการแทนที่ ยังคงพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้กำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน



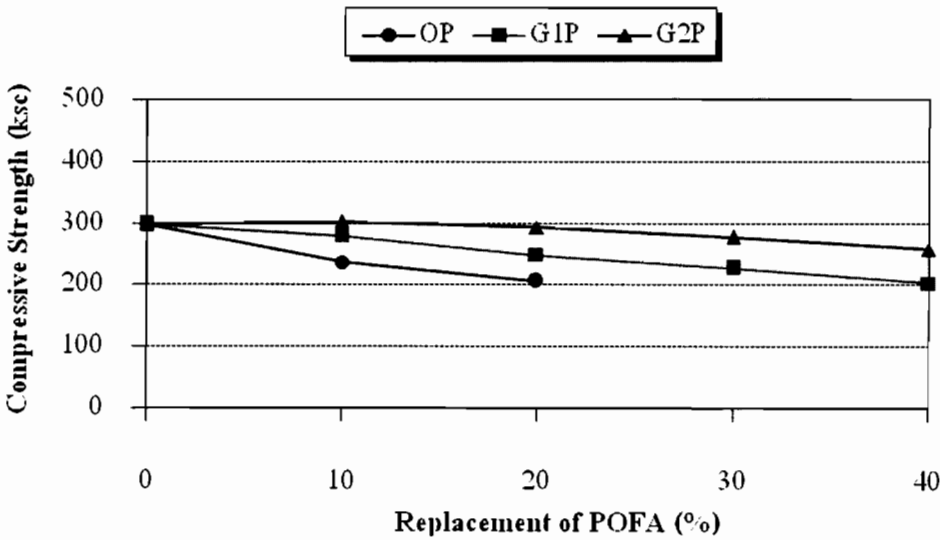
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



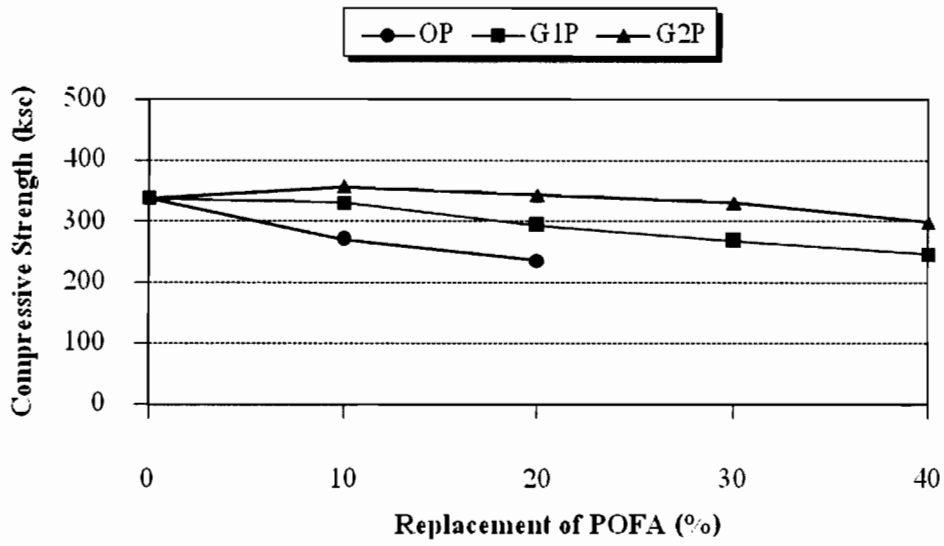
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน GIP



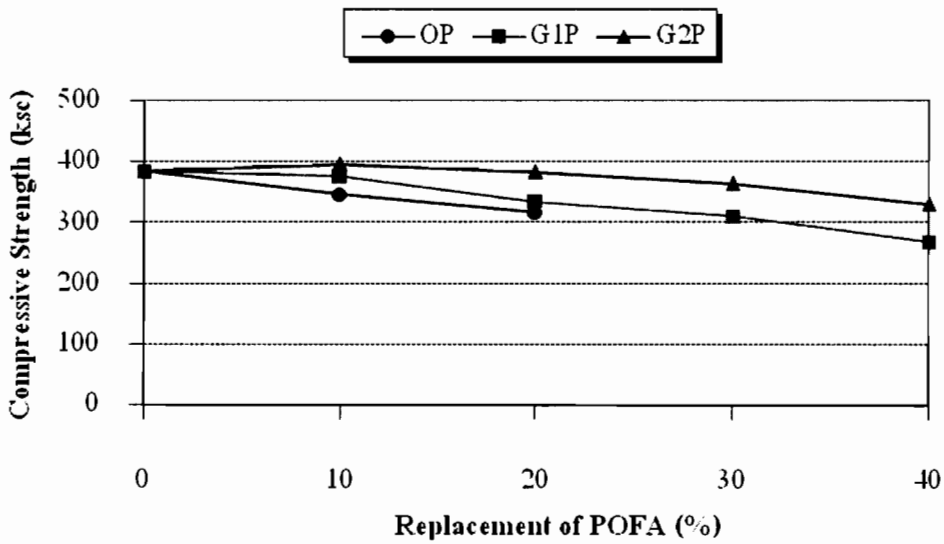
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน G2P



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปล้มน้ำมัน ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 90 วัน



ก. อายุ 360 วัน

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 360 วัน

4.5 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แสดงเป็นค่าความลึกมีหน่วยเป็นเซนติเมตร และแสดงค่าร้อยละของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยที่อายุ 90 และ 360 วัน คอนกรีตควบคุม CT1 มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต CT1 เท่ากับ 1.44 และ 4.82 เซนติเมตร ขณะที่มีการอัดเท่ากับ 339 และ 384 กก/ชม² ตามลำดับ

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่และความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูง พบว่าสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตลงได้ โดยเห็นผลทั้งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ปรับปรุงความละเอียดจาก OR เป็น G1R และจากความละเอียด G1R เป็น G2R เช่น คอนกรีต OR10 และ OR20 มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันเท่ากับ 1.68 และ 1.36 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 117 และ 94 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความละเอียดเป็น G1R การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตให้ลดลงเป็น 1.62 และ 1.30 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 113 และ 90 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความละเอียดเป็น G2R มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับ 1.06 และ 1.02 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 74 และ 71 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้นและการเพิ่มความละเอียดสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ และแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นเช่นเดียวกับคอนกรีตที่อายุ 360 วัน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีอนุภาคที่เล็กทำให้ความพรุนของเพสต์ในเนื้อคอนกรีตลดลงคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นสามารถป้องกันการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการซึมผ่านอากาศของ Chindaprasirt และคณะ (2005) ที่พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ความพรุนจะลดลง และการซึมผ่านอากาศลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตตามระยะเวลาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ความละเอียดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมจะลดลง เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ที่อายุ 90 วัน มีการแทรกซึม

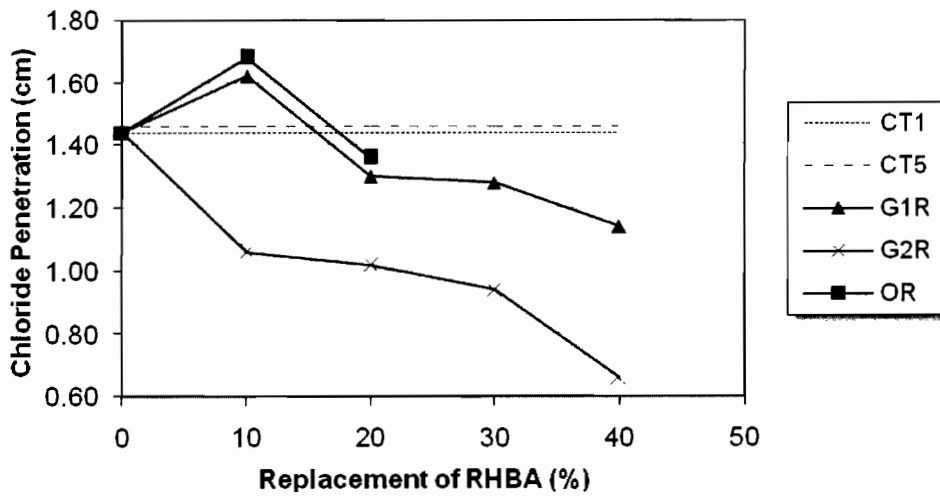
คลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับ 1.62, 1.30, 1.38 และ 1.14 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 113, 90, 96 และ 79 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และที่อายุ 360 วัน คอนกรีต GIR มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับ 2.44, 2.02, 1.86, 1.74 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 57, 47, 43 และ 41 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราการแทนที่แนวโน้มนี้นี้กล่าวเป็นเพราะระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยการบดให้มีความละเอียดมากมีประสิทธิภาพในการลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตลงได้ โดยพิจารณาจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดมาก พบว่าคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันเท่ากับ 1.06, 1.02, 0.94 และ 0.66 เซนติเมตร หรือมีอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 74, 71, 65 และ 46 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 360 วันโดยมีค่าเท่ากับ 1.80, 1.72, 1.40 และ 0.92 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับร้อยละ 42, 40, 33 และ 21 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ แสดงว่าความละเอียดมีผลต่ออัตราการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตอย่างมากโดยเฉพาะคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูง นอกจากนี้คอนกรีต G2R10 และ G2R20 มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วัน แม้ว่าค่า W/B ของคอนกรีต G2R ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม อาจเป็นเพราะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความต้องการน้ำสูงเนื่องจากมีค่า LOI ก่อนข้างสูง แต่การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า W/B เพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และความต่อเนื่องของโพรงในเนื้อคอนกรีตด้วย (Neville, 1995) และที่สำคัญคือขึ้นกับวัสดุปอซโซลานที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต

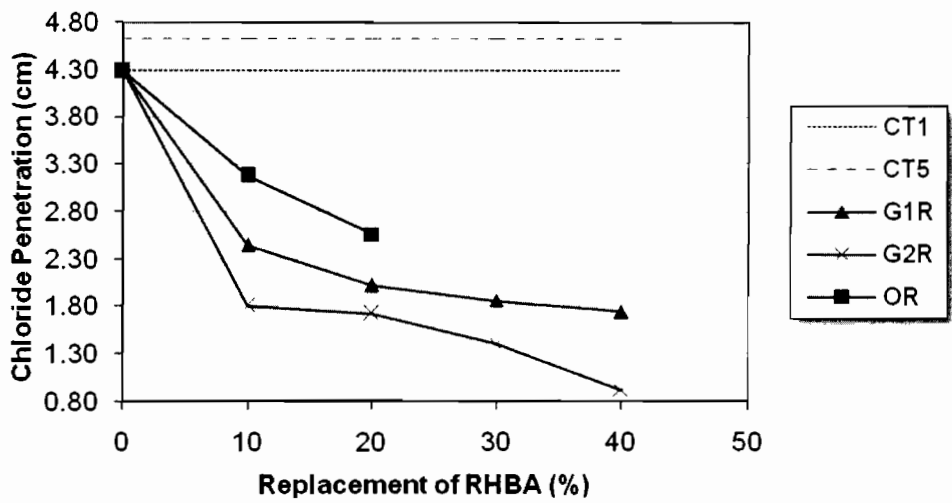
ตารางที่ 4.4 การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและอัตราส่วนของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมเส้นใยแก้ว-เปลือกไม้และเส้นใยปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1

Sample	Chloride Penetration (cm) - (Normalized Chloride Penetration to CT1, %)	
	90 days	360 days
CT1	1.44 (100)	4.28 (100)
CT5	1.46 (99)	4.62 (108)
OR10	1.68 (117)	3.18 (74)
OR20	1.36 (94)	2.56 (60)
G1R10	1.62 (113)	2.44 (57)
G1R20	1.30 (90)	2.02 (47)
G1R30	1.38 (96)	1.86 (43)
G1R40	1.14 (79)	1.74 (41)
G2R10	1.06 (74)	1.80 (42)
G2R20	1.02 (71)	1.72 (40)
G2R30	0.94 (65)	1.40 (33)
G2R40	0.66 (46)	0.92 (21)
OP10	2.02 (140)	3.52 (82)
OP20	1.98 (138)	2.70 (63)
G1P10	1.94 (135)	2.94 (69)
G1P20	1.72 (119)	2.12 (50)
G1P30	1.32 (92)	2.08 (49)
G1P40	1.26 (88)	1.56 (36)
G2P10	1.58 (110)	1.98 (46)
G2P20	1.30 (90)	1.58 (37)
G2P30	1.30 (90)	1.40 (33)
G2P40	0.82 (57)	1.12 (26)

รูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ความละเอียดต่างๆ ที่อายุ 90 และ 360 วันตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มากขึ้นการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจะลดลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้รับการปรับปรุงขนาดให้มีความละเอียดจนมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ แม้ความต้องการน้ำยังสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น แต่ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้นซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตลดลง

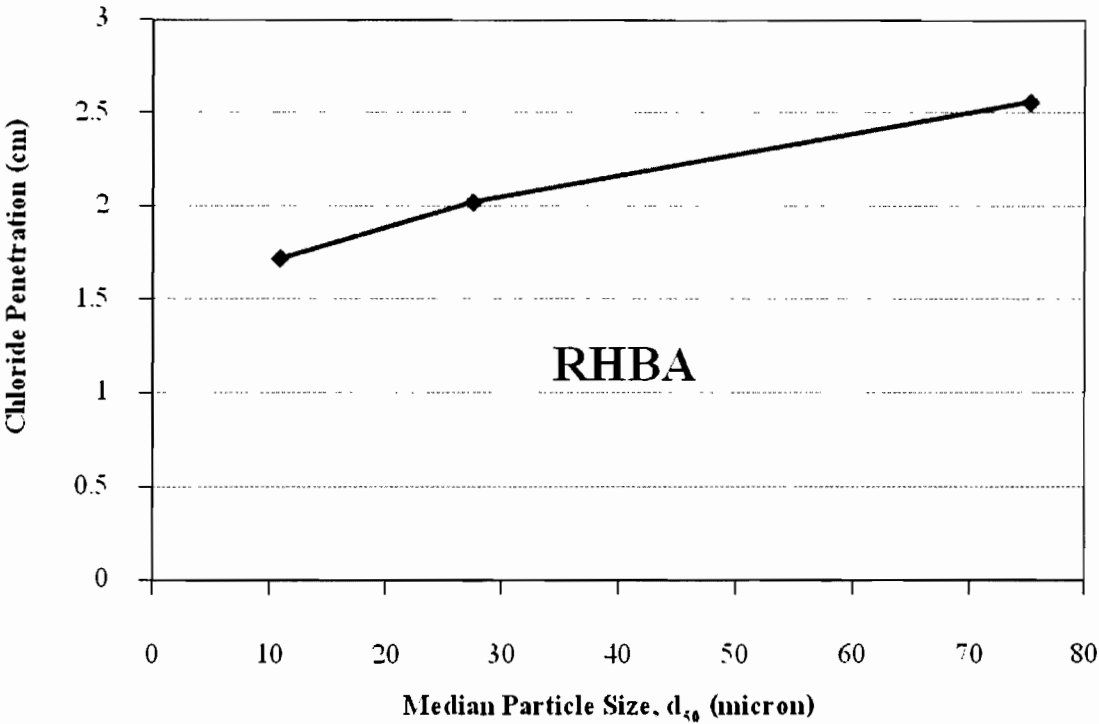


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตและ ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 360 วัน

การเพิ่มความละเอียดให้กับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 ที่ อายุ 360 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่เท่ากันแต่ขนาดต่างกันทำให้การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่างกัน โดยที่คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกอนุภาคขนาดเล็กมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้อนุภาคขนาดใหญ่กว่า แสดงว่าอนุภาคเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่เล็กลงสามารถอุดตามช่องว่างในคอนกรีต เพิ่มความแน่นและทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ (2005) ที่พบว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินขนาดเล็กในเพสต์ อีกทั้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้อนุภาคเล็กสามารถดักจับคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ดีกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้อนุภาคหยาบ ดังนั้นการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 ที่ อายุ 360 วัน

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่และความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน
ต่อการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

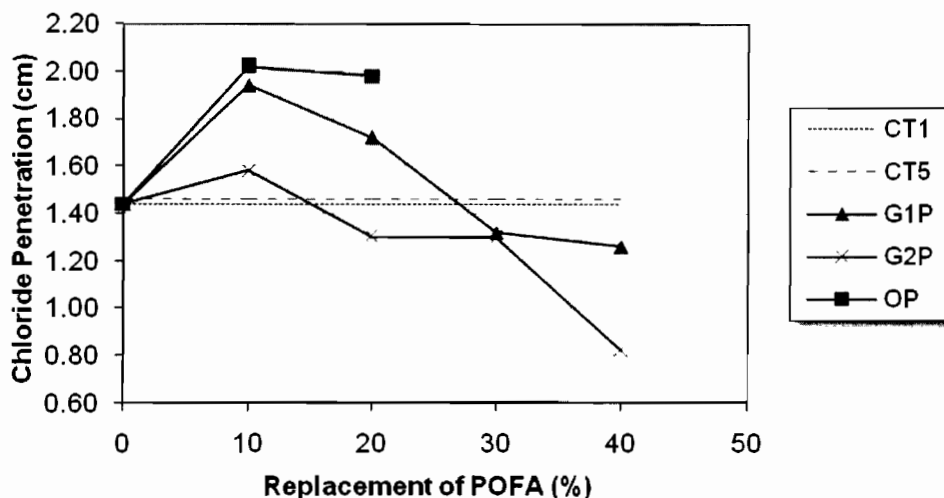
เมื่อพิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตในตารางที่ 4.4 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OP) ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีผลในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงกล่าวคือที่อายุ 90 วันคอนกรีต OP10 และ OP20 มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับ 2.02 และ 1.98 เซนติเมตร หรือมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 140 และ 138 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วันเท่ากับ 3.52 และ 2.70 เซนติเมตร หรือมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับร้อยละ 82 และ 63 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่อายุ 90 วัน คอนกรีต OP มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน แต่สามารถพัฒนาให้มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตลดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 360 วัน ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อเวลาผ่านไปปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มขึ้นสามารถพัฒนาให้

คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต OP มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำลงเมื่ออัตราการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตมากขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 360 วัน พบว่า การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP มากขึ้น

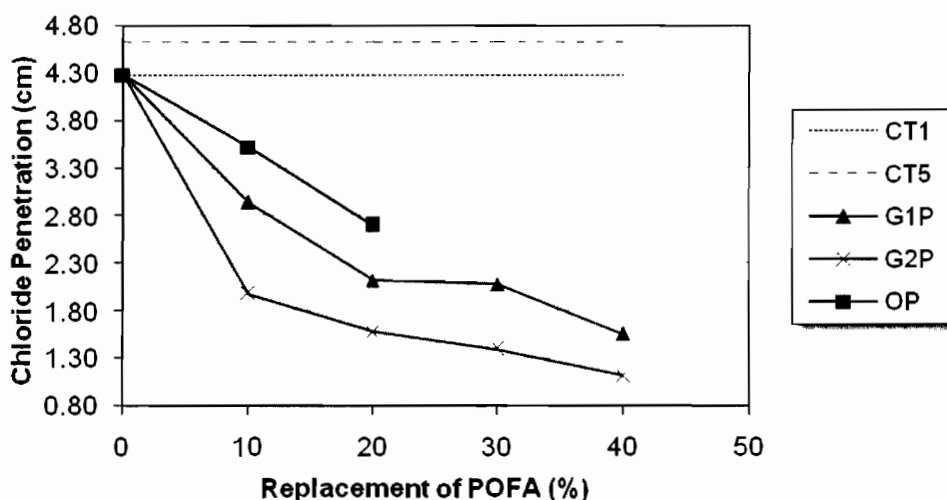
ส่วนคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดปานกลาง (G1P) ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่าการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันเท่ากับ 1.94, 1.72, 1.32 และ 1.26 เซนติเมตร หรือมีร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 135, 119, 92 และ 88 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่ออายุเพิ่มเป็น 360 วันมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเท่ากับ 2.94, 2.12, 2.08 และ 1.96 หรือมีร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 69, 50, 49 และ 36 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกการแทนที่ แม้ว่าที่อายุ 90 วันยังมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ร้อยละ 10 และ 20 และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราร้อยละ 30 และ 40 สามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าให้ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 90 วัน แสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P แทนที่ในปูนซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตมีความแน่น และทึบน้ำมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง

คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วันเท่ากับ 1.58, 1.30, 1.30 และ 0.82 หรือมีร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 110, 90, 90 และ 57 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และที่อายุ 360 วันคอนกรีตดังกล่าวสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์ให้ต่ำลงเท่ากับ 1.98, 1.58, 1.40 และ 1.12 หรือมีร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 46, 37, 33 และ 26 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 90 และ 360 วัน แม้ว่าจะมีความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีตดังกล่าวยังสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ และแนวโน้มของการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตคล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P คือสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมเมื่อมีอายุมากขึ้น และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีอัตราการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P ในทุกอัตราการแทนที่



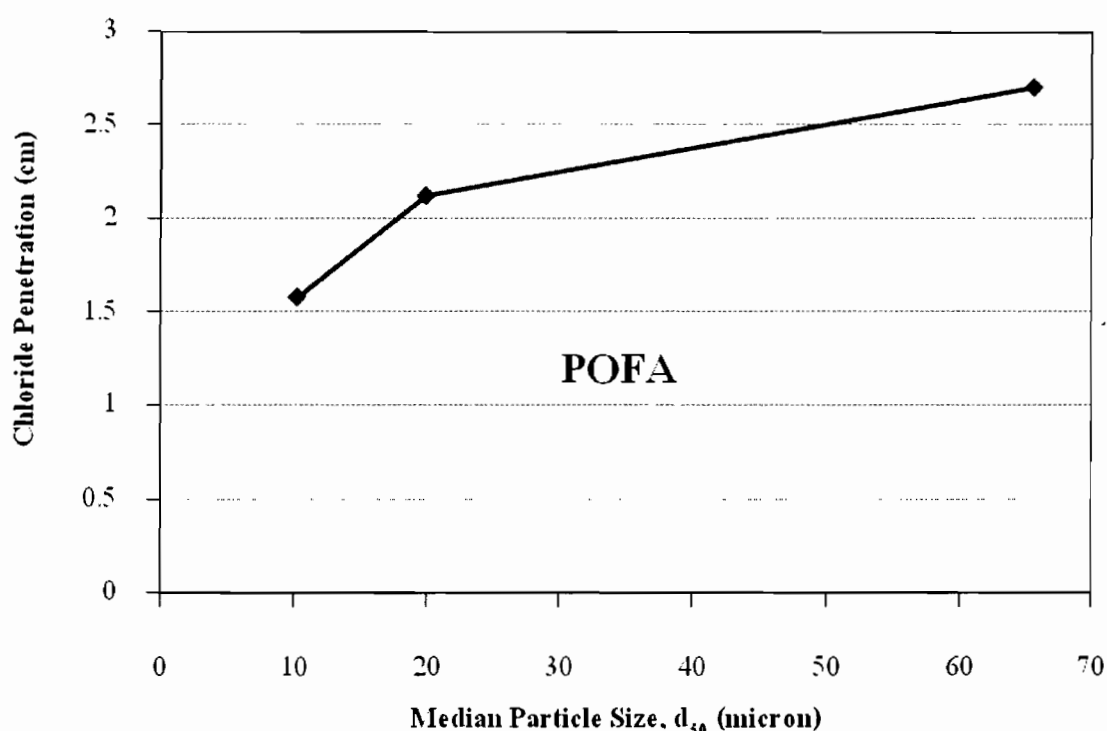
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต และร้อยละการแทนที่ของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต และร้อยละการแทนที่ของเถ้าปลาล์มน้ำมันที่อายุ 360 วัน

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าปลาล์มน้ำมันและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต คล้ายกับกรณีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ดังรูปที่ 4.23 กล่าวคือคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า ปลาล์มน้ำมันขนาดเล็กลง พบว่ามีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำลง เพราะอนุภาคเถ้าปลาล์มน้ำมันที่เล็กลงสามารถอุดตามช่องว่างในคอนกรีต เพิ่มความแน่นและทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำมันขึ้น

อีกทั้งถ้าปาล์มน้ำมันอนุภาคขนาดเล็กสามารถดักจับคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตได้ดีกว่าถ้าปาล์มน้ำมันอนุภาคขนาดใหญ่ แสดงว่าการบดสามารถเพิ่มคุณภาพทั้งถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันได้เป็นอย่างดี ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Chindaprasit และคณะ (2007) ที่พบว่า การแทนที่ถ้าเกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดโดยมีร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 และแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 40 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 20 ที่ อายุ 360 วัน

4.6 การเปรียบเทียบถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 40 พบว่าที่อายุ 360 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมถ้าเกลบเปลือกไม้สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่า 361 และ 330 กก/ซม² ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 94 และ 89 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ การนำถ้าทั้งสองมาบดให้ละเอียดจนมีขนาดพอๆกันและแทนที่

ปูนซีเมนต์ในอัตราที่เท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 10

การแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 40 พบว่าที่อายุ 360 วัน การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่า 0.92 และ 1.12 เซนติเมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 21 และ 26 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เห็นได้ว่านอกจากกำลังอัดแล้วคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ยังมีคุณภาพด้านการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่ทั้งนี้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดยังสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงคอนกรีตควบคุมและด้านการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 40 ที่อายุ 360 วัน

Ash	Compressive Strength (ksc) - (Normalized Strength to CT1, %)	Chloride Penetration (cm) - (Normalized Chloride Penetration to CT1, %)
RBHA (G2R)	361 (94)	0.92 (21)
POFA (G2P)	330 (86)	1.12 (26)

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OR และ OP) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 พบว่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และมีแนวโน้มต่ำลงมากเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้น คอนกรีต OR และ OP ยังมีการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ถึงแม้ว่าที่อายุ 360 วัน คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ทางด้านกำลังอัดยังถือว่ามีความต่ำกว่ามาก ดังนั้นเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุป่อขโซลานในงานคอนกรีต

5.1.2 การปรับปรุงขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีขนาดเล็กลง เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าและการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง

5.1.3 การเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงที่อายุต้น แต่สามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้เมื่ออายุมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หรือเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น

5.1.4 เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัด และการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้มากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดปานกลาง (G1R) แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในอัตราร้อยละ 10 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมาก (G2R) แทนที่ได้ถึงร้อยละ 40 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมาก (G2P) สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยไม่ทำให้คุณสมบัติทางด้านกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และยังเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่าความละเอียดที่สูงขึ้นของถ้ำเกลบ-เปลือกไม้และถ้ำปาล์มน้ำมันสามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและสามารถลดการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้ ดังนั้นหากสามารถพัฒนาให้ถ้ำเกลบ-เปลือกไม้และถ้ำปาล์มน้ำมันมีความละเอียดสูงจะสามารถใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากๆ ซึ่งเป็นการนำถ้ำเกลบ-เปลือกไม้และถ้ำปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์มากขึ้นด้วย

5.2.2 การใช้คอนกรีตในสถานะเสี่ยงต่อการละลายคลอไรด์ควรพิจารณาคุณสมบัติอื่นเพิ่มเติม นอกจากกำลังอัด โดยเฉพาะการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพราะการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังอัดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับชนิดของถ้ำความละเอียด และร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ต้องนำมาพิจารณาเมื่อต้องใช้คอนกรีตในสถานะเสี่ยงต่อการละลายคลอไรด์

เอกสารอ้างอิง

จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548, “การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ฉบับที่ 28 : หน้า 465-476.

จักพล กลั่นมันคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, 2543, การศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 52-53.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และสุรพันธ์ สุคันปรีช, 2545, “การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในการงานคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, หน้า (MAT-163)-(MAT-172).

ณัฐพงษ์ มกระธัช, 2547, การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 44-45.

ดิลก กุรัตนเวช, สหลาก หอมวุฒิพงศ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและปริญญา จินดาประเสริฐ, 2545. “ผลกระทบของเถ้าถ่านหินที่มีต่อค่าการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, ชลบุรี, หน้า (MAT-55)-(MAT-60)

ธวัชชัย สาสกุล, 2550, กำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่แช่น้ำทะเล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 38-64.

ประกาศ ทองประไพ, 2541, ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำล้างอัดและการขยายตัวของวัสดุซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 95-96.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ ไขศรี, 2548, “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, หน้า MAT 49-54.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 5, สมาคมคอนกรีตไทย, หน้า 331-342.

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2546, การศึกษากำล้างอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปล้นน้ำมันและการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปล้นน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 143-145.

วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, “การใช้เถ้าปล้นน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง”, วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, พ.ศ. 2546, หน้า 27-32

สุรพันธ์ สุกันปรี, ชรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, “การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปล้นน้ำมันในงานคอนกรีต”, การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, “การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต”, วารสารวิจัยและพัฒนา สจร., ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 51-76

เอนก ศิริพานิชกร, 2536, “การพัฒนาคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี”, เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าถ่านหิน

ดิทินต์มาใช้ประโยชน์, สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 27-28 เมษายน, หน้า (8-1) - (8-18)

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

Al-Hussaini, M.J., et al., 1990, "The Effect of Chloride Ion Source on the Free Chloride Ion Percentages of OPC Motars", **Cement and Concrete Research**, Vol. 20, No. 5, pp. 739-745.

American Society for Testing and Materials, 2009, "ASTM C 150/C 150M : Standard Specification for Portland Cement", In **1997 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 149-155.

American Society for Testing and Materials, 2009, "ASTM C 188 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", In **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 179-180.

American Society for Testing and Materials, 2008, "ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", In **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM : pp. 310-313.

Bai, J., Wild, S. and Sabir, B.B., 2003 "Chloride Ingress and Strength Loss in Concrete with Difference PC-PFA-MK Binder Compositions Exposed to Synthetic Seawater", **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, No. 3, pp. 353-362.

Berg, W.V. and Kukko, H., 1991, "Fresh Mortar and Concrete with Fly Ash. In : Wesche, K. (Ed.)", **Fly Ash in Concrete Properties and Performance, RILEM Report**, Vol. 7, pp. 39-41.

Chindaprasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H.T. and Sirivivatnanon, V., 2007, "Influence of Fly Ash Fineness on the Chloride Penetration of Concrete", **Construction and Building Materials**, Vol. 21, No. 2, pp. 356-361.

Chindaprasirt, P., Rokzon, S. and Sirivivatnanon. V., 2008, "Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash", **Construction and Building Material**, Vol. 22, No. 5, pp. 932-938.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 27, pp. 425-428.

Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K. and Dyer T.D., 1997, "Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA", **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, No. 11, pp. 1633-1639.

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.

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.

Ikpong, A.A., 1993, "The Relationship between the Strength Characteristics of Medium Workability Ordinary Portland Cement-Rice Husk Ash Concrete", **Building and Environment**, Vol. 27, pp. 105-111.

Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R., 2003, "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.

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.

Ismail, M.S. and Waliuddin, A.M., 1996, "Effect of Rice Husk Ash on High Strength Concrete", **Construction and Building Materials**, Vol. 10, pp. 521-526.

Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B., 2003, "Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash", **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, Vol. 15, pp. 470-475.

Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", **Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE**, Vol. 15, pp. 48-54.

Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, "Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash", **Construction and Building Materials**, Vol. 21, pp. 1399-1405.

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

Makaratat, N., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Kraiwood, K., and Siripanichgorn A., 2004. Utilization of Rice Husk-Bark Ash as a Cement Replacement. **Proceedings of the First International Conference of the Asian Concrete Federation**, Thailand, Chiang Mai : pp.650-659.

Neville, A.M., 1995, **Properties of Concrete**, 4th ed., Prentice Hall, London, pp. 269-317.

Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., and Mora, P.E., 1997, "Mechanical Treatments of Fly Ashes Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, pp. 1365-1377.

Shiqun, L. and Della, M.R., 1986, "Investigation of Relations between Porosity, Pore Structure, and Cl⁻ Diffusion of Fly Ash and Blended Cement Pastes", **Cement and Concrete Research**, Vol. 16, pp. 749-759.

Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of waste ash from palm oil industry in concrete", **Waste Management**, Vol.27, pp.81-88.

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

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.

Tomas, M.D.A. and Matthews, J.D., 2004, "Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, No. 1, pp. 5-20.

Zhang, M.H., Lastra, R. and Malhotra, V.M., 1996, "Rice-Husk Ash Paste and Concrete: Some Aspects of Hydration and the Microstructure of the Interfacial Zone between the Aggregate and Paste", **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, pp. 963-977.

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT1

Specimen : CT1 Date of Casting : 12/9/2006 W / B = 0.7 Slump = 7.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	21/9/2006	1	3.80	9.95	20.10	77.72	15454	198.84	205
		2	3.75	9.89	19.90	76.78	16983	221.18	
		3	3.74	9.93	19.90	77.40	15158	195.83	
28	10/10/2006	1	3.90	9.98	20.04	78.19	23038	294.65	299
		2	3.78	9.93	20.06	77.40	22426	289.72	
		3	3.78	9.95	20.09	77.72	24220	311.65	
90	11/12/2006	1	3.81	9.97	19.93	78.03	23609	302.56	339
		2	3.79	9.99	20.10	78.34	25423	324.51	
		3	3.82	9.99	20.00	78.34	27676	353.26	
360	12/9/2007	1	3.75	10.00	20.00	78.50	30143	383.98	384
		2	3.76	9.97	20.15	78.03	30306	388.39	
		3	3.76	9.97	20.00	78.03	29766	379.18	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต CT5

Specimen : CT5 Date of Casting : 11/9/2006 W / B = 0.7 Slump = 6.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	20/9/2006	1	3.71	9.99	20.01	78.34	15331	195.69	192
		2	3.75	10.05	20.05	79.29	15291	192.85	
		3	3.80	10.13	20.06	80.55	15025	186.53	
28	9/10/2006	1	3.73	10.01	20.04	78.66	22457	285.50	285
		2	3.81	10.07	20.18	79.60	23089	290.05	
		3	3.81	10.05	20.15	79.29	22171	279.63	
90	10/12/2006	1	3.83	10.17	20.13	81.19	28084	345.89	348
		2	3.77	10.09	20.20	79.92	27961	349.87	
		3	3.75	10.07	19.96	79.60	27757	348.70	
360	11/9/2007	1	3.74	9.98	20.04	78.19	32161	411.34	414
		2	3.72	9.96	20.18	77.87	34526	443.36	
		3	3.71	9.97	20.15	78.03	30275	388.00	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR10

Specimen : OR10 Date of Casting : 20/9/2006 W / B = 0.75 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	27/9/2006	1	3.71	10.10	19.98	80.08	14241	177.83	170
		2	3.80	10.10	19.95	80.08	13476	168.29	
		3	3.65	10.12	20.00	80.40	13129	163.31	
28	18/10/2006	1	3.72	9.98	20.00	78.19	17880	228.68	235
		2	3.74	9.97	20.00	78.03	18298	234.50	
		3	3.80	9.98	22.00	78.19	18909	241.85	
90	19/12/2006	1	3.75	10.00	19.95	78.50	21111	268.93	278
		2	3.77	10.04	20.00	79.13	22426	283.41	
		3	3.76	10.01	19.95	78.66	22202	282.26	
360	20/9/2007	1	3.85	10.02	20.30	78.81	27594	350.12	358
		2	3.75	10.00	20.10	78.50	28002	356.71	
		3	3.75	10.00	20.10	78.50	28828	367.23	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR20

Specimen : OR20 Date of Casting : 20/9/2006 W / B = 0.81 Slump = 7.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	27/9/2006	1	3.68	9.96	19.99	77.87	9735	125.01	126
		2	3.68	9.99	19.99	78.34	9501	121.27	
		3	3.69	10.00	19.97	78.50	10449	133.10	
28	18/10/2006	1	3.70	10.09	19.00	79.92	15586	195.02	197
		2	3.69	9.92	21.50	77.25	15138	195.96	
		3	3.67	9.99	10.00	78.34	15637	199.60	
90	19/12/2006	1	3.86	10.23	19.85	82.15	20061	243.82	245
		2	3.69	10.00	19.85	78.50	19562	249.19	
		3	3.72	10.03	20.00	78.97	19093	241.77	
360	20/9/2007	1	3.75	10.08	20.20	79.76	23119	289.86	299
		2	3.68	9.97	20.00	78.03	22824	292.50	
		3	3.76	10.08	20.20	79.76	25036	313.88	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R10

Specimen : G1R10 Date of Casting : 30/9/2006 W / B = 0.74 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	6/10/2006	1	3.80	10.02	20.50	78.81	14760	187.28	189
		2	3.80	10.00	21.00	78.50	13028	165.96	
		3	3.80	9.98	20.00	78.19	14944	191.13	
28	27/10/2006	1	3.81	10.02	21.00	78.81	19541	247.94	265
		2	3.73	10.00	19.50	78.50	22192	282.70	
90	28/12/2006	1	3.78	10.03	20.15	78.97	25240	319.60	327
		2	3.89	10.03	20.20	78.97	27380	346.71	
		3	3.76	10.09	20.05	79.92	26758	334.82	
360	30/9/2007	1	3.80	10.08	20.00	79.76	31651	396.83	405
		2	3.81	10.02	20.10	78.81	31927	405.09	
		3	3.78	10.01	20.10	78.66	32457	412.64	

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R20

Specimen : G1R20 Date of Casting : 30/9/2006 W / B = 0.74 Slump = 7.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	6/10/2006	1	3.80	10.03	20.05	78.97	14536	184.07	179
		2	3.80	10.00	21.00	78.50	14067	179.20	
		3	3.70	10.05	20.00	79.29	13670	172.41	
28	27/10/2006	1	3.76	10.04	20.00	79.13	20734	262.03	271
		2	3.75	10.03	19.90	78.97	22080	279.59	
90	28/12/2006	1	3.76	10.05	20.02	79.29	25331	319.49	319
		2	3.76	9.98	20.00	78.19	25331	323.99	
		3	3.74	9.93	20.00	77.40	24190	312.51	
360	30/9/2007	1	3.76	9.97	19.90	78.03	29582	379.11	362
		2	3.79	10.15	20.10	80.87	27737	342.97	
		3	3.79	10.00	20.10	78.50	28552	363.73	

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R30

Specimen : G1R30 Date of Casting : 24/9/2006 W / B = 0.75 Slump = 7.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	1/10/2006	1	3.72	9.92	20.00	77.25	11019	142.65	147
		2	3.68	9.99	20.00	78.34	11060	141.18	
		3	3.69	9.99	19.90	78.34	12385	158.09	
28	22/10/2006	1	3.62	9.95	19.90	77.72	18675	240.29	243
		2	3.75	10.03	21.00	78.97	19123	242.15	
		3	3.69	10.00	20.00	78.50	19327	246.21	
90	19/12/2006	1	3.75	10.08	20.15	79.76	22997	288.32	279
		2	3.67	9.98	20.00	78.19	22834	292.04	
		3	3.76	10.10	20.20	80.08	20540	256.50	
360	24/9/2007	1	3.71	10.00	19.90	78.50	25076	319.45	323
		2	3.72	10.00	20.00	78.50	26096	332.43	
		3	3.81	10.07	20.20	79.60	25138	315.79	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R40

Specimen : G1R40 Date of Casting : 24/9/2006 W / B = 0.77 Slump = 6.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	1/10/2006	1	3.71	10.06	20.10	79.44	8410	105.86	129
		2	3.74	10.09	20.19	79.92	10663	133.42	
		3	3.71	10.07	20.16	79.60	9867	123.96	
28	22/10/2006	1	3.72	10.04	21.00	79.13	17166	216.94	206
		2	3.79	10.07	23.00	79.60	15912	199.90	
		3	3.71	9.96	21.00	77.87	16575	212.84	
90	19/12/2006	1	3.72	10.12	20.10	80.40	21376	265.89	265
		2	3.66	10.10	19.95	80.08	21050	262.87	
		3	3.66	10.00	19.95	78.50	20979	267.24	
360	24/9/2007	1	3.66	9.97	19.90	78.03	21560	276.30	288
		2	3.71	9.97	20.00	78.03	23078	295.77	
		3	3.71	10.02	20.20	78.81	23119	293.34	

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R10

Specimen : G2R10 Date of Casting : 6/10/2006 W / B = 0.69 Slump = 6.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	14/10/2006	1	3.81	9.92	21.00	77.25	19113	247.42	241
		2	3.77	9.98	20.50	78.19	18838	240.94	
		3	3.78	10.01	19.90	78.66	18491	235.09	
28	4/11/2006	1	3.81	10.01	19.80	78.66	28420	361.31	345
		2	3.77	9.98	20.00	78.19	25872	330.90	
		3	3.77	9.99	19.90	78.34	26860	342.86	
90	5/1/2007	1	3.75	9.93	20.10	77.40	30122	389.15	392
		2	3.81	9.91	20.25	77.09	30183	391.52	
		3	3.79	9.90	19.95	76.94	30408	395.22	
360	6/10/2007	1	3.78	9.95	19.90	77.72	36045	463.80	422
		2	3.73	10.01	19.80	78.66	31947	406.16	
		3	3.83	10.16	20.00	81.03	32130	396.52	

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R20

Specimen : G2R20 Date of Casting : 6/10/2006 W / B = 0.71 Slump = 7.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	14/10/2006	1	3.76	10.03	20.00	78.97	16463	208.46	214
		2	3.74	9.98	20.00	78.19	16820	215.12	
		3	3.81	10.09	20.50	79.92	17482	218.75	
28	4/11/2006	1	3.79	10.00	20.05	78.50	24781	315.68	309
		2	3.83	10.05	20.00	79.29	24322	306.76	
		3	3.74	10.00	19.90	78.50	23802	303.21	
90	5/1/2007	1	3.75	10.10	19.90	80.08	28318	353.63	361
		2	3.87	10.05	20.00	79.29	28716	362.17	
		3	3.93	10.08	19.90	79.76	29246	366.67	
360	6/10/2007	1	3.76	10.02	20.00	78.81	31182	395.64	410
		2	3.78	10.08	20.20	79.76	32977	413.44	
		3	3.79	10.00	20.10	78.50	33119	421.90	

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R30

Specimen : G2R30 Date of Casting : 3/10/2006 W / B = 0.71 Slump = 6.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	10/10/2006	1	3.71	10.00	19.90	78.50	14709	187.38	183
		2	3.72	10.00	20.30	78.50	14587	185.82	
		3	3.70	10.00	20.20	78.50	13721	174.79	
28	31/10/2006	1	3.78	10.01	20.00	78.66	23874	303.51	294
		2	3.72	10.04	20.00	79.13	22518	284.57	
		3	3.70	10.02	19.90	78.81	15770	200.09	
90	30/12/2006	1	3.74	10.00	20.00	78.50	26157	333.21	334
		2	3.69	9.99	20.00	78.34	26096	333.10	
		3	3.72	9.97	20.10	78.03	26198	335.74	
360	3/10/2007	1	3.74	10.17	20.10	81.19	29674	365.48	377
		2	3.71	10.01	20.10	78.66	30938	393.33	
		3	3.68	10.01	20.00	78.66	29358	373.24	

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R40

Specimen : G2R40 Date of Casting : 3/10/2006 W / B = 0.72 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	10/10/2006	1	3.71	10.02	20.00	78.81	13914	176.55	178
		2	3.70	10.03	20.10	78.97	14495	183.55	
		3	3.70	10.02	20.10	78.81	13629	172.92	
28	31/10/2006	1	3.72	10.04	20.00	79.13	22212	280.71	281
		2	3.82	10.15	20.00	80.87	22742	281.21	
		3	3.71	10.06	20.10	79.44	22375	281.64	
90	30/12/2006	1	3.73	10.06	20.20	79.44	26340	331.56	324
		2	3.78	10.11	20.30	80.24	25708	320.41	
		3	3.78	10.08	20.20	79.76	25617	321.17	
360	3/10/2007	1	3.73	10.10	20.00	80.08	27859	347.90	361
		2	3.72	10.04	20.20	79.13	29235	369.46	
		3	3.70	10.01	20.00	78.66	28665	364.43	

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10

Specimen : OP10 Date of Casting : 12/10/2006 W / B = 0.72 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	12/10/2006	1	3.80	10.03	21.00	78.97	12977	164.32	160
		2	3.76	10.07	21.50	79.60	12283	154.31	
		3	3.77	10.00	20.00	78.50	12712	161.93	
28	9/11/2006	1	3.74	10.05	20.00	79.29	18695	235.79	237
		2	3.79	10.02	20.10	78.81	19256	244.32	
		3	3.72	10.06	20.00	79.44	18359	231.09	
90	10/01/2007	1	3.77	10.08	19.90	79.76	21427	268.64	271
		2	3.73	9.97	20.00	78.03	21233	272.12	
		3	3.77	10.12	20.15	80.40	21978	273.37	
360	12/10/2007	1	3.85	10.10	20.10	80.08	29052	362.80	346
		2	3.85	10.09	20.40	79.92	27054	338.52	
		3	3.79	10.00	20.00	78.50	26330	335.42	

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20

Specimen : OP20 Date of Casting : 12/10/2006 W / B = 0.77 Slump = 7.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	12/10/2006	1	3.67	10.08	19.90	79.76	11009	138.03	137
		2	3.72	10.00	20.10	78.50	10530	134.14	
		3	3.82	10.00	20.50	78.50	10928	139.21	
28	9/11/2006	1	3.65	10.08	20.00	79.76	15933	199.76	206
		2	3.80	10.05	20.10	79.29	16677	210.34	
		3	3.70	10.03	20.00	78.97	16483	208.72	
90	10/01/2007	1	3.70	10.00	20.00	78.50	18420	234.65	236
		2	3.74	10.00	20.15	78.50	19307	245.95	
		3	3.72	10.02	20.10	78.81	17859	226.60	
360	12/10/2007	1	3.73	10.02	20.20	78.81	24404	309.63	316
		2	3.71	9.97	20.00	78.03	25311	324.38	
		3	3.74	9.97	20.10	78.03	24546	314.58	

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10

Specimen : G1P10 Date of Casting : 20/10/2006 W / B = 0.72 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	27/10/2006	1	3.82	10.03	22.00	78.97	15382	194.78	192
		2	3.73	10.00	19.50	78.50	15341	195.43	
		3	3.64	10.00	20.00	78.50	14485	184.53	
28	17/11/2006	1	3.79	10.02	20.00	78.81	22630	287.13	280
		2	3.75	9.97	20.00	78.03	21814	279.57	
		3	3.75	9.98	20.20	78.19	21335	272.88	
90	18/01/2007	1	3.79	9.96	20.10	77.87	25454	326.86	331
		2	3.77	9.99	20.00	78.34	25841	329.84	
		3	3.85	10.05	20.15	79.29	26748	337.36	
360	20/10/2007	1	3.84	10.02	20.20	78.81	29480	374.05	375
		2	3.75	9.98	20.00	78.19	29052	371.57	
		3	3.76	9.97	20.00	78.03	29613	379.50	

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต GIP20

Specimen : GIP20 Date of Casting : 20/10/2006 W / B = 0.73 Slump = 9.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	27/10/2006	1	3.75	9.99	19.00	78.34	13761	175.66	175
		2	3.79	9.96	21.50	77.87	13700	175.93	
		3	3.76	10.01	23.00	78.66	13680	173.92	
28	17/11/2006	1	3.76	9.97	20.10	78.03	19766	253.31	249
		2	3.81	10.00	20.20	78.50	19327	246.21	
		3	3.80	10.00	20.20	78.50	19358	246.60	
90	18/01/2007	1	3.76	9.94	20.05	77.56	22426	289.14	294
		2	3.67	9.94	19.80	77.56	22742	293.22	
		3	3.78	10.00	20.10	78.50	23507	299.45	
360	20/10/2007	1	3.76	10.10	19.90	80.08	25790	322.06	335
		2	3.73	9.96	19.90	77.87	26086	334.98	
		3	3.80	10.06	20.00	79.44	27574	347.08	

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30

Specimen : G1P30 Date of Casting : 16/10/2006 W / B = 0.73 Slump = 8.0 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	23/10/2006	1	3.78	10.07	20.05	79.60	12528	157.38	160
		2	3.77	10.05	20.00	79.29	13068	164.82	
		3	3.72	10.01	19.90	78.66	12406	157.72	
28	13/11/2006	1	3.78	10.06	20.00	79.44	17584	221.34	227
		2	3.73	9.98	20.20	78.19	18012	230.38	
		3	3.78	10.08	19.90	79.76	18328	229.79	
90	14/01/2007	1	3.75	9.93	20.10	77.40	20887	269.84	269
		2	3.78	10.01	20.10	78.66	21621	274.87	
		3	3.75	10.00	20.10	78.50	20510	261.27	
360	16/10/2007	1	3.72	9.99	20.00	78.34	23374	298.36	310
		2	3.75	10.06	20.20	79.44	25209	317.31	
		3	3.70	10.00	20.00	78.50	24648	313.99	

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40

Specimen : G1P40 Date of Casting : 16/10/2006 W / B = 0.74 Slump = 9.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	23/10/2006	1	3.77	10.04	20.05	79.13	10683	135.01	138
		2	3.77	10.01	20.00	78.66	11070	140.74	
28	13/11/2006	1	3.78	10.05	20.10	79.29	17207	217.02	203
		2	3.74	10.09	20.10	79.92	14577	182.40	
		3	3.74	10.03	20.10	78.97	16555	209.63	
90	14/01/2007	1	3.73	9.98	20.20	78.19	19582	250.45	246
		2	3.81	10.08	20.25	79.76	19083	239.25	
		3	3.72	10.00	20.00	78.50	19419	247.38	
360	16/10/2007	1	3.67	10.00	20.00	78.50	20285	258.41	267
		2	3.73	10.02	20.10	78.81	21478	272.52	
		3	3.70	10.00	20.00	78.50	21264	270.88	

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10

Specimen : G2P10 Date of Casting : 28/10/2006 W / B = 0.68 Slump = 5.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	4/11/2006	1	3.82	10.14	19.90	80.71	16962	210.15	210
		2	3.78	10.04	19.90	79.13	16850	212.94	
		3	3.83	10.02	20.00	78.81	16361	207.59	
28	25/11/2006	1	3.74	9.97	21.00	78.03	23680	303.47	303
		2	3.77	9.97	19.90	78.03	23863	305.82	
		3	3.81	10.09	20.00	79.92	23976	300.00	
90	26/01/2007	1	3.96	10.19	20.00	81.51	28889	354.42	358
		2	3.61	9.97	20.00	78.03	27625	354.03	
		3	3.70	9.97	19.95	78.03	28532	365.66	
360	28/10/2007	1	3.87	10.12	20.00	80.40	30968	385.20	396
		2	3.77	10.06	20.10	79.44	30336	381.85	
		3	3.80	10.04	20.10	79.13	33231	419.96	

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20

Specimen : G2P20 Date of Casting : 28/10/2006 W / B = 0.7 Slump = 6.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	4/11/2006	1	3.75	10.00	19.80	78.50	12650	161.15	197
		2	3.77	10.01	20.00	78.66	15770	200.49	
		3	3.72	10.01	19.80	78.66	15158	192.71	
28	25/11/2006	1	3.84	10.08	20.10	79.76	23293	292.03	293
		2	3.75	9.97	19.90	78.03	23017	294.98	
		3	3.82	9.99	20.00	78.34	22875	291.98	
90	26/01/2007	1	3.80	9.95	20.20	77.72	27625	355.45	344
		2	3.79	10.02	20.05	78.81	26014	330.07	
		3	3.78	10.01	20.15	78.66	27370	347.97	
360	28/10/2007	1	3.74	9.98	20.00	78.19	31284	400.13	383
		2	3.80	10.00	20.10	78.50	29388	374.37	
		3	3.81	10.04	20.00	79.13	29643	374.62	

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30

Specimen : G2P30 Date of Casting : 24/10/2006 W / B = 0.71 Slump = 7.5 cm.

Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	31/10/2006	1	3.70	10.07	19.90	79.60	14444	181.46	186
		2	3.74	10.06	19.90	79.44	15066	189.64	
		3	3.75	10.06	20.00	79.44	14903	187.59	
28	21/11/2006	1	3.75	9.95	20.10	77.72	21519	276.89	277
		2	3.75	10.00	20.00	78.50	22141	282.05	
		3	3.78	10.01	20.15	78.66	21427	272.41	
90	22/01/2007	1	3.77	10.00	20.00	78.50	25759	328.15	331
		2	3.74	9.99	19.95	78.34	26789	341.94	
		3	3.82	10.00	20.01	78.50	25372	323.21	
360	24/10/2007	1	3.73	10.00	20.10	78.50	28012	356.84	364
		2	3.75	10.02	20.00	78.81	27564	349.73	
		3	3.80	9.98	20.30	78.19	30112	385.13	

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40

Specimen : G2P40 Date of Casting : 24/10/2006 W / B = 0.72 Slump = 9.0 cm.

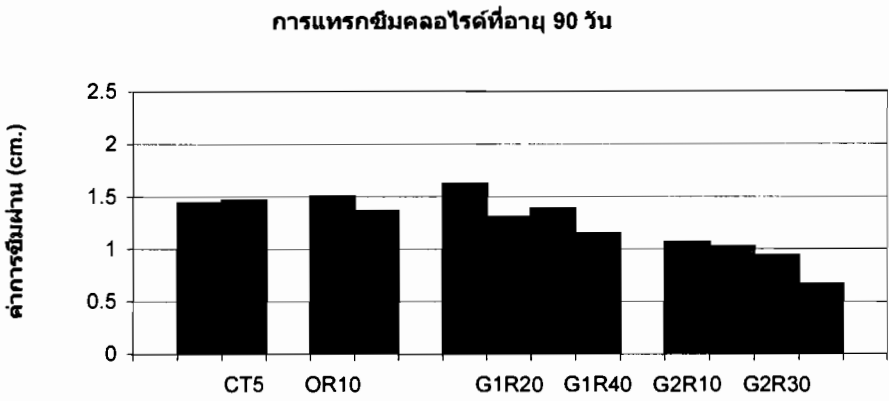
Age (days)	Test Date	No.	Weight (kg)	Dimension (cm)		Area (cm ²)	Load (kg)	Stress (ksc)	Average (ksc)
				Diameter	Height				
7	31/10/2006	1	3.75	10.06	19.90	79.44	13996	176.17	175
		2	3.77	10.06	20.00	79.44	13996	176.17	
		3	3.73	9.99	20.00	78.34	13537	172.79	
28	21/11/2006	1	3.76	10.10	19.95	80.08	21121	263.76	257
		2	3.75	10.15	20.00	80.87	20928	258.77	
		3	3.79	10.35	20.05	84.09	21009	249.84	
90	22/01/2007	1	3.83	10.07	20.03	79.60	24088	302.60	299
		2	3.76	10.06	20.00	79.44	23843	300.12	
		3	3.76	10.01	20.01	78.66	23150	294.31	
360	24/10/2007	1	3.76	10.05	19.90	79.29	26075	328.87	330
		2	3.69	10.02	19.80	78.81	25423	322.57	
		3	3.72	9.95	20.00	77.72	26208	337.22	

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน
ของตัวอย่าง CT, OR, G1R และ G2R

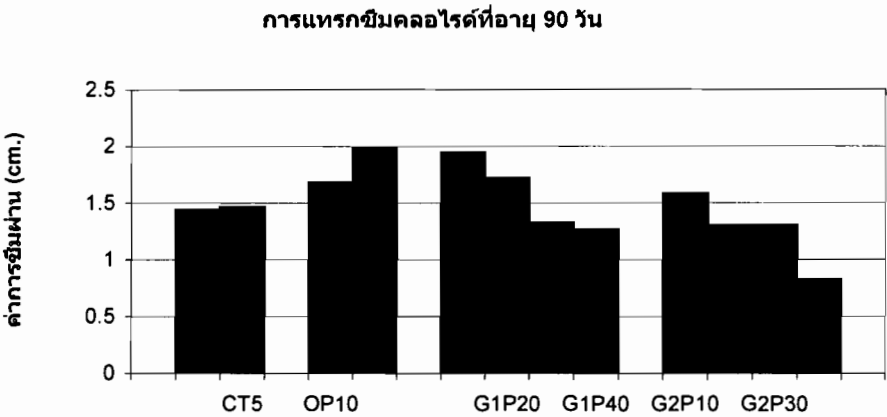
Sample	Date	Depth of Chloride Penetration (cm)					Average (cm)
		1	2	3	4	5	
CT1	11/12/2006	1.70	1.50	1.20	1.20	1.60	1.44
CT5	10/12/2006	1.70	1.30	1.60	1.40	1.30	1.46
OR10	19/12/2006	1.30	1.40	1.40	1.70	1.70	1.50
OR20	19/12/2007	1.30	1.60	1.50	1.10	1.30	1.36
G1R10	28/12/2006	1.60	1.50	1.80	1.50	1.70	1.62
G1R20	28/12/2006	1.30	1.30	1.20	1.30	1.40	1.30
G1R30	19/12/2006	1.70	1.20	1.30	1.30	1.40	1.38
G1R40	19/12/2006	1.30	1.20	1.10	1.00	1.10	1.14
G2R10	5/1/2007	1.40	1.10	0.90	1.00	0.90	1.06
G2R20	5/1/2007	1.20	1.10	1.20	0.90	0.70	1.02
G2R30	30/12/2006	1.10	1.00	0.80	0.90	0.90	0.94
G2R40	30/12/2006	0.80	0.60	0.60	0.60	0.70	0.66



รูปที่ ข.1 แสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน
ของตัวอย่าง CT, OR, G1R และ G2R

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน
ของตัวอย่าง CT, OP, G1P และ G2P

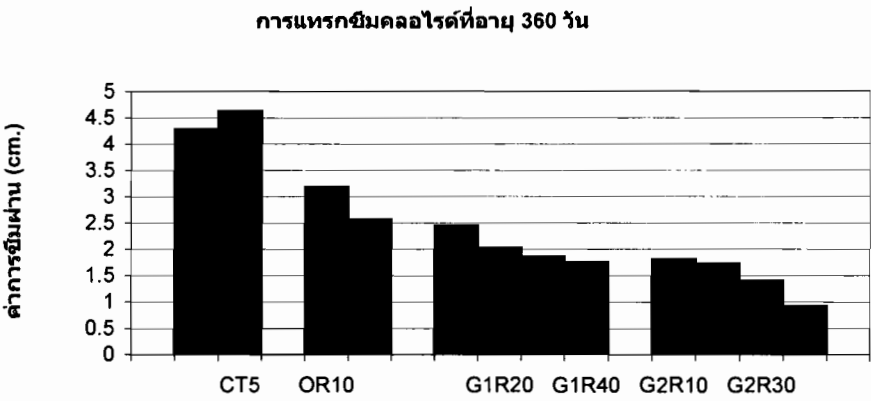
Sample	Date	Depth of Chloride Penetration (cm)					Average (cm)
		1	2	3	4	5	
CT1	11/12/2007	1.70	1.50	1.20	1.20	1.60	1.44
CT5	10/12/2007	1.70	1.30	1.60	1.40	1.30	1.46
OP10	10/1/2007	1.90	1.70	1.60	1.70	1.50	1.68
OP20	10/1/2007	2.00	2.00	2.10	2.00	1.80	1.98
G1P10	18/1/2007	2.10	1.80	1.90	1.90	2.00	1.94
G1P20	18/1/2007	1.40	2.20	1.60	1.70	1.70	1.72
G1P30	14/1/2007	1.50	1.20	1.30	1.30	1.30	1.32
G1P40	14/1/2007	1.20	1.30	1.20	1.10	1.50	1.26
G2P10	26/1/2007	1.70	1.90	1.70	1.30	1.30	1.58
G2P20	26/1/2007	1.30	1.30	1.30	1.10	1.50	1.30
G2P30	22/1/2007	1.40	1.30	1.40	0.90	1.50	1.30
G2P40	22/1/2007	0.70	0.70	1.00	0.80	0.90	0.82



รูปที่ ข.2 แสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 90 วัน
ของตัวอย่าง CT, OP, G1P และ G2P

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน
ของตัวอย่าง CT, OR, G1R และ G2R

Sample	Date	Depth of Chloride Penetration (cm)					Average (cm)
		1	2	3	4	5	
CT1	12/9/2007	4.60	4.30	3.80	4.40	4.30	4.28
CT5	11/9/2007	4.80	4.30	4.00	5.10	4.90	4.62
OR10	20/9/2007	3.30	3.40	2.90	3.40	2.90	3.18
OR20	20/9/2007	2.10	2.80	2.90	2.70	2.30	2.56
G1R10	30/9/2007	2.40	2.20	2.40	2.70	2.50	2.44
G1R20	30/9/2007	2.00	2.00	2.10	2.00	2.00	2.02
G1R30	24/9/2007	1.90	2.00	1.80	1.70	1.90	1.86
G1R40	24/9/2007	1.90	1.60	1.60	1.60	2.00	1.74
G2R10	6/10/2007	2.10	1.80	1.80	1.70	1.60	1.80
G2R20	6/10/2007	2.10	1.80	1.60	1.60	1.50	1.72
G2R30	3/10/2007	1.50	1.30	1.50	1.40	1.30	1.40
G2R40	3/10/2007	1.00	0.90	1.00	0.90	0.80	0.92

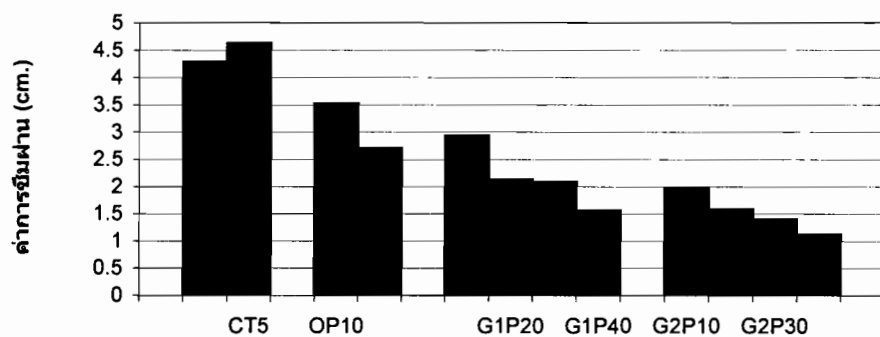


รูปที่ ข.3 แสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน
ของตัวอย่าง CT, OR, G1R และ G2R

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน
ของตัวอย่าง CT, OP, G1P และ G2P

Sample	Date	Depth of Chloride Penetration (cm)					Average (cm)
		1	2	3	4	5	
CT1	12/9/2007	1.70	1.50	1.20	1.20	1.60	1.44
CT5	11/9/2007	1.70	1.30	1.60	1.40	1.30	1.46
OP10	12/10/2007	1.90	1.70	1.60	1.70	1.50	1.68
OP20	12/10/2007	2.00	2.00	2.10	2.00	1.80	1.98
G1P10	20/10/2007	2.10	1.80	1.90	1.90	2.00	1.94
G1P20	20/10/2007	1.40	2.20	1.60	1.70	1.70	1.72
G1P30	16/10/2007	1.50	1.20	1.30	1.30	1.30	1.32
G1P40	16/10/2007	1.20	1.30	1.20	1.10	1.50	1.26
G2P10	28/10/2007	1.70	1.90	1.70	1.30	1.30	1.58
G2P20	28/10/2007	1.30	1.30	1.30	1.10	1.50	1.30
G2P30	24/10/2007	1.40	1.30	1.40	0.90	1.50	1.30
G2P40	24/10/2007	0.70	0.70	1.00	0.80	0.90	0.82

การแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 360 วัน



รูปที่ ข.4 แสดงการเปรียบเทียบการแทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อายุ 360 วัน
ของตัวอย่าง CT, OP, G1P และ G2P

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	นายสรภพ ก้านบัวแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	22 กุมภาพันธ์ 2526
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอัสสัมชัญธนบุรี พ.ศ. 2544
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2548
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2552
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ปริญญา ก้านบัวแก้ว, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ผลกระทบของเจ้าปลั้มน้ำมันต่อกำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม 2551, โรงแรมจอมเทียน ปลั้มน้ำ พัทยา , รหัส MAT-034, pp. 167-172.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่.....2.....เดือน.....เมษายน..... พ.ศ.....2553.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....สรภพ ก้านบัวแก้ว.....รหัสประจำตัว.....48400311.....

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ระดับ ☐ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ☒ ปริญญาโท ☐ ปริญญาเอก

หลักสูตร...วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต..... สาขาวิชา.....วิศวกรรมโครงสร้าง.....คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....

อยู่บ้านเลขที่.....3/119.....หมู่.....3.....ต.รอก/ชอย.....ถนน.....หมู่บ้านเศรษฐกิจ.....

ตำบล/แขวง.....บางไผ่.....อำเภอ/เขต.....บางแค.....จังหวัด.....กรุงเทพ.....รหัสไปรษณีย์.....10160.....

เป็น “ผู้โอน” ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี

รศ.ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ ตำแหน่ง รองคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

เป็นตัวแทน “ผู้รับโอน” สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง.....ผลกระทบของเก้าอี้กลับ-เปลือกไม้และเก้าอี้ปาล์มน้ำมันต่อกำลังอัดและการ

แทรกซึมคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต.....

ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ.....ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล.....อาจารย์ที่ปรึกษา และ/หรือ

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตาม

พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

2. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือ

ทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

5. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....สโรภพ กันบัวแก้ว.....ผู้โอนสิทธิ
(สโรภพ กันบัวแก้ว)
นักศึกษา

ลงชื่อ.....[Signature].....ผู้รับโอนสิทธิ
(รศ.ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์)
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติการแทนคณบดี

ลงชื่อ.....[Signature].....พยาน
(อัย จ.บุตรพงศ์กุล)

ลงชื่อ.....[Signature].....พยาน
(โอรน สิริทองกุล)