ผลกระทบของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

นางสาววลัยลักษณ์ สาระจันทร์ วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

..... กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

..... กรรมการ
(รศ. เอนก ศิริพานิชกร)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาววลัยลักษณ์ สาระจันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้ามาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15-20 (ความละเอียดปานกลาง) และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ความละเอียดมาก) รวมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดจึงมีความละเอียดอย่างละ 3 ขนาด จากนั้นนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 90 วันและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90วัน

ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและไม่สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ เมื่อปรับปรุงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นและสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ความละเอียดปานกลางในอัตราร้อยละ 10 และความละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากในอัตราร้อยละ 20 ให้กำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นพบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มลดต่ำลงด้วย และท้ายสุดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสามารถทำนายได้ โดยใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด

คำสำคัญ : อัตราการซึมของน้ำ / กำลังอัด / เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ / เถ้าปาล์มน้ำมัน

Thesis Title	Effect of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash on Water Permeability of Concrete
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Walailuk Sarajun
Thesis Advisors	Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2550

Abstract

The objective of this research is to study the effects of rice husk-bark ash (RHBA) and palm oil fuel ash (POFA) on water permeability of concrete. Rice husk-bark ash and palm oil fuel ash, by-products from biomass power plant, 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 plant) were used to replace Portland cement type I at 10, 20, 30 and 40 percent by weight of binder to cast concrete. Compressive strengths of concretes were determined at the ages of 7, 28 and 90 days and water permeabilities of concretes were determined at the ages of 28 and 90 days.

The results revealed that 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 exhibited produced exhibited low compressive strength and high water permeability as compared to that of the control concrete. Additionally, with 10% and 20% replacement of Portland cement type I by medium fineness and high fineness of rice husk-bark ash, respectively, the compressive strengths of concrete were as high as that of the control concrete and the values of water permeability were lower than that of the control concrete at 90 days. When high fineness of palm oil fuel ash was used to replace Portland cement at 20 percent by weight binder, it produced higher compressive strength and lower water permeability of concrete as compared to the control concrete at 90 days. In addition, concrete containing RHBA or POFA with higher compressive strength tended to have lower water permeability of concrete than the one with

lower compressive strength. Finally, it was found that the water permeability of concrete containing RBHA and POFA could be predicted by using the compressive strength of the concrete.

Keywords : Water Permeability / 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 ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ ที่สละเวลาอันมีค่ามาสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ คุณวีรชาติ ตั้งจิรภัทร ที่ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในด้านวิชาการและการปฏิบัติตั้งแต่เริ่มวางแผนงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณวิเชียร ชาลี ที่ให้คำแนะนำในระหว่างการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ๆ และ เพื่อนๆ ในห้องวิจัยคอนกรีตที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในช่วงระหว่างการทดสอบ และขอขอบคุณ พ่อ และแม่ ที่ให้กำลังใจและให้การศึกษามาตั้งแต่ระดับอนุบาลจนถึงระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยเสริมสร้างความรู้ และความเข้าใจ ตลอดจนส่งเสริมการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้ดีและมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากปริมาณจำนวนมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นผลพลอยได้ที่ไม่ก่อประโยชน์มาเป็นสิ่งที่มีประโยชน์และสร้างคุณค่าในงานคอนกรีตต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ง

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญ ช

รายการตาราง ฌ

รายการรูปประกอบ ฎ

บทที่

1. บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 3

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **4**

2.1 วัสดุปอซโซลาน 4

2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน 4

2.3 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน 5

2.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต 8

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน 9

3. วิธีการทดสอบ **12**

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 12

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ 12

3.3 วิธีการทดสอบ 14

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา 19

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล **21**

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ 21

4.2 ความต้องการน้ำของคอนกรีตสด 28

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต 30

4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต 41

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ **58**

5.1 สรุปผลการทดสอบ 58

5.2 ข้อเสนอแนะ 59

เอกสารอ้างอิง **60**

ภาคผนวก **66**

ก ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 66

ข ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต 78

ประวัติผู้วิจัย **123**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

3.1 อัตราส่วนผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษา 16

4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ 23

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 27

4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน 31

4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1 43

ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1 67

ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐาน CT5 67

ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR10 68

ก.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR20 68

ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R10 69

ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R20 69

ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R30 70

ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R40 70

ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R10 71

ก.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R20 71

ก.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R30 72

ก.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R40 72

ก.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10 73

ก.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20 73

ก.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10 74

ก.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20 74

ก.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30 75

ก.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40 75

ก.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10 76

ก.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20 76
ก.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30 77
ก.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40 77
ข.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 28 วัน 79
ข.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 90 วัน 80
ข.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมาตรฐาน CT5 ที่อายุ 28 วัน 81
ข.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมาตรฐาน CT5 ที่อายุ 90 วัน 82
ข.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR10 ที่อายุ 28 วัน 83
ข.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR10 ที่อายุ 90 วัน 84
ข.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR20 ที่อายุ 28 วัน 85
ข.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR20 ที่อายุ 90 วัน 86
ข.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R10 ที่อายุ 28 วัน 87
ข.10 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R10 ที่อายุ 90 วัน 88
ข.11 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R20 ที่อายุ 28 วัน 89
ข.12 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R20 ที่อายุ 90 วัน 90
ข.13 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R30 ที่อายุ 28 วัน 91
ข.14 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R30 ที่อายุ 90 วัน 92
ข.15 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R40 ที่อายุ 28 วัน 93
ข.16 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R40 ที่อายุ 90 วัน 94
ข.17 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R10 ที่อายุ 28 วัน 95
ข.18 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R10 ที่อายุ 90 วัน 96
ข.19 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R20 ที่อายุ 28 วัน 97
ข.20 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R20 ที่อายุ 90 วัน 98
ข.21 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R30 ที่อายุ 28 วัน 99
ข.22 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R30 ที่อายุ 90 วัน 100
ข.23 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R40 ที่อายุ 28 วัน 101
ข.24 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R40 ที่อายุ 90 วัน 102
ข.25 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP10 ที่อายุ 28 วัน 103
ข.26 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP10 ที่อายุ 90 วัน 104
ข.27 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP20 ที่อายุ 28 วัน 105
ข.28 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP20 ที่อายุ 90 วัน 106
ข.29 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P10 ที่อายุ 28 วัน 107

ข.30 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P10 ที่อายุ 90 วัน 108
ข.31 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P20 ที่อายุ 28 วัน 109
ข.32 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P20 ที่อายุ 90 วัน 110
ข.33 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P30 ที่อายุ 28 วัน 111
ข.34 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P30 ที่อายุ 90 วัน 112
ข.35 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P40 ที่อายุ 28 วัน 113
ข.36 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P40 ที่อายุ 90 วัน 114
ข.37 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P10 ที่อายุ 28 วัน 115
ข.38 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P10 ที่อายุ 90 วัน 116
ข.39 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P20 ที่อายุ 28 วัน 117
ข.40 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P20 ที่อายุ 90 วัน 118
ข.41 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P30 ที่อายุ 28 วัน 119
ข.42 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P30 ที่อายุ 90 วัน 120
ข.43 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P40 ที่อายุ 28 วัน 121
ข.44 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P40 ที่อายุ 90 วัน 122

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	บริเวณที่กองเก็บแกลบและเปลือกไม้ก่อนนำไปเผา	6
2.2	บริเวณที่ทิ้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้	6
2.3	บริเวณที่กองกากของผลปาล์มน้ำมันก่อนนำไปเผา	7
2.4	เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนนำไปทิ้ง	7
3.1	เครื่องทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	13
3.2	การตัดตัวอย่างคอนกรีต	17
3.3	ตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อ Epoxy	18
3.4	ชุดทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต	19
4.1	การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้	24
4.2	การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	25
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR	34
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R	35
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R	35
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 และ 90 วัน	36
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	39
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	39
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	40
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 และ 90 วัน	40
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 28 วัน	45
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน	45
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน	48

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน 48
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน 50
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน 50
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 28 วัน 53
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน 53
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน 55
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน 56
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านการบด (G1 และ G2) ที่อายุ 90 วัน 57
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT1 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 79
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT1 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 80
ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT5 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 81
ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT5 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 82
ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 83
ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 84
ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 85
ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 86

ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 87
ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 88
ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 89
ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 90
ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 91
ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 92
ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R40 (ตัวอย่างที่ 2) ที่อายุ 28 วัน 93
ข.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R40 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 94
ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 95
ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 96
ข.19 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 97
ข.20 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 98
ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 99
ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 100
ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R40 (ตัวอย่างที่ 1และ 2) ที่อายุ 28 วัน 101
ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R40 (ตัวอย่างที่ 2) ที่อายุ 90 วัน 102

ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 103
ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 104
ข.27 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 105
ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 106
ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 107
ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 108
ข.31 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 109
ข.32 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 110
ข.33 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P30 (ตัวอย่างที่ 1) ที่อายุ 28 วัน 111
ข.34 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 112
ข.35 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P40 (ตัวอย่างที่ 1) ที่อายุ 28 วัน 113
ข.36 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P40 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 114
ข.37 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 115
ข.38 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P10 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 116
ข.39 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 117
ข.40 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P20 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 118

ข.41 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 119
ข.42 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P30 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 120
ข.43 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P40 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 28 วัน 121
ข.44 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P40 (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) ที่อายุ 90 วัน 122

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา

กระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในประเทศไทย ทำให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเกิดขึ้นมากมาย เช่น แกลบเกิดจากกระบวนการผลิตข้าวในโรงสีข้าว เปลือกไม้เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ และกากของผลปาล์มน้ำมันเกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ประเทศไทยมีกากของผลผลิตดังกล่าวหลายล้านตันต่อปี ในปัจจุบันมีการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า "เชื้อเพลิงชีวมวล" เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หรือเป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนในโรงสีข้าว ทำให้สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำประโยชน์ได้และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม แต่ยังคงมีปัญหาที่เกิดจากเถ้าของวัสดุชีวมวลซึ่งได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยในแต่ละปีมีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกๆ ปีซึ่ง บางส่วนได้นำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น การทำปุ๋ย แต่เป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปีจึงต้องนำส่วนใหญ่ไปทิ้งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด การขนส่ง รวมถึงบริเวณพื้นที่ทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมกับบริเวณโดยรอบ เนื่องจากเถ้ามีลักษณะเป็นฝุ่นผง น้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังนั้นหากนำมาใช้ประโยชน์ก็จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากกระบวนการผลิตถึง 100,000 ตันต่อปีและเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณมากกว่า 100,000 ตันต่อปี (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2549) ปัจจุบันมีงานวิจัยและพัฒนาในด้านคุณสมบัติต่างๆของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2545; จตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ, 2548; Makaratat และคณะ, 2004) และเถ้าปาล์มน้ำมัน (Tangchirapat และคณะ, 2007; จักพล กลั่นมั่นคง และคณะ, 2543; Tay และคณะ, 1990; Hussin และ Awal, 1996; Jaturapitakkul และคณะ, 2007) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในเรื่องกำลังอัดของมอร์ต้าร์และคอนกรีต ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ในงานคอนกรีตยังเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น จึงจำเป็นต้องมีงานวิจัยที่มากขึ้นเพื่อเป็นการยืนยันและพัฒนาคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนการนำไปใช้ในงานจริง

การศึกษาคุณสมบัติในด้านความทนทานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีไม่มากและการศึกษาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงความทนทานของคอนกรีต เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า เมื่อสารละลายไม่สามารถซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตได้หรือซึมผ่านได้ช้าก็สร้างความเสียหายต่อคอนกรีตได้น้อย จึงกล่าวได้ว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นดัชนีที่ใช้บอกถึงความคงทนของคอนกรีต ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกันเป็นวัสดุปอซโซลานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อศึกษากำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีทั้ง 2 ข้อนี้สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานสูงได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียด และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่างกัน

2. ศึกษาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดและปริมาณการแทนที่ต่างกัน

3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อหาอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในงานคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด และเถ้าปาล์มน้ำมันจากบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) โดยแบ่งเป็น 3 ความละเอียดคือ ความละเอียดจากแหล่งผลิตโดยตรง, ความละเอียดปานกลางที่ผ่านการบดให้มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15-20 และความละเอียดมากที่มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดและลักษณะรูปร่าง รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ไม่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ

300 กก/ซม^2 ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตในทุกส่วนผสมให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. โดยการปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วันและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 ที่ได้กล่าวถึงที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ บทที่ 2 ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมันและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันตามมาตรฐานต่างๆ รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต กำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน คุณสมบัติของคอนกรีต กำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและบทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปของผลการทดสอบและข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตต่อไป ส่วนภาคผนวกแสดงการคำนวณกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials , 2001) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านการรับกำลังอัด ความคงทนต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน คือ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี (Davis, 1950)

2.2 ปฏิกริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เกิดขึ้นจากปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-S-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)

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

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

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

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังแสดงในสมการที่ (2.4) และ (2.5)

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

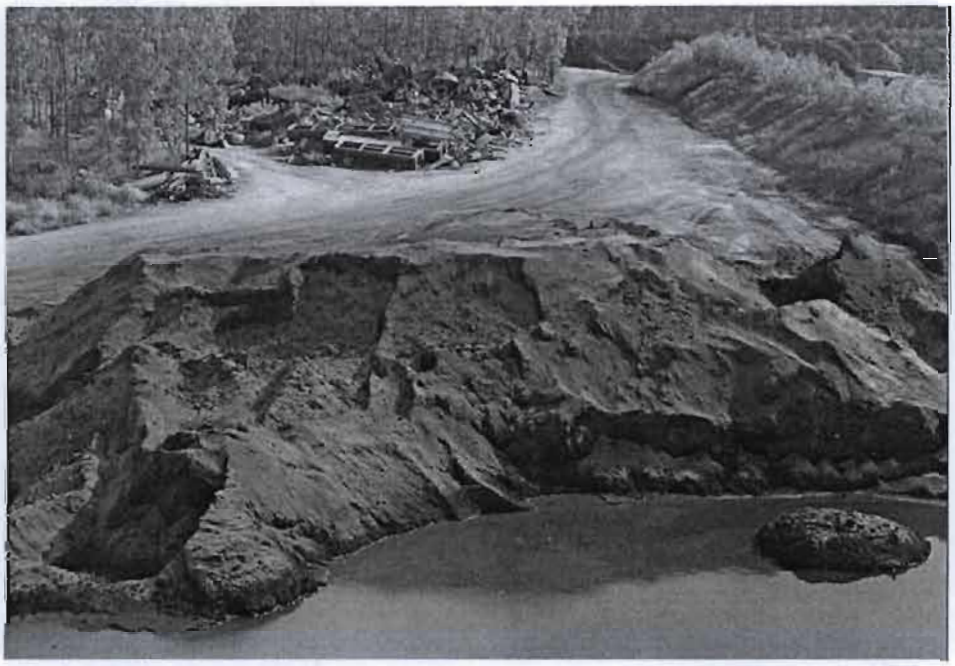
$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow xCaO{\cdot}yAl_2O_3{\cdot}zH_2O \qquad (2.5)$$

ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-A-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay และคณะ, 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)

2.3 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ (รูปที่ 2.1) มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาคงที่ประมาณ 800-900°C หลังจากการเผา เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้งกระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป (รูปที่ 2.2)

รูปที่ 2.1 บริเวณที่กองแกลบและเปลือกไม้ก่อนนำไปเผา



รูปที่ 2.2 บริเวณที่ทิ้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจะเหลือกากปาล์ม แยกเป็น ทะลายปาล์ม เปลือกปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นชีวมวลที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยก่อนการนำกากปาล์มไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล จะนำทะลายปาล์มและเปลือกปาล์มไปผ่านกระบวนการตีให้เป็นเส้นใย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น จากนั้นจึงนำเส้นใยและกะลาปาล์ม (รูปที่ 2.3) ไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 700-1000°C หลังจากการเผายังคงเหลือเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณมาก (รูปที่ 2.4) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาและฟุ้งกระจาย ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และยังเกิดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ทั้งด้านการขนส่งและการจัดหาสถานที่ในการทิ้งอีกด้วย

รูปที่ 2.3 บริเวณที่กองกากของผลปาล์มน้ำมันก่อนนำไปเผา

รูปที่ 2.4 เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนนำไปทิ้ง

2.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน ความทนทานของคอนกรีตหมายถึง การทนทานต่อสภาพการกัดกร่อน ไม่ว่าจะเป็นทางเคมี ทางกล หรือทางกายภาพ การซึมผ่านของคอนกรีตคือ การแทรกซึมของน้ำ, ของเหลวหรือก๊าซที่ซึมผ่านเนื้อคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ทึบน้ำ แต่เป็นวัสดุที่น้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างช้า เมื่อน้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตได้หรือซึมผ่านได้ช้าลงก็สร้างความเสียหายต่อคอนกรีตได้น้อยลง หรือเมื่อคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงแสดงว่าสารละลายต่างๆสามารถเข้าสู่เนื้อคอนกรีตเร็วขึ้น เป็นผลทำให้เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเป็นสนิมและเกิดการเบ่งของสนิมเหล็กและดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมให้เกิดรอยร้าวและหลุดร่อนออกมาในที่สุด อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความคงทนของคอนกรีต การทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน ปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่ในด้านอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตทำขึ้นในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยมีงานวิจัยในด้านอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตน้อยมาก เช่น

Khatri และ Sirivivatnanon (1997) ได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบการหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยวิธีที่ใช้ในการทดสอบมี 2 วิธี คือ วิธีการไหล (Flow method) และวิธีการวัดระยะการซึม (Penetration method) ซึ่งทั้ง 2 วิธีใช้หลักการในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตด้วยการใช้การไหลของน้ำที่คงที่ หรือเทคนิคการวัดระยะของการซึมได้ในคอนกรีต ผลการวิจัยพบว่าวิธีการไหลเหมาะสมกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีอัตราการซึมของน้ำสูง ในขณะที่วิธีการวัดระยะการซึมเหมาะสำหรับใช้หาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีอัตราการซึมของน้ำต่ำมาก

Ludirdja และคณะ (1989) ได้เสนอวิธีการวัดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยอาศัยหลักการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตตามแรงโน้มถ่วงของโลก วัดอัตราการไหลเป็นเวลา 20 วัน แล้วใช้ค่า 7 วันสุดท้ายเพื่อนำมาคำนวนหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Zongjin และ Chaung-Kong (2000) พบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-12} ถึง 1×10^{-13} เมตรต่อวินาที และ EI-Dieb และ Hooton (1995) ได้พบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต High-performance concrete (HPC) มีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-12} ถึง 1×10^{-16} เมตรต่อวินาที

ในประเทศไทย ดิลก ดูรัตนเวช และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจาก 5 แหล่งผลิตที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน และปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ซึ่งได้แก่ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์, ความละเอียดของเถ้าถ่านหิน, อายุบ่ม และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งผลิต ผลการวิจัยพบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดและอายุมากขึ้นและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินอีกด้วย Chindaprasirt และคณะ (2007) ได้ศึกษากำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมาก โดยการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 ผลการทดสอบพบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้

จากการศึกษาข้างต้นเห็นได้ว่าการศึกษาในด้านอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน มีความสำคัญที่ใช้ยืนยันว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีในงานคอนกรีตได้ จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและยืนยันการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2545) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบด มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานที่ต่ำมาก และได้พัฒนาคุณภาพเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยการนำมาบดละเอียด ทำให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตได้ ต่อมาจตุพล ตั้งปกาศิต (2548) ได้ศึกษาดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5±2 พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เริ่มต้นที่อายุ 3 วัน และมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน ณัฐพงษ์ มกระธัช (2547) ได้ศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานยิ่งขึ้น ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดมากที่มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการขยายตัวมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดปานกลางและบดละเอียดมากให้สูงขึ้น และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงๆ (ร้อยละ 30 และ 40) ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการทำลายของสารละลายแมกนีเซียม

ซัลเฟตมากอีกด้วย ส่วนงานวิจัยด้านคอนกรีตกำลังสูง วันชัย สะตะ และคณะ(2546) ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดที่มีขนาดค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 2 พบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่มีซิลิก้าฟูมควบแน่นร้อยละ 10 ที่อายุมากกว่า 90 วัน อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นมีราคาแพงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้นั้นมีราคาถูกกว่า ทั้งยังช่วยลดการนำเถ้าเหล่านี้ไปทิ้งและเป็นการลดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมไปในตัวด้วย

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay (1990) ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ โดยการใช้แทนที่มากกว่าร้อยละ 10 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีขนาดอนุภาคใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมด้วย (Tay และ Show , 1995)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal (1996) นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ โดยในช่วงอายุก่อน 28 วัน มีการพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาที่ดีขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอคลอริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ต่อมา Hussin และ Awal (1996) และ Ishida และคณะ(1999)ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยบ่มแท่งคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่าการหดตัวน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

ในประเทศไทย จักรพล กลั่นมั่นคง และคณะ (2543) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 70 และมีศักยภาพเพียงพอสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้หากมีความละเอียดสูง เช่นเดียวกับการศึกษาของ สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ และคณะ (2545) พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความ

ละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 มีค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 75 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tangchirapat และคณะ (2007) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 65.3 และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากมีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 90 ส่วนการศึกษาในเรื่องของความทนทานต่อซัลเฟตพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในการทำคอนกรีตกำลังสูงของ วันชัย สะตะ และคณะ (2546) พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 ให้กำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 100 ถึง 113 โดยการแทนที่ร้อยละ 20 มีแนวโน้มให้กำลังอัดสูงสุด

การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้านกำลังอัด การศึกษาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน มีน้อยมาก ซึ่งการศึกษาเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์ที่จะนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในการศึกษา อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ การออกแบบและส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบวัสดุตามมาตรฐานต่างๆและวิธีการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

3.1.2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จาก บริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา

3.1.3 เถ้าปาล์มน้ำมันจาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)

3.1.4 ทรายแม่น้ำ

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

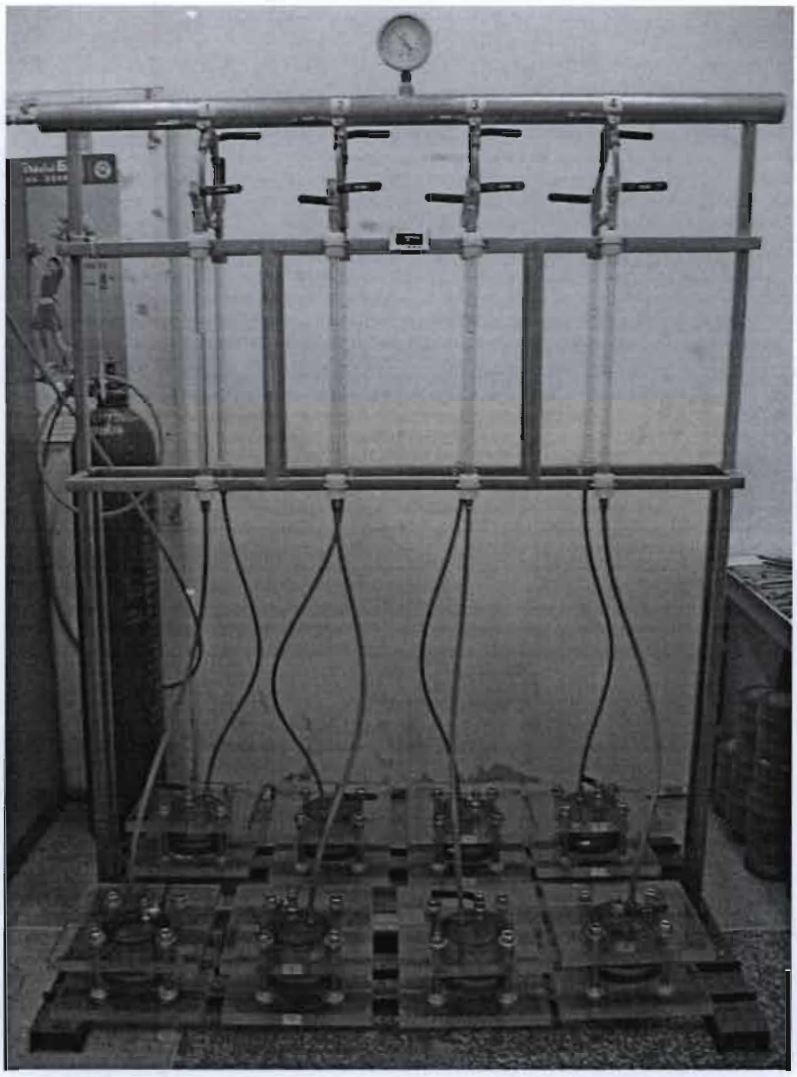
3.2.10 เครื่องทดสอบกำลังอัด

3.2.11 เครื่องทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (รูปที่ 3.1)

3.2.12 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตเพื่อเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.2.13 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.14 Epoxy



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.3 วิธีการทดสอบ

วิธีการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมวัสดุ จนถึงการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ดังนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) นำมาจากบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด มาตากให้แห้งก่อนทำการบดให้มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 คือ ความละเอียดจากแหล่งผลิตโดยตรง (ไม่ผ่านการบด) ใช้สัญลักษณ์ OR, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักซึ่งใช้สัญลักษณ์ G1R และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดมากปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G2R

เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) ที่นำมาศึกษาได้จาก บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) มาตากให้แห้งก่อนทำการบดให้มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 คือ ความละเอียดจากแหล่งผลิตโดยตรง (ไม่ผ่านการบด) ใช้สัญลักษณ์ OP, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักซึ่งใช้สัญลักษณ์ G1P และเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่บดละเอียดมากปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G2P

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, 2001) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยการทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ทดสอบ

3.3.2.2 ทดสอบน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C 430 (American Society for Testing and Materials, 2001) ซึ่งทำโดยการนำเอาตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325

3.3.2.3 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)

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

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

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

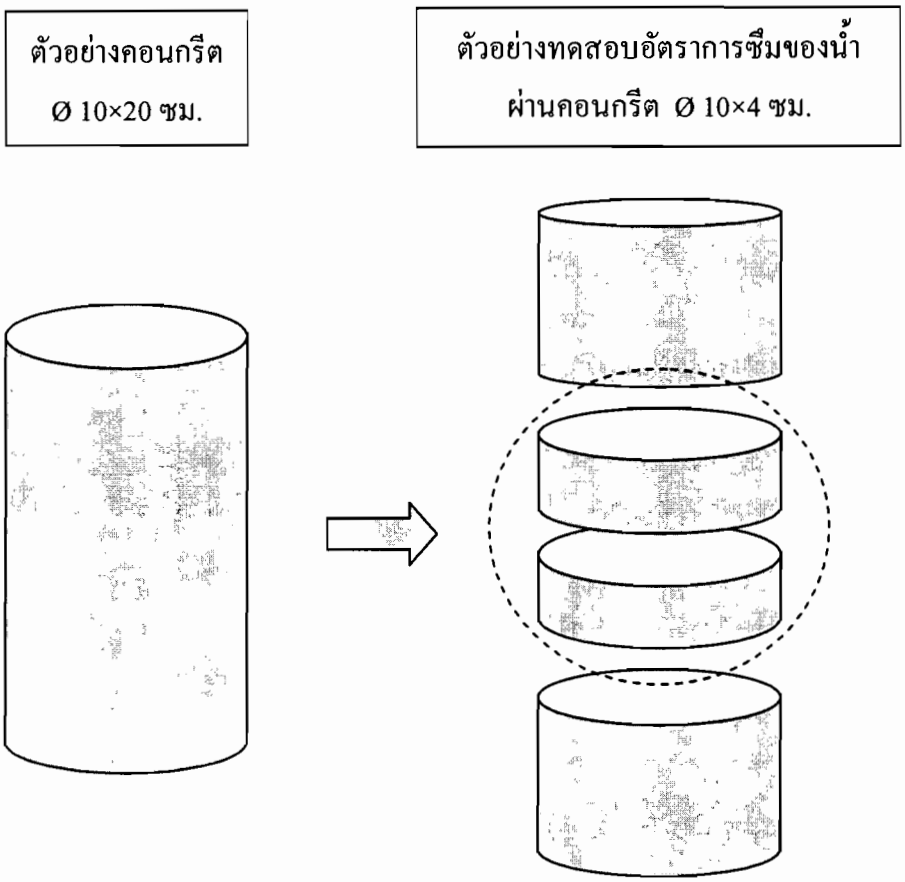
การศึกษานี้ได้ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตที่ไม่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม) ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 300 กก/ซม^2 ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตในทุกส่วนผสมให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม.โดยการปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ความละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยอัตราส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำประปา ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วันและทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 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 การทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

การทดสอบหาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต อาศัยหลักการให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตด้วยแรงดันน้ำคงที่อย่างต่อเนื่อง การทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่มีอายุครบตามกำหนดการทดสอบมาตัดตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของแท่งตัวอย่างคอนกรีตให้มีขนาดความสูง 4 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนบนที่อาจมีผลของการเยิ้มน้ำและส่วนล่างที่อาจมีมวลรวมมากเกินไป เนื่องจากการกระทุ้งให้แน่น) แล้วทำความสะอาดผิวตัวอย่างคอนกรีตให้สะอาดปราศจากฝุ่น จากนั้นหล่ออีพอกซี (Epoxy) ที่ด้านข้างของตัวอย่างให้มีความหนาโดยรอบประมาณ 2.5 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และมีความสูงเท่ากับตัวอย่างคอนกรีต เพื่อป้องกันการซึมของน้ำทางด้านข้างของคอนกรีตที่จะทดสอบและเพื่อให้เกิดการไหลของน้ำในตัวอย่างคอนกรีตในเป็นทิศทางเดียวจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง



รูปที่ 3.2 การตัดตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อ Epoxy

หลังจากหล่ออีพอกซีเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างมาประกอบเข้าชุดทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.4 ไล่อากาศออกจากเครื่องทดสอบ แล้วให้ความดันคงที่เท่ากับ 0.5 MPa.หรือ 5 bars เพื่อให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับเวลา จนอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าคงที่ จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสะสมและปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเนื้อคอนกรีต เมื่ออัตราการไหลของน้ำที่ผ่านคอนกรีตคงที่ (กราฟเป็นเส้นตรง) นำค่าความชันซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลของน้ำมาแทนค่าในสมการของ Darcy (สมการที่ 2.6) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

$$K = \frac{\rho L g Q}{PA} \qquad (2.6)$$

เมื่อ

K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (m/s)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

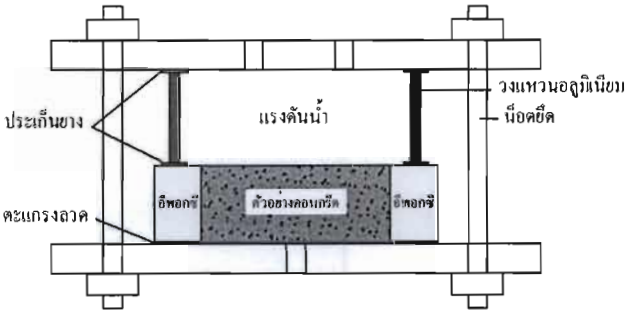
g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

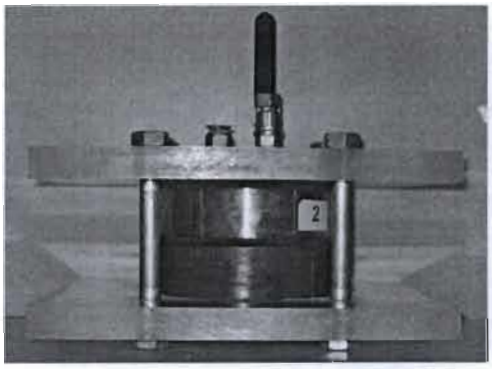
Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)

L = ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (m)

P = แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (N/m^2)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (m^2)





รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

CT {1, 5} หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุเพียงอย่างเดียว

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

{O, G1, G2} หมายถึง ระดับความละเอียดของวัสดุ คือ ขนาดวัสดุก่อนบดซึ่งไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ, ขนาดวัสดุบดละเอียดมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก, และขนาดวัสดุบดละเอียดมากมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

{R, P} หมายถึง เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ

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

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

G2R10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดขนาดละเอียดมาก (มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

G1P10 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดขนาดละเอียดปานกลาง (มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก) แทนที่ปูนซีเมนต์ในร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

OR20 หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ขนาดหยาบที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตลอดจนผลของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งทางด้านความต้องการน้ำในส่วนผสม, กำลังอัด และอัตราการซึมของน้ำในคอนกรีต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานให้ชัดเจนเพื่อจะได้วิเคราะห์และกำหนดแนวทางในการเลือกใช้วัสดุต่อไป

4.1.1.1 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่ามีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีเนื้อแน่น สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรง (OR) มีลักษณะหยาบสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และผิวขรุขระ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบด G1R และ G2R อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน มีผิวขรุขระ และมีขนาดเล็กกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2546)

ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงและผ่านการบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรง (OP) มีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบ รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G1P และ G2P มีลักษณะอนุภาคคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และอนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมัน OP (วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2546)

4.1.1.2 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970)

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R มีค่าเท่ากับ 2.03, 2.10 และ 2.15 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านมาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2545) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.89 ถึง 2.24 และมีค่าไม่แตกต่างจากเถ้าแกลบที่มีค่าเท่ากับ 2.18 (Jaturapitakkul และ Roongreung, 2003) นอกจากนี้เห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีค่าเพิ่มขึ้นจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุน และเมื่อผ่านการบดให้ละเอียดทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97, 2.17 และ 2.33 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรงมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง แต่เมื่อผ่านการบดแล้วทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง รูพรุนจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น (Paya และคณะ, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และ Cheerarot (2003) ที่พบว่าการบดไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ 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

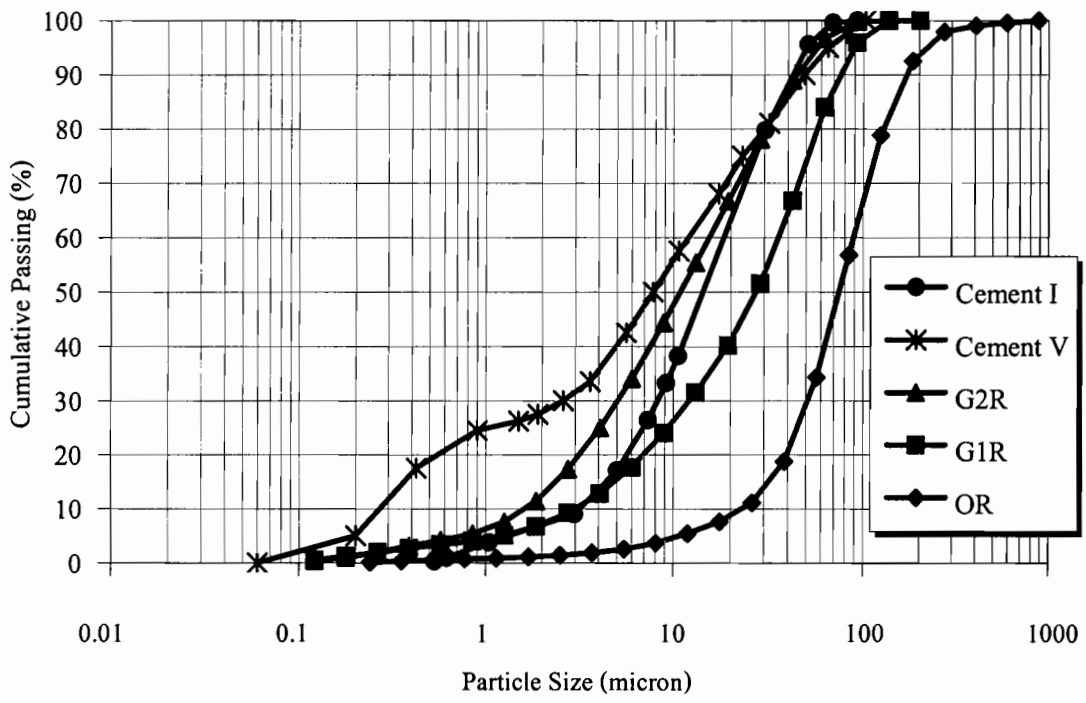
หมายเหตุ : N/A = Not Applied

4.1.1.3 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

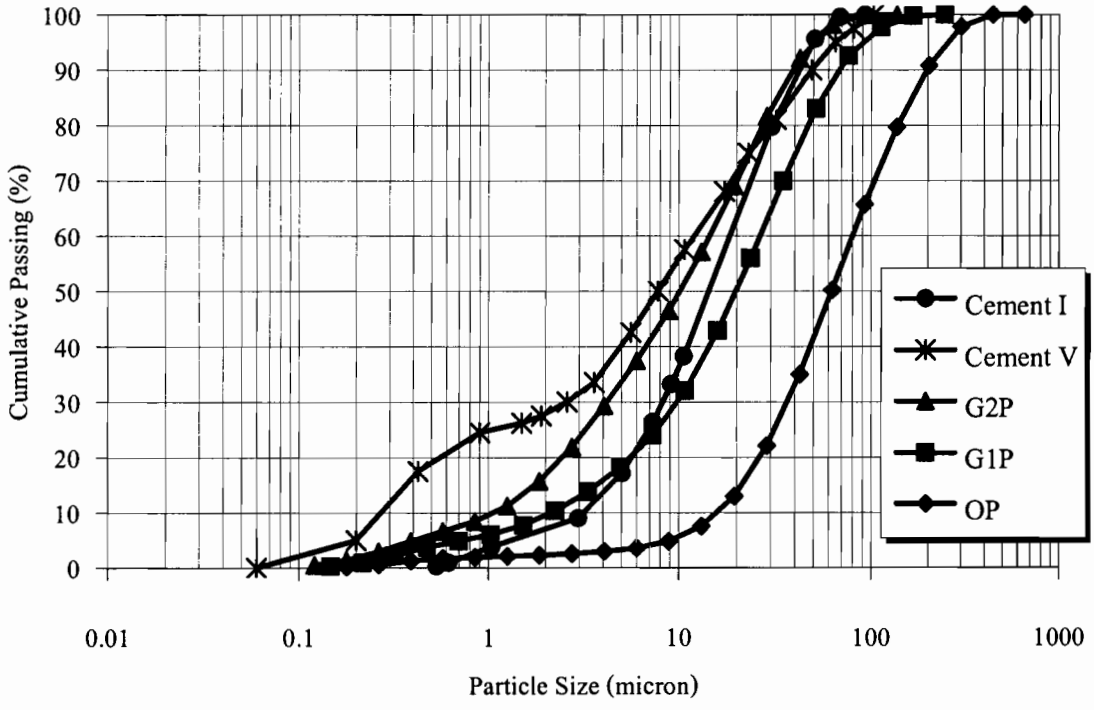
ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันจากการศึกษาของวีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546) และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.7 ไมครอน ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 50 ไมครอน ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ยังมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ มีค่าเท่ากับ 7.5 ไมครอน

สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากแหล่งผลิตโดยตรง (OR) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 25 ถึง 180 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 75.3 ไมครอน แต่หลังจากปรับปรุงคุณภาพโดยการบดทำให้เถ้าแกลบ-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) เท่ากับร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 15 ถึง 200 ไมครอน มีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภทอย่างมาก เห็นได้ชัดจากเส้นกราฟการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนไปทางด้านขวา และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ยพบว่ามีขนาดเท่ากับ 65.6 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก แต่หลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีการกระจายตัวของอนุภาคแคบลงและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 2 ถึง 70 และ 1 ถึง 40 ไมครอน ตามลำดับและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.9 และ 10.2 ไมครอน ตามลำดับ โดยมีขนาดลดลงจากเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) ประมาณ 3 และ 6 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.1.4 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่าร้อยละน้ำหนักของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีค่าเท่ากับร้อยละ 68.7 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2001) กำหนดไว้ที่ไม่เกินร้อยละ 34 อยู่มาก ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีร้อยละที่ค้างบนตะแกรงลดลงจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR อย่างมาก คือมีค่าเท่ากับ 16.9 และ 1.9 ตามลำดับ

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 41.2, 17.1 และ 1.5 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials, 2001) กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 อยู่พอสมควร

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดทั้งสองขนาด (G1 และ G2) มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยยังมีค่าใกล้เคียงและใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามลำดับ ประกอบกับภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุทั้งสอง สามารถบอกได้ว่าอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นยังมีความพรุนเหลืออยู่

4.1.2 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 (American Society for Testing and Materials, 2001) 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, 2001) คือ ไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้พบว่าไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ATMC 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 ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผาต่างกัน และเมื่อพิจารณาเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่ามีผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.8 มีปริมาณ SO_3 เพียงร้อยละ 0.5 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) เท่ากับร้อยละ 10.1

เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันแล้วไม่สามารถจัดให้อยู่ในวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่ดีนั้น จำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบด้านอื่นๆด้วย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ (Tangchirapat และคณะ, 2007; จักพล กลั่นมั่นคง 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_2O_3)	4.8	3.5	0.2	2. 6
Ferric Oxide (Fe_2O_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	0.6	3.1
Sodium Oxide (Na_2O)	0.3	0.1	0.2	0.4
Potassium Oxide (K_2O)	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	1.7	11.2	10.1
Tricalcium Silicates (C_3S)	62.9	51.2	-	-
Dicalcium Silicates (C_2S)	12.5	24.9	-	-
Tricalcium Aluminate (C_3A)	6.8	0.0	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)	10.4	17.0	-	-

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

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

4.2 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

4.2.1 ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในสัดส่วนที่สูงขึ้นคอนกรีตมีความต้องการน้ำมากขึ้น เช่น คอนกรีต OR10 และ OR20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 และ 0.81 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และ Waliuddin (1996) ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบให้สูงขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าแกลบสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีผิวขรุขระมาก มีความพรุนสูง มีการขัดกันระหว่างอนุภาค ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวที่เท่ากันจึงต้องการปริมาณน้ำที่มากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดโพรงอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีตและมีความพรุนสูง (Chindaprasirt และคณะ, 2005) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (G1R และ G2R) พบว่าสามารถลดความต้องการน้ำลงได้แต่แนวโน้มของความต้องการน้ำยังสูงขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นเช่น คอนกรีต G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.74, 0.74, 0.75 และ 0.77 ตามลำดับ ซึ่งมีความต้องการน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ขึ้นอีก เห็นได้ว่าคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.69, 0.71, 0.71 และ 0.72 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีความละเอียดมากขึ้น สามารถลดความพรุนและโพรงอากาศได้มากขึ้น เป็นผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตต่ำกว่ากรณีที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดน้อยกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้สูงขึ้นพบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับความต้องการน้ำของเถ้าแกลบซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (1996) หรืออาจเป็นเพราะค่า LOI ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่าสูงถึงร้อยละ11.2 เป็นผลให้คอนกรีตดูดน้ำมากขึ้น (Makaratat และคณะ, 2004)

4.2.2 ความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อพิจารณาความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันดังตารางที่ 4.3 พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับกลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้กล่าวคือความต้องการน้ำสูงขึ้นเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นและการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นสามารถลดความต้องการน้ำลงได้ เช่น คอนกรีต OP10 และ OP20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.72 และ 0.77 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (G1P) พบว่าคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจากที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งเท่ากับ 0.72, 0.73, 0.73 และ 0.74 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันขึ้นอีก (G2P) พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1P โดยคอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงและมีค่าเท่ากับ 0.68, 0.70, 0.71 และ 0.72 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีโพรงอากาศจำนวนมากและความพรุนสูง ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อมีการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้ละเอียดขึ้นทำให้ความพรุนลดลง ส่งผลให้ความต้องการปริมาณน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P น้อยกว่า G1P แต่ยังมีค่าสูงขึ้นเมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นอีก สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 10.1 จึงทำให้มีการดูดน้ำสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์ (Berg และ Kukko, 1991; เอนก ศิริพานิชกร, 2536)

4.2.3 เปรียบเทียบความต้องการน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ส่วนใหญ่มีความต้องการน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน เช่นที่ความละเอียดใกล้เคียงกันคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R10 และ G2R20 มี W/B เท่ากับ 0.69 และ 0.71 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P10 และ G2P20 มี W/B เท่ากับ 0.68 และ0.70 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่า LOI ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงกว่าจึงมีการดูดซึมน้ำมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการน้ำมีค่าลดลง (Shiqun และ Della, 1986) ซึ่งตรงกันข้ามกับความต้องการน้ำของคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม อาจเป็นเพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ ส่วนเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่กลมตัน ผิวเรียบ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้นสามารถช่วยในการลื่นไหลได้ดีกว่าอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม (Hansen, 1990) ซึ่งความต้องการน้ำที่แตกต่างกันนี้ส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีตตามกฎของ Abrams (Abrams, 1918)

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4.3.1 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม

ผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 กก/ซม^2 มีการปรับปริมาณน้ำเพื่อควบคุมให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว 5 ถึง 10 ซม. จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตควบคุม (CT1) มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 299 กก/ซม^2 ซึ่งใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ ส่วนคอนกรีต CT5 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วันมีกำลังอัดเท่ากับ 192, 285 และ 348 กก/ซม^2 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 93, 95 และ 103 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 28 วัน จากนั้นกำลังอัดจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนถึงอายุ 90 วัน

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

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

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

4.3.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบโดยการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดต่ำลง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีลักษณะที่คล้ายกันกล่าวคือมีการเพิ่มของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 90 วัน เช่น คอนกรีต OR10 และ OR20 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 170 และ 126 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 83 และ 62 ของคอนกรีตควบคุม และพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นจนถึงอายุ 90 วันเท่ากับ 278 และ 245 กก/ซม^2 ตามลำดับหรือคิดเป็นร้อยละ 82 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม นอกจากนั้นเห็นได้ชัดว่าคอนกรีต OR ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมากและไม่มีแนวโน้มที่จะพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ได้เนื่องจากอัตราการเพิ่มของกำลังอัดใกล้เคียงกับกลุ่มของคอนกรีตควบคุม และการพัฒนากำลังอัดเริ่มมีค่าคงที่จึงส่งผลให้กำลังอัดที่อายุมากขึ้นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงตามกฎของ Abrams (1918) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงโดยไม่ผ่านการบด (OR) ไม่เหมาะที่จะนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากมีความพรุนสูงและมีขนาดอนุภาคใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงทำให้กำลังอัดลดลงเพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ลงได้ ซึ่งตรงกับการศึกษาของณัฐพงษ์ มกระธัช (2547) ที่พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงนั้น เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลง

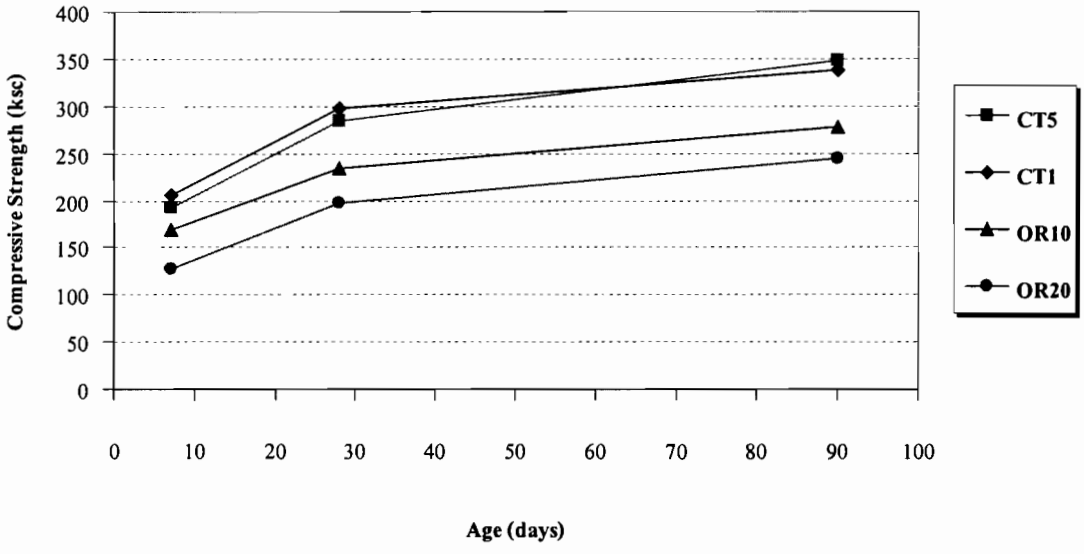
เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (G1R) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังอัดจะสูงขึ้น ที่อายุ 7 วันคอนกรีต G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 189, 179, 147 และ 129 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 92, 87, 72 และ 63 ของคอนกรีตควบคุม และเมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 283, 271, 243 และ 210 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 95, 91, 81 และ 70 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ จากค่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันจะเห็นว่าอัตราการเพิ่มของกำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมไม่ต่างกันมาก นักแสดงว่าในระยะเวลา 28 วันผลของปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ไม่ได้ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตควบคุม แต่ในช่วง 28 ถึง 90 วัน จะเห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มของกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ในอัตราร้อยละ 10 จะเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เห็นได้ชัดว่ากำลังอัดของคอนกรีต G1R เพิ่มมากกว่าคอนกรีต OR ใน

ปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่เล็กและความพรุนที่ลดลงของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ทำให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR

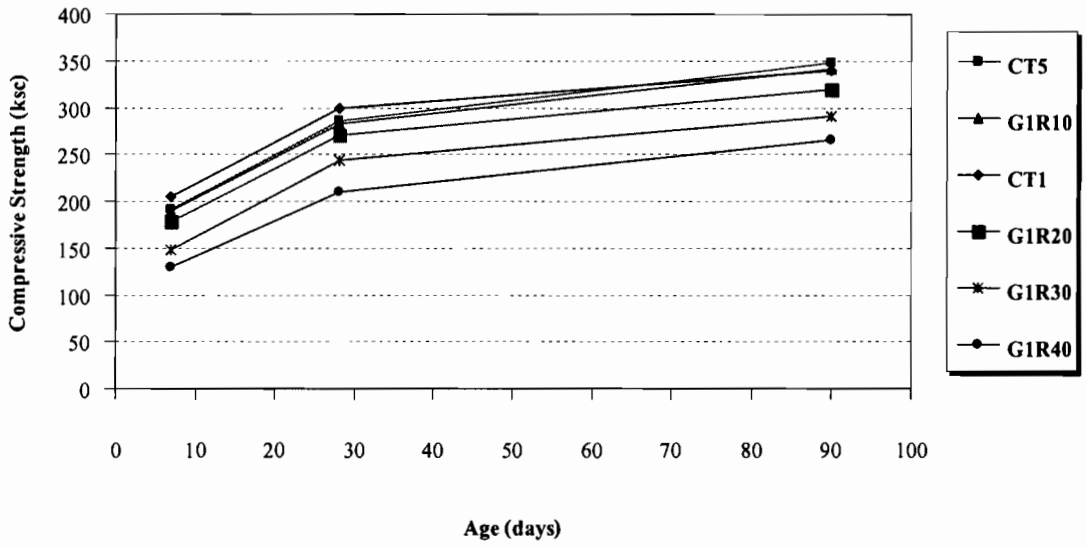
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมาก (G2R) พบว่าคอนกรีตดังกล่าวมีการพัฒนากำลังอัดคล้ายกับการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และ G1R แต่มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างๆกันที่อายุ 28 วัน เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงขึ้นจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และ G1R เป็นอย่างมากที่ระดับการแทนที่ที่เท่ากันทั้งในอายุต้นและอายุปลายดังแสดงในรูป 4.5 เช่น การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีต OR20, G1R20 และ G2R20 ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 197, 271 และ 309 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 66, 91 และ 103 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และแนวโน้มดังกล่าวยังเป็นเช่นเดิมเมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วันด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.6ข. เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R พบว่าคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 241, 214, 183 และ 178 กก/ซม^2 และพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วันเท่ากับ 345, 309, 294 และ 281 กก/ซม^2 โดยที่อายุ 7 และ 28 วันคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังได้รวดเร็ว แต่ช่วงอายุ 28 ถึง 90 วัน อัตราการเพิ่มของกำลังอัดต่ำลงโดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 392, 361, 334 และ 324 กก/ซม^2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีต G2Rในทุกอัตราการแทนที่พบว่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุมซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีต G2R30 และ G2R40 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วัน แต่สามารถพัฒนากำลังอัดให้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 90 วัน ขณะที่คอนกรีต G2R10 และ G2R20 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ในทุกช่วงอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดที่สูงมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็ว อนุภาคที่เล็กมากได้แทรกไปตามช่องว่างต่างๆของคอนกรีต ทำให้เกิดการอัดแน่นในคอนกรีต ซึ่ง Isaia และคณะ (2003) ได้กล่าวไว้ว่าการบดเถ้าแกลบให้มีความละเอียดสูงจะทำให้เถ้าแกลบมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่มากขึ้น

อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ให้สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายกับค่ากำลังอัดที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบในคอนกรีตของงานวิจัยที่ผ่านมา (Ismail และ Waliuddin, 1996; Zhang และ คณะ, 1996; Isaia และ คณะ, 2003) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบดวัสดุความพรุนไม่ได้หมดไป ความพรุนยังมีเหลืออยู่

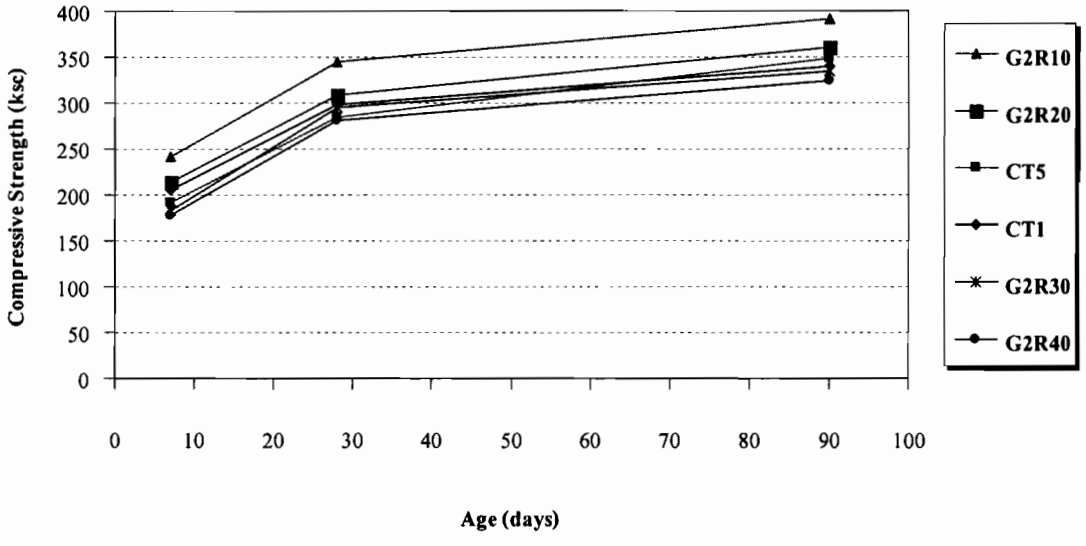
ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ให้สูงขึ้นอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานจึงสูงขึ้นด้วย มีผลทำให้กำลังอัดลดต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ikpong (1993) และ Ismail และ Waliuddin (1996) ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบให้สูงขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าแกลบสูงขึ้นด้วย แต่การปรับปรุงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทำให้การพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เนื่องจากอนุภาคเล็กจึงทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ได้ดีกว่า



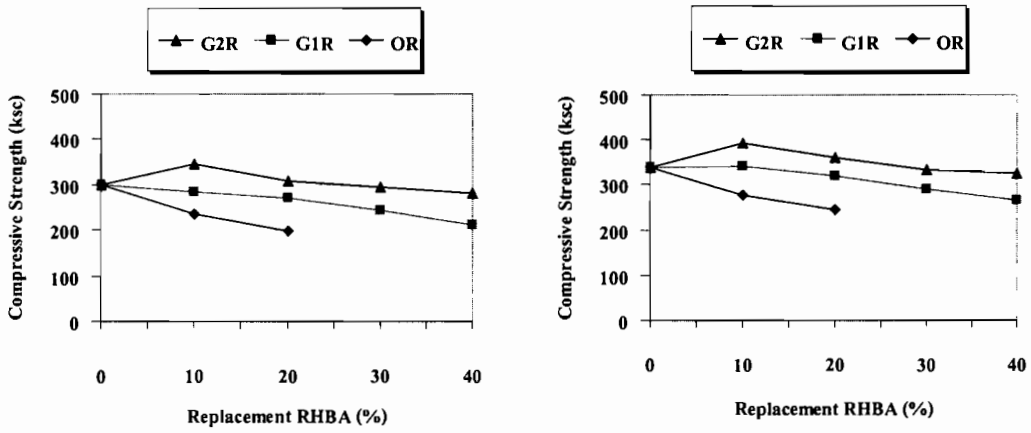
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R



ก. อายุ 28 วัน ข. อายุ 90 วัน

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน

4.3.3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง OP คอนกรีต OP10 และ OP20 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 160 และ 137 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 78 และ 67 ของคอนกรีตควบคุม และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 237 และ 206 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 79 และ 69 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันตามลำดับ แต่ยังคงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 โดยพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มขึ้นเป็น 271 และ 236 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 80 และ 70 ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต OP ในทุกอัตราการแทนที่ยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ทุกอายุการทดสอบและยังไม่มีคอนกรีตส่วนผสมใดที่สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบดต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ต้าควบคุม (Tangchirapat และคณะ, 2007) การแทนที่มากขึ้นยังส่งผลให้กำลังอัดลดลงด้วย เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดอนุภาคมีความพรุนสูงและขนาดใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลทำให้กำลังอัดลดลงเพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้

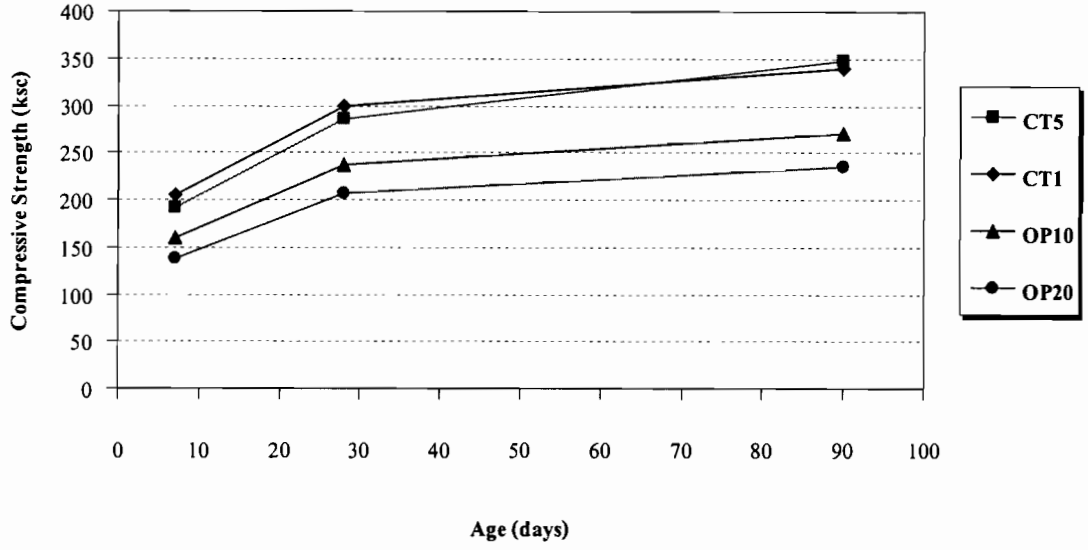
เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากขึ้น G1P ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าคอนกรีตทุกส่วนผสมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน และอัตราการเพิ่มของกำลังอัดจะช้าลงในช่วงอายุ 28 ถึง 90 วัน ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้จะคล้ายกับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในปริมาณที่สูงขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ

(Tangchirapat และคณะ, 2007) ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อปรับปรุงขนาดให้มีความละเอียดเดียวกันนี้และแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง โดยคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 192, 175, 160 และ138 กก/ซม^2 ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน กำลังอัดพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 280, 249, 227 และ 203 กก/ซม^2 ซึ่งเห็นได้ว่าในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วันกำลังอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อพิจารณาร้อยละของกำลังอัดพบว่าที่อายุ 7 และ 28 วันไม่แตกต่างกันนัก ซึ่งที่อายุ 7 วันมีกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในร้อยละการแทนที่ 10, 20, 30 และ 40 มีค่าเท่ากับร้อยละ 93, 85, 78 และ 67 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ในขณะที่อายุ 28 วันกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้ยังคงเป็นร้อยละ 94, 83, 76 และ 68 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากที่อายุ 7 วันมากนัก นั่นแสดงให้เห็นว่าผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากเถ้าปาล์มน้ำมันไม่ชัดเจนมากนักในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน แต่เมื่อคอนกรีตอายุ 90 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98, 87, 79 และ 72 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และคอนกรีต G1P10 สามารถพัฒนากำลังอัดเมื่อมีอายุ 90 วันให้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1 ได้

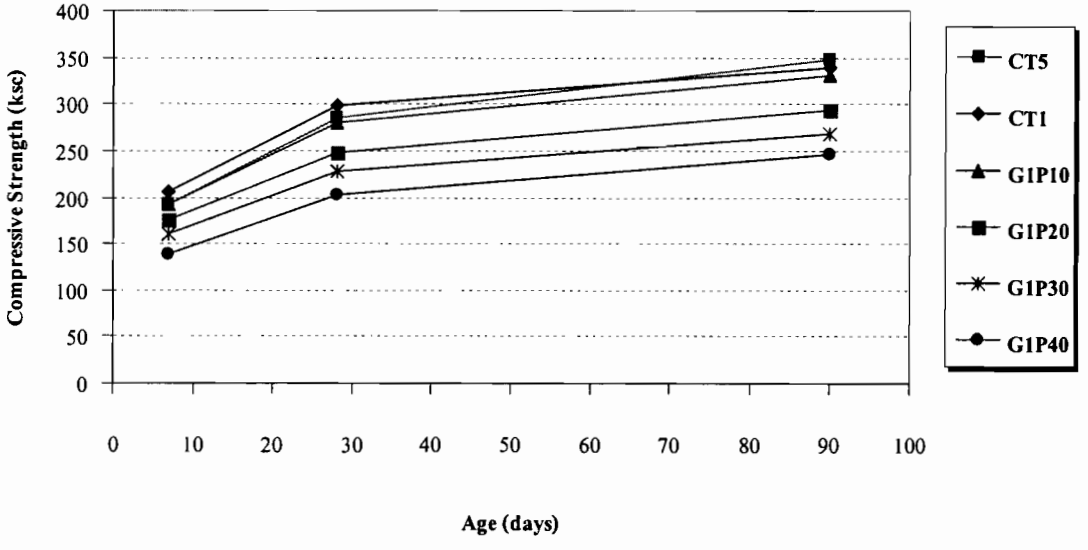
เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดให้ละเอียดมากขึ้น (G2P) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่พัฒนาตามเวลามีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P กล่าวคือคอนกรีตทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วันดังแสดงในรูป 4.9 เมื่อสังเกตจากค่าร้อยละของกำลังอัดจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ถึงร้อยละ 30 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน โดยที่อายุ 7 วัน คอนกรีต G2P10, G2P20 และ G2P30 มีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 102, 96 และ 91 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน แม้ว่ากำลังอัดคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมากจากอายุ 7 วัน แต่ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มของกำลังอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งสังเกตได้จากค่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วันไม่แตกต่างจากที่อายุ 7 วันมากนัก แต่ผลของเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถส่งผลให้กำลังอัด ใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน โดยที่อายุ 90 วันนั้นคอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีกำลังอัดเท่ากับ 358, 344, 331, 299 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 106, 102, 98 และ 88 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ สังเกตเห็นว่าที่อายุ 7 วันขึ้นไป คอนกรีต G2P10 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ทุกอายุการทดสอบ ส่วนคอนกรีต G2P20 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วันและสามารถพัฒนาให้มากกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน และหากพิจารณาคอนกรีต G2P30 ถือว่าค่ากำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีในทุกอายุการทดสอบ ซึ่งพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G2P มีการพัฒนามากกว่าคอนกรีต OP และ G1P อย่างชัดเจน เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถ

ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของจตุพล ตั้งปกาศิตและคณะ (2548) ที่พบว่าวัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีอยู่ แม้ว่าจะบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม แต่การบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.2 ไมครอน สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้สูงถึงร้อยละ 40 และยังคงให้กำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วันเป็นที่น่าพอใจ (ประมาณร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม)

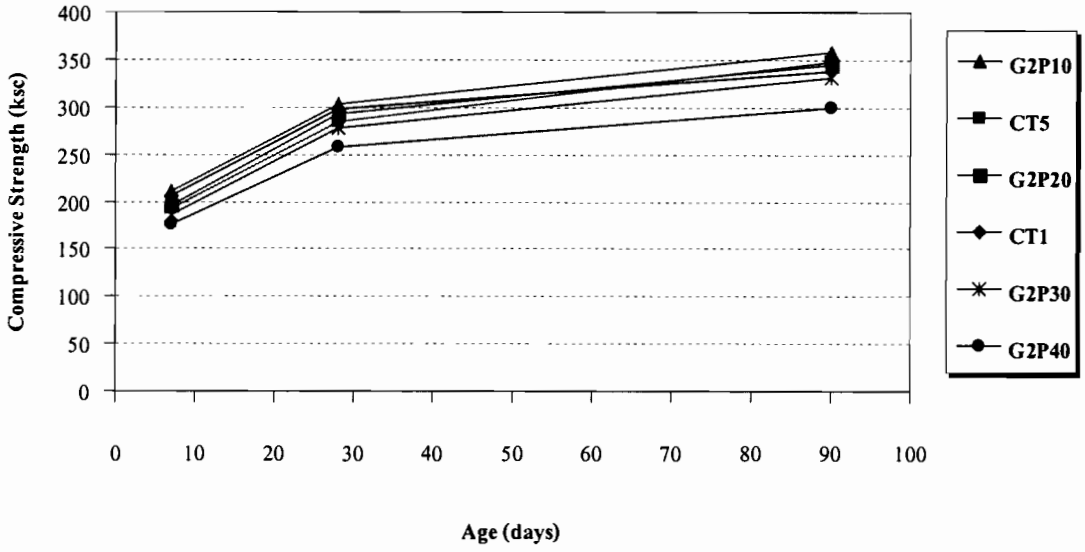
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดระดับเดียวกันและแทนที่เท่ากันที่อายุ 90 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ไม่ชัดเจนมากนัก โดยการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด G2 ในอัตราร้อยละ 20 มีร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 106 และ 102 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันของจตุพล ตั้งปกาศิตและคณะ (2548) ที่พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยจากการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในอัตราร้อยละ 20 พบว่ามอร์ต้าร์มีกำลังอัดที่อายุ 90 วันคิดเป็นร้อยละ 107 และ 105 ของมอร์ต้าควบคุมตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีกำลังอัดสูงกว่าเพียงร้อยละ 2 ซึ่งสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตในทุกการแทนที่พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติด้านกำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน



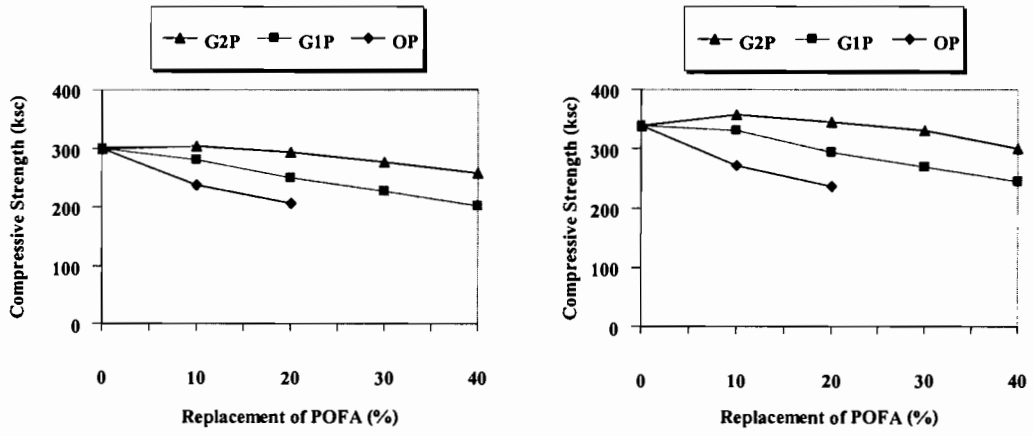
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P



ก. อายุ 28 วัน

ข. อายุ 90 วัน

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ความละเอียดต่างกันที่อายุ 28 และ 90 วัน

4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่แสดงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (K) และแสดงค่าอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตพบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-12} ถึง 1×10^{-13} เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zongjin และ Chung-Kong (2000) และ Chindaprasirt และคณะ (2007) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-12} ถึง 1×10^{-13} เมตรต่อวินาที เช่นเดียวกัน โดยที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีตควบคุม CT1 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ 13.80×10^{-13} และ 5.70×10^{-13} เมตรต่อวินาที (กำลังอัดเท่ากับ 299 และ 339 กก/ซม^2 ตามลำดับ) ขณะที่ Chindaprasirt และคณะ (2007) พบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันเท่ากับ 28.90×10^{-13} เมตรต่อวินาที (กำลังอัดเท่ากับ 289 กก/ซม^2)

4.4.1 ผลของความละเอียดและร้อยละการแทนที่ต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ผลของความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงจะสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลงได้ โดยเห็นผลชัดเจนมากในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ปรับปรุงความละเอียดจาก OR เป็น G1R ส่วนการปรับปรุงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากความละเอียด G1R เป็น G2R ก็ส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเช่นกัน แต่ยังไม่ชัดเจนเหมือนกับการเปลี่ยนความละเอียดจาก OR เป็น G1R เช่น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง OR พบว่าคอนกรีต OR10 และ OR20 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 138.80×10^{-13} และ 399.60×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 10.06 และ 28.96 เท่าของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความละเอียดเป็น G1R สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำลงเป็น 20.0×10^{-13}และ 31.5×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.45 และ 2.28 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ เมื่อเพิ่มความละเอียดเป็น G2R คอนกรีตดังกล่าวมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.80×10^{-13} และ 4.40×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.20 และ 0.32 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ผลของความละเอียด

จะลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ไม่มากนัก และแนวโน้มดังกล่าวนี้เป็นเช่นเดียวกันในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีอนุภาคที่เล็กทำให้ความพรุนของเพสต์ในเนื้อคอนกรีตลดลงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการซึมผ่านอากาศของ Chindaprasirt และคณะ (2005) ที่พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์ความพรุนจะลดลง การซึมผ่านอากาศจะลดลงด้วย

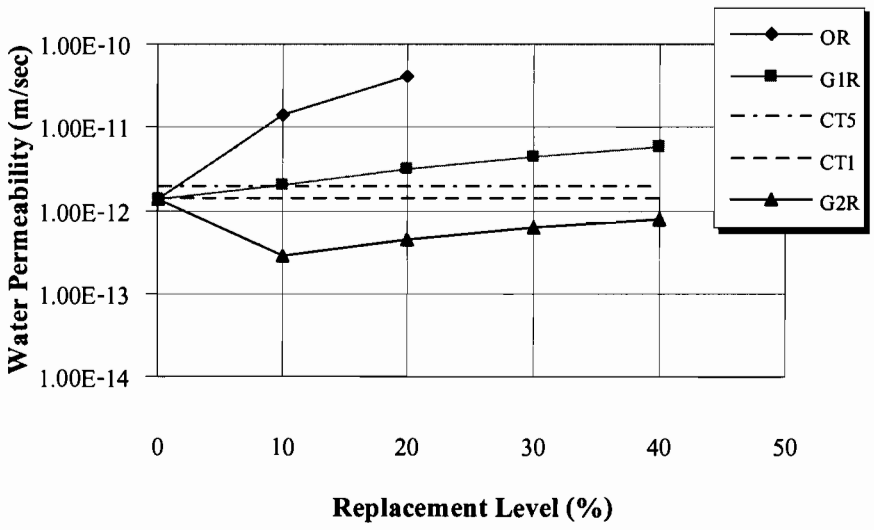
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตตามระยะเวลาบ่มพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ความละเอียดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจะลดลง เช่น ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ที่อายุ 28 วัน มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 20.0×10^{-13}, 31.5×10^{-13}, 43.6×10^{-13} และ 58.0×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.45, 2.28, 3.16 และ 4.20 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีต G1R สามารถพัฒนาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำลงที่อายุ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.80×10^{-13}, 2.10×10^{-13}, 2.70×10^{-13} และ 4.40×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.31, 0.38, 0.48 และ 0.78 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราการแทนที่ แนวโน้มดังกล่าวเป็นเพราะระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเป็นไปได้ยากขึ้น จากการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ (2007) พบว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าถ่านหินที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R เมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ 20 ที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 6.0×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.29 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม จากผลของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดให้มีความละเอียด G1P นั้น มีคุณสมบัติด้านการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง

ตารางที่ 4.4 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม CT1

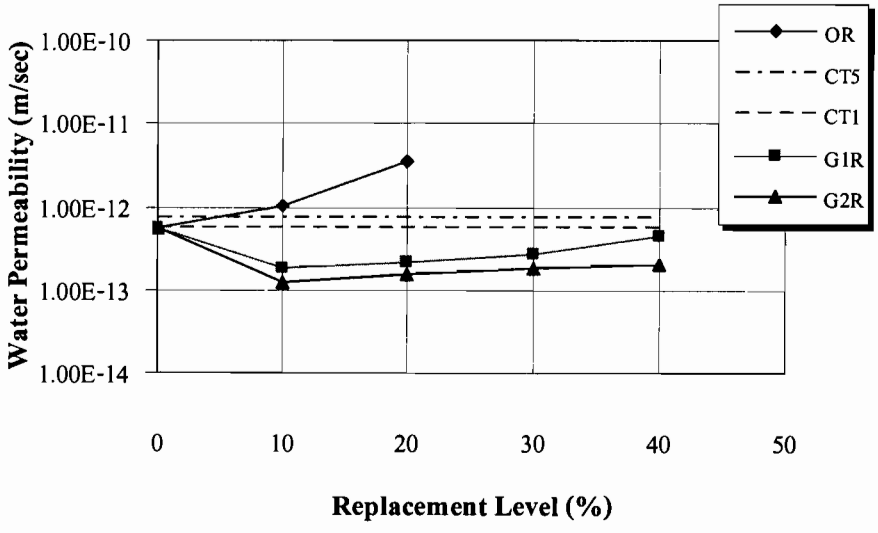
Sample	Coefficient of Water Permeability $\times 10^{-13}$ (K, m/s) (K / K_{CT1})	
	28 days	90 days
CT1	13.80 ***(1.00)***	5.70 ***(1.00)***
CT5	19.30 ***(1.40)***	7.20 ***(1.26)***
OR10	138.80 ***(10.06)***	10.30 ***(1.82)***
OR20	399.60 ***(28.96)***	34.80 ***(1.40)***
G1R10	20.00 ***(1.45)***	1.80 ***(0.31)***
G1R20	31.50 ***(2.28)***	2.10 ***(0.38)***
G1R30	43.60 ***(3.16)***	2.70 ***(0.48)***
G1R40	58.00 ***(4.20)***	4.40 ***(0.78)***
G2R10	2.80 ***(0.20)***	1.20 ***(0.21)***
G2R20	4.40 ***(0.32)***	1.50 ***(0.27)***
G2R30	6.20 ***(0.45)***	1.80 ***(0.31)***
G2R40	7.80 ***(0.57)***	2.00 ***(0.35)***
OP10	118.80 ***(8.61)***	7.40 ***(1.30)***
OP20	290.80 ***(21.07)***	12.90 ***(2.26)***
G1P10	16.50 ***(1.20)***	2.50 ***(0.44)***
G1P20	25.00 ***(1.81)***	3.80 ***(0.67)***
G1P30	30.60 ***(2.22)***	9.50 ***(1.67)***
G1P40	43.80 ***(3.17)***	10.00 ***(1.75)***
G2P10	2.00 ***(0.14)***	1.02 ***(0.18)***
G2P20	2.20 ***(0.16)***	1.60 ***(0.28)***
G2P30	2.60 ***(0.19)***	1.75 ***(0.31)***
G2P40	3.57 ***(0.26)***	2.20 ***(0.39)***

การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้โดยการบดให้มีความละเอียดมากมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลงได้ โดยพิจารณาจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียดมาก พบว่าคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2.80×10^{-13}, 4.40×10^{-13}, 6.20×10^{-13} และ 7.80×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรืออัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.20, 0.32, 0.45 และ 0.57 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราการแทนที่และสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำลงอีกที่อายุ 90 วันโดยมีค่าเท่ากับ 1.20×10^{-13}, 1.50×10^{-13}, 1.80×10^{-13} และ 2.00×10^{-13} เมตรต่อวินาทีหรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.21, 0.27, 0.31 และ 0.35 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดเดียวกันนี้ในอัตราร้อยละ 20 จากการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ (2007) พบว่า ที่อายุ 28 วันคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 9.00×10^{-13} เมตรต่อวินาที โดยมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.31 เท่าของคอนกรีตควบคุมและสามารถลดต่ำลงเท่ากับ 4.20×10^{-13} เมตรต่อวินาทีที่อายุ 90 วันโดยมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.21 เท่าของคอนกรีตควบคุม ซึ่งอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเห็นได้ว่าความละเอียดมีผลต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงมากโดยเฉพาะในคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูง คอนกรีต G2R10 และ G2R20 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วัน แม้ว่าค่า W/B ของคอนกรีต G2R ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม อาจเป็นเพราะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความต้องการน้ำสูงเนื่องจากมีค่า LOI ค่อนข้างสูง ซึ่งอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า W/B เพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และความต่อเนื่องของโพรงในเนื้อคอนกรีตด้วย (Neville, 1995)

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ความละเอียดต่างๆ ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ จากรูปมีแนวโน้มที่ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มากขึ้นอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจะสูงขึ้นด้วยในทุกความละเอียด สาเหตุเพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แม้จะปรับปรุงขนาดให้มีความละเอียดจนมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ แต่ความต้องการน้ำยังสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ จึงเป็นการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต จึงทำให้มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นอีกด้วย เช่นเดียวกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่สูงขึ้นเมื่อความพรุนและปริมาณของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Kearsley และ Wainwright, 2001)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน

4.4.2 ความสัมพันธ์ของความละเอียดและร้อยละการแทนที่ต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

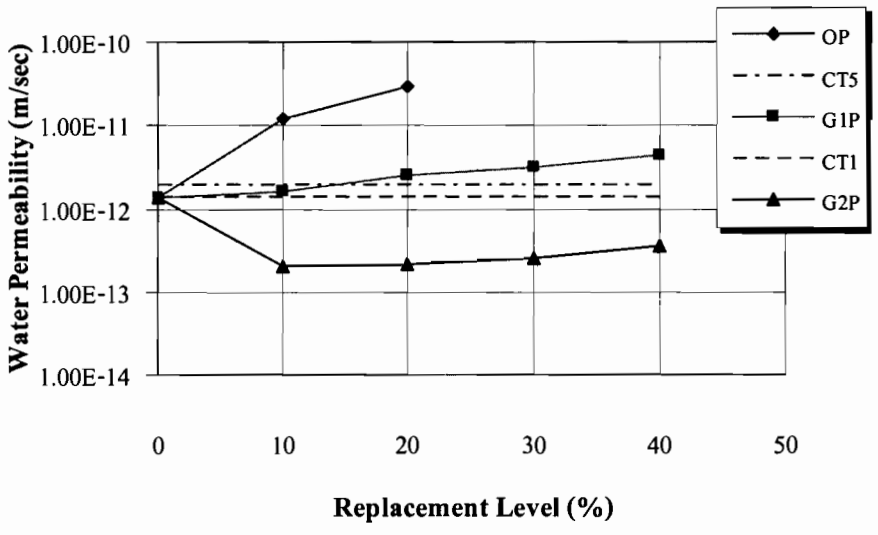
เมื่อพิจารณาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OP) ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีผลไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง กล่าวคือที่อายุ 28 วันคอนกรีต OP10 และ OP20 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 118.80×10^{-13} และ 290.80×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 8.61 และ 21.07 เท่าของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงเมื่ออายุ 90 วันโดยมีค่าเท่ากับ 7.40×10^{-13} และ 12.90×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.30 และ 2.26 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ คอนกรีต OP มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ความพรุนสูง มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม รูปที่ 4.13 และ4.14 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต OP มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตสูงขึ้นโดยเฉพาะที่อายุ 28 วัน พบว่า อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP มากขึ้น

ส่วนคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดปานกลาง (G1P)ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่ามีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 16.50×10^{-13}, 25.00×10^{-13}, 30.60×10^{-13} และ 43.80×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 1.20, 1.81, 2.22 และ 3.17 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และเมื่ออายุเพิ่มเป็น 90 วันมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.50×10^{-13}, 3.80×10^{-13}, 9.50×10^{-13} และ 10.00×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรืออัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.44, 0.67, 1.67 และ 1.75 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงอย่างชัดเจนที่อายุ 90 วัน เช่นเดียวกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดเดียวกัน และที่อายุ 90 วันมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันกับเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P (Chindaprasirt และคณะ, 2007) อย่างไรก็ตามที่อายุ 28 วัน ยังมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะอยู่มาก จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบด G1P ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 90 วัน แสดงให้เห็นว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้นเมื่อแทนที่

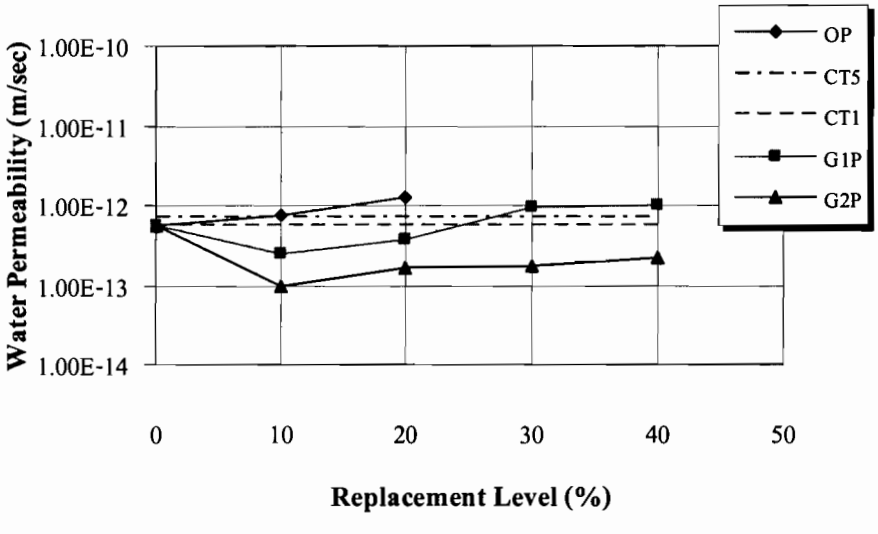
ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีความแน่น และทึบน้ำมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง

คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วันเท่ากับ 2.00×10^{-13}, 2.20×10^{-13}, 2.60×10^{-13} และ 3.57×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.14, 0.16, 0.19 และ 0.26 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน คอนกรีตดังกล่าวสามารถลดอัตราการซึมของน้ำให้ต่ำลงเท่ากับ 1.02×10^{-13}, 1.60×10^{-13}, 1.75×10^{-13} และ 2.20×10^{-13} เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.18, 0.28, 0.31 และ 0.39 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และจากการศึกษาของChindaprasirt และคณะ(2007) พบว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด G2 ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 ที่อายุ 90 วันคอนกรีตมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 2.5×10^{-13}และ2.6×10^{-13}เมตรต่อวินาที หรือมีอัตราส่วนการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 0.12 และ 0.13 เท่าของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ

อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ทั้งที่ความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีตดังกล่าวยังสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ เนื่องจากความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P และ แนวโน้มของอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตคล้ายกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P คือพัฒนาอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และ G1P ในทุกอัตราการแทนที่



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน

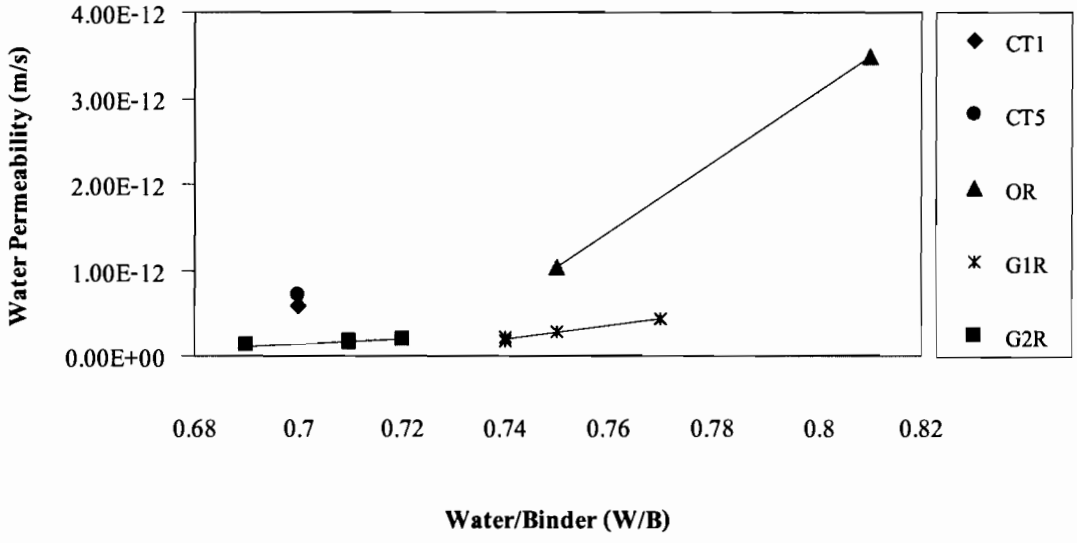


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน

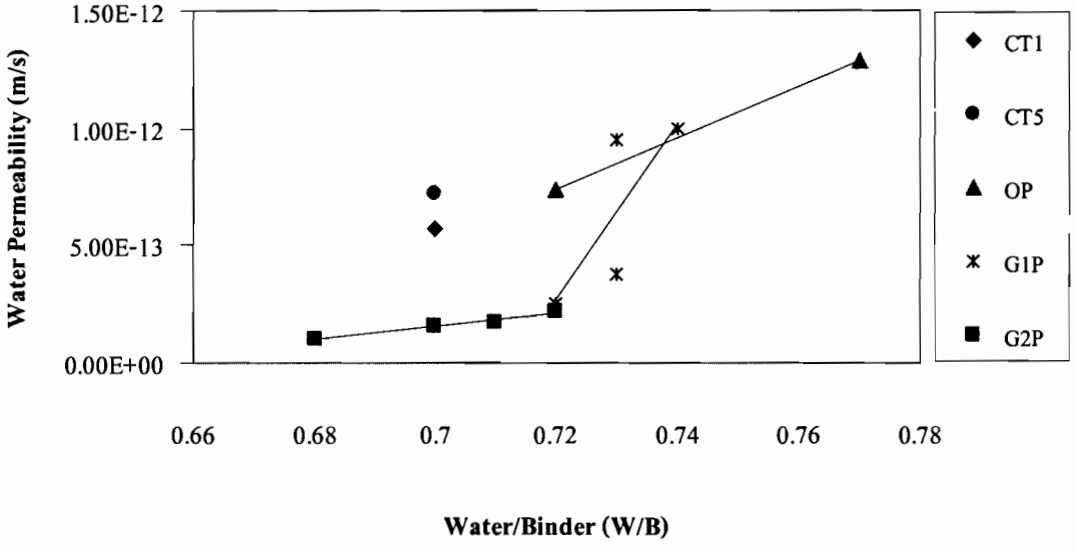
4.4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน เมื่อพิจารณาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดเดียวกัน พบว่าที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น ทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้น และมีความชัดเจนมากขึ้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการบด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าดังกล่าวมีอนุภาคขนาดใหญ่ มีความพรุนและมีความต้องการน้ำมากกว่าเถ้าที่ไม่ผ่านการบดซึ่งผลการทดสอบนี้ สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Abdullah และ Hassan (2002) ที่พบว่ามีปัจจัยอื่นนอกจากอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานคือ ความละเอียดและการแทนที่ที่ต่างกัน ทำให้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาคอนกรีตทั้งหมดที่ทำการทดสอบพบว่าในอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกันมากเช่น คอนกรีต G1R40 มีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.77 และมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 7.80×10^{-13} เมตรต่อวินาที ขณะที่คอนกรีตควบคุมซึ่งมีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 แต่มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใกล้เคียงกันกับคอนกรีต G1R40 คือเท่ากับ 5.70×10^{-13} เมตรต่อวินาที รูป 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน เห็นได้ว่าเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน แต่มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่างกัน และไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่แน่นอน ดังนั้นทั้งรูปที่ 4.15 และ 4.16 จึงสรุปได้ว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตไม่จำเป็นต้องขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน) ความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน และอัตราการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตอีกด้วย



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

รูปที่ 4.17 ถึง 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน และ 90 วันตามลำดับ โดยในพื้นที่ของรูปแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ส่วน (4 Regions) โดยมีจุดตัดของเส้นแบ่งอยู่ที่กำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตควบคุม CT1 ส่วนที่ 1 (Regions 1) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่อยู่ในส่วนนี้มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนที่ 2 (Regions 2) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่อยู่ในส่วนนี้มีค่ากำลังอัดสูงกว่า และมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนที่ 3 (Regions 3) คือ คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และส่วนที่ 4 (Regions 4) แสดงถึงคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าและมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตที่อยู่ในส่วนที่ 4 (Regions4) นี้เป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติดีที่สุด ทั้งคุณสมบัติในด้านของกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้ สามารถบอกได้ว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

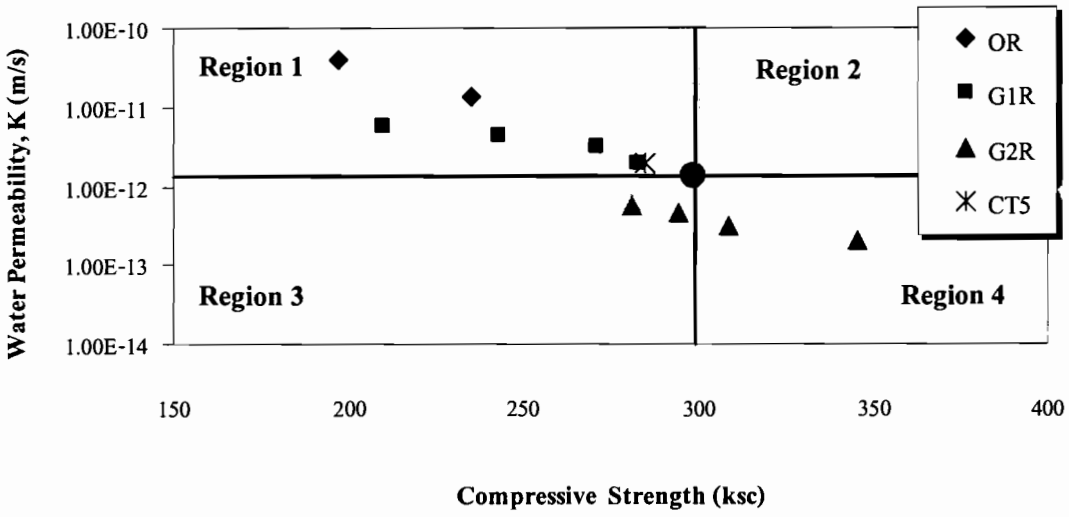
4.4.4.1 ผลของกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 สังเกตได้ว่าคอนกรีต OR ในทุกการแทนที่อยู่ในส่วนที่ 1 ซึ่งมีกำลังอัดต่ำจึงส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ดังนั้นเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง OR จึงไม่เหมาะสมที่นำมาเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทั้งด้านคุณสมบัติของกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

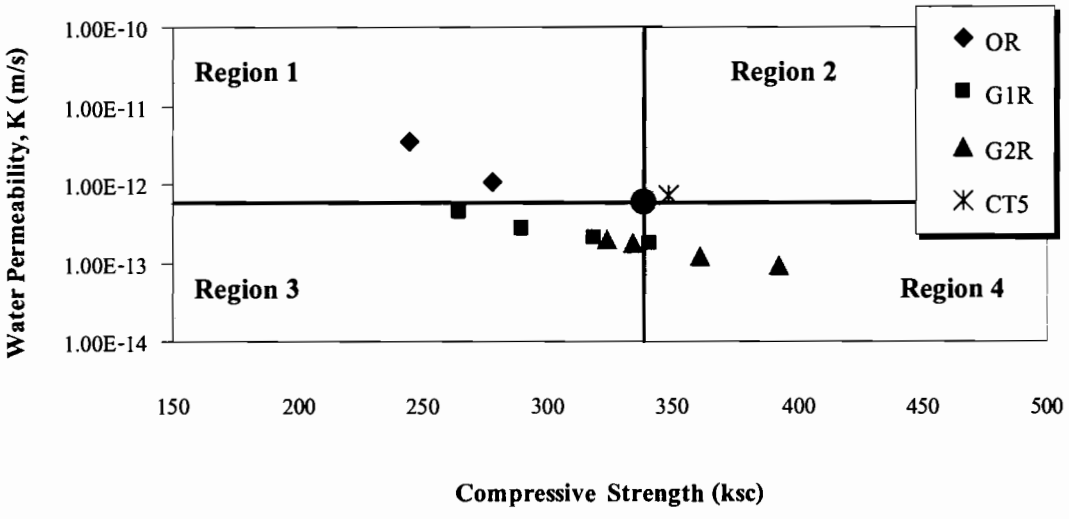
ส่วนคอนกรีตที่ผ่านการบด G1R ในทุกอัตราการแทนที่มีกำลังอัดต่ำและมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตค่อนข้างสูงที่อายุ 28 วัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึงอายุ 90 วัน คอนกรีต G1R10 สามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงกว่าและอัตราการซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีต G1R20, G1R30 และ G1R40 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมด้วย แสดงให้เห็นว่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ไม่ได้แปรผันตามกำลังอัดเพียงอย่างเดียว ความทึบน้ำของคอนกรีตเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถแทรกตัวในโพรงของคอนกรีต ทำให้ช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์และช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้ขนาดของโพรงเฉลี่ยของเพสต์ในคอนกรีตมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงด้วย ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นแม้ว่ามีความแข็งแรงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ (2005) พบว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กในเพสต์

เมื่อบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีความละเอียดมากขึ้น (G2R) พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเป็นคอนกรีตที่มีทั้งคุณสมบัติในการรับกำลังอัดที่สูงกว่า และอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งอายุ 28 และ 90 วัน (Region 4) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pihlajavaara และ Paroll (1975) ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีผลทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ส่วนคอนกรีต G2R30 และ G2R40 ที่อายุ 28 และ 90 วันอยู่ในส่วนที่ 3 (Region 3) ซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ยังคงมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งตรงกันกับการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ (2007) ที่พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดโดยมีร้อยละค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 และแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 40 มีกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากมีการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงจึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้นั้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

จากความสัมพันธ์ของกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เห็นได้ว่า เมื่อบดเถ้าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีความละเอียดมากขึ้นทำให้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานสูงขึ้น และช่วยทำให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดดีขึ้นและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต มีค่าต่ำลงโดยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด G1R เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ที่อายุ 90 วันทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและแข็งมากขึ้น ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R เมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ10 และ 20 ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงและมีความทึบน้ำทั้งอายุ 28 และ 90 วัน การแทนที่ในอัตราร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 98 และ 99 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ส่วนการแทนที่ในอัตราร้อยละ 40 มีค่าร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 94 และ 96 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ซึ่งยังคงมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม อีกทั้งยังมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบด G2R ในงานคอนกรีตสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40 ของน้ำหนักวัสดุประสานโดยยังมีกำลังอัดที่สูงและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อายุ 90 วัน

4.4.4.2 ผลของกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

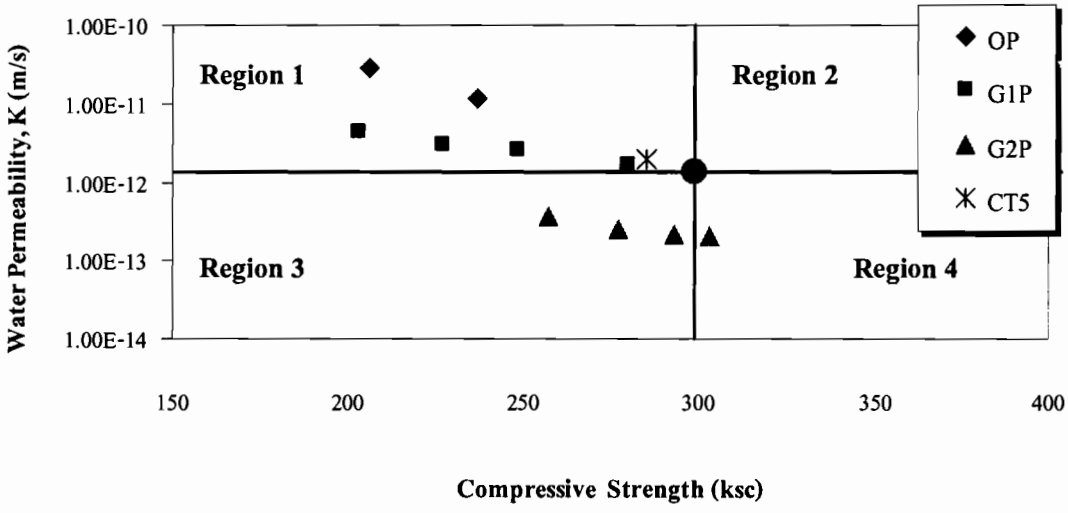
รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจากแหล่งผลิตโดยตรง OP มีแนวโน้มที่เหมือนกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR คือ คอนกรีต OP ในทุกการแทนที่อยู่ในส่วนที่ 1 (Region 1) ซึ่งมีกำลังอัดต่ำจึงส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของดิลกและคณะ (2545) ที่พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมมาก ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง(OP) จึงไม่เหมาะสมที่นำมาเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทั้งด้านกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเช่นเดียวกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OR)

คอนกรีต G1P10 และ G1P20 ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านการบด G1 ที่อายุ 28 วันมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่สามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตให้ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน แต่กำลังอัดยังคงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียด G1P เมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นที่อายุ 90 วัน ส่วนคอนกรีต G1P30 และ G1P40 นั้นไม่สามารถพัฒนาทั้งด้านกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตทั้งที่อายุ 28 และ 90 วันเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP อาจเป็นเพราะว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียด G1P นั้นความพรุนไม่ได้หมดไปเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ให้มากขึ้นคอนกรีตนั้นจึงมีความแน่นน้อยลงจึงทำให้มีกำลังอัดที่ต่ำและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่า

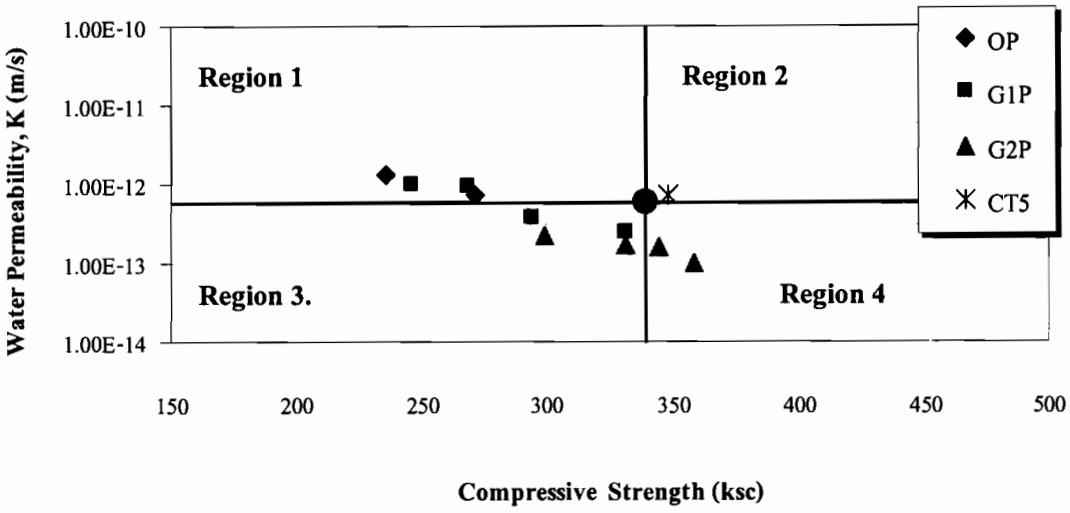
ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด G2P เมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ10 (G2P10) จะอยู่ในส่วนที่ 4 (Region 4) ซึ่งหมายถึงคอนกรีตมีทั้งกำลังอัดสูงและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน เมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ 20 พบว่าคอนกรีต G2P20 ที่อายุ 28 วันมีค่ากำลังอัดสูงและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งค่าร้อยละของกำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับร้อยละ 98 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งไม่แตกต่างจากคอนกรีตควบคุมมาก นัก และสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นที่อายุ 90 วัน ส่วนคอนกรีต G2P30 และ G2P40 ที่อายุ 28 วันอยู่ในส่วนเดียวกันกับคอนกรีต G2P20 แต่ที่อายุ 90 วันยังไม่สามารถพัฒนากำลังอัดให้มากกว่าคอนกรีตควบคุมเช่นเดียวกันกับ G2P20 เหตุเป็นเช่นนี้เพราะว่าการแทนที่ในอัตราร้อยละ 30 และ 40 เป็นการแทนที่ที่สูงเกินไปดังนั้นกำลังจึงไม่ได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ซึ่งอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตไม่ได้ขึ้นอยู่กับความละเอียดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอัตราการแทนที่ของเถ้าด้วย เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดเล็กในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น แต่ความพรุนของ

เถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดยังมีความพรุนเหลืออยู่ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันให้มากขึ้นทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดต่ำลง แต่เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

จากคุณสมบัติของวัสดุทั้งด้านกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสรุปได้ว่า เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียด G1R สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงอัตราร้อยละ 10 สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตเพื่อต้องการลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัดมากนัก ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียด G2R สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในอัตราร้อยละ 40 เนื่องจากให้กำลังอัดสูงและมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นเมื่อมีความละเอียด G1P การแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 20 ยังจัดอยู่ในกลุ่มที่ทึบน้ำ แต่ยังไม่เหมาะสมที่นำไปแทนที่ในคอนกรีตเนื่องจากกำลังอัดต่ำ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียด G2P สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในอัตราร้อยละ 30 และลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ เพราะกำลังอัดยังอยู่ในร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม แต่ไม่ควรเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 30 เพราะแนวโน้มของกำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน



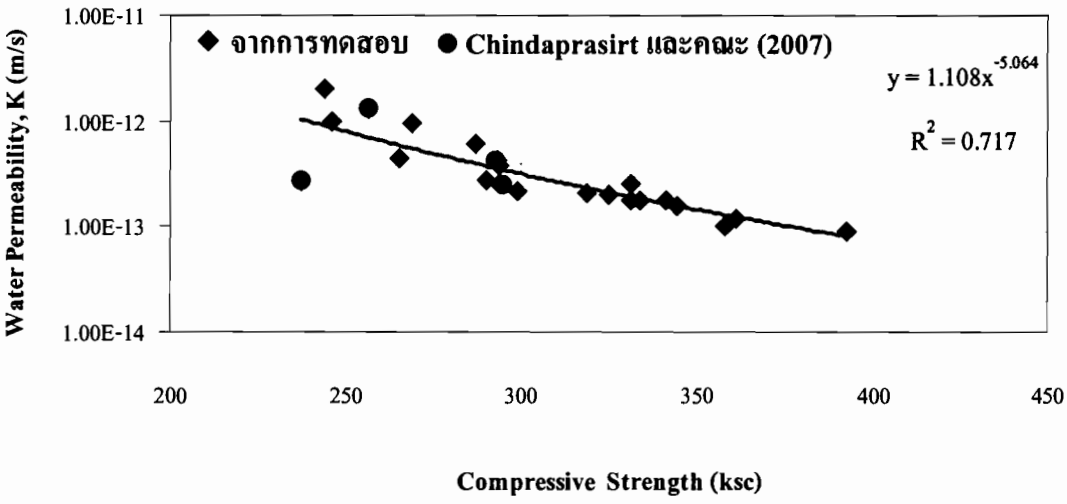
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 90 วัน

4.4.5 กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่ามีการกระจายตัวสูง แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันและเห็นได้ชัดเจนที่อายุ 90 วันดังแสดงในรูป 4.18 และ 4.20 กล่าวคืออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด G1 และ G2 ที่อายุ 90 วัน ซึ่งนำข้อมูลกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดใกล้เคียงกับความละเอียด G2 จากการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ (2007) ที่อายุ 90 วัน (ใช้สัญลักษณ์วงกลม) ดังรูป 4.21 พบว่าสามารถทำนายอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน) ที่นำมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 240-400 กก/ซม^2 โดยสมการ $y = 1.108x^{-5.064}$ โดย x คือ กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ซม^2)ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด และ y คือ อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต(มตร/วินาที)ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบด จากรูปเห็นได้ว่าในช่วงของกำลังอัดระหว่าง 240-300 กก/ซม^2 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีการกระจายตัวยังไม่ชัดเจนมากนัก แต่ที่กำลังอัดระหว่าง 300-400 กก/ซม^2 พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีและสามารถทำนายได้แม่นยำมากกว่า



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านการบด (G1 และ G2) ที่อายุ 90 วัน

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง (OR และ OP) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และมีแนวโน้มต่ำลงมากเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้น คอนกรีต OR และ OP ยังมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกอายุการทดสอบและมีแนวโน้มอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ให้มากขึ้น ดังนั้นเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

5.1.2 การปรับปรุงขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีขนาดเล็กลง เมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าและมีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาจากแหล่งผลิตโดยตรง

5.1.3 เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัด และอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้มากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดปานกลาง (G1R) แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในอัตราร้อยละ 10 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมาก (G2R) แทนที่ได้ถึงร้อยละ 40 ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นที่มีอนุภาคละเอียดมาก (G2P) สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ30

5.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านการบด G1 และ G2 มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจน และสามารถใช้กำลังอัดในการทำนายอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันได้ โดยคอนกรีตมีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 240-400 กก/ซม^2

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นในการศึกษากำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยการวิธีการไหลคงที่ ดังนั้นในอนาคตควรทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการวัดระยะการซึมน้ำเข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อให้สามารถเห็นผลได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5.2.2 จากผลการวิจัยในครั้งนี้เห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและสามารถลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้ ดังนั้นหากสามารถพัฒนาให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดจะสามารถใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากๆ ซึ่งจะเป็นการนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์มากขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548, "การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน", **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**, ฉบับที่ 28 : หน้า 465-476.

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

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และสุรพันธ์ สุคันปรีย์, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8**, ขอนแก่น, หน้า (MAT-163)-(MAT-172).

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2549, "การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต", **เอกสารประกอบการบรรยาย**, อาคารวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 71-79

ณัฐพงษ์ มกระธัช, 2547, **การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 51 หน้า.

ดิลก คูรัตนเวช, สหลาภ หอมวุฒิพงศ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุลและปริญญา จินดาประเสริฐ, 2545. "ผลกระทบของเถ้าถ่านหินที่มีต่อค่าการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต", **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10**, ชลบุรี, หน้า (MAT-55)-(MAT-60).

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

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, 2546, **การศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 152 หน้า.

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

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

สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, "การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต", **วารสารวิจัยและพัฒนา สจ.ธ.**, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 51-76.

เอนก ศิริพานิชกร, 2536, "การพัฒนาคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี", **เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์มาใช้ประโยชน์**, สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 27-28 เมษายน, หน้า (8-1) - (8-18).

Abdullah, M.A. and Hassan, D.A., 2002, "Development of a Permeability Apparatus for Concrete and Mortar", **Cement and Concrete Research**, Vol. 32, pp. 923-929.

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

American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 150 : Standard Specification for Portland Cement", In **1997 Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 149-155.

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

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

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., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C., 2007, "Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash", **Construction and Building Materials**, Vol. 21, pp. 1492-1499.

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.

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

EI-Dieb, A.S. and Hooton, R.D., 1995, "Water-Permeability Measurement of High Performance Concrete using a High- Pressure Triaxial Cell", **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, No. 6, pp. 1199-1208.

Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D., 1989, "The Reaction of Fly Ash in Concrete. A Critical Examination", **Cement and Concrete Research**, Vol. 19, pp. 235-246.

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

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.

Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J., 2001, "Porosity and Permeability of Foamed Concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol. 31, pp. 805-812.

Khatri, R.P. and Sirivivatnanon, V., 1997, "Method for the Determination of Water Permeability of Concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 94, pp. 257-261.

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

Ludirdja, D., Berger, R.L., and Young, J.F., 1989, "Simple method for measuring water permeability of concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 86, No. 5, pp. 433-439.

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.

Pihlajavaara, S.E. and Paroll, H., 1975, "On the Correlation between Permeability Properties and Strength of Concrete", **Cement and Concrete Research**, Vol. 5, pp. 321-328.

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.

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.

Zongjin L. and Chung-Kong C., 2000, "New Water Permeability Test Scheme for Concrete", **ACI Materials Journal**, Vol. 97, No.1, pp. 84-90.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม CT1

Spacimen : 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	21/09/2549	1	3.80	9.95	20.10	11.34	15454	198.84	205
		2	3.75	9.89	19.90	11.04	16983	221.18	
		3	3.74	9.93	19.90	10.98	15158	195.83	
28	10/10/2549	1	3.90	9.98	20.04	11.94	23038	294.65	299
		2	3.78	9.93	20.06	11.22	22426	289.72	
		3	3.78	9.95	20.09	11.22	24220	311.65	
90	11/12/2549	1	3.81	9.97	19.93	11.40	23609	302.56	327
		2	3.79	9.99	20.10	11.28	25423	324.51	
		3	3.82	9.99	20.00	11.46	27676	353.26	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐาน CT5

Spacimen : 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	20/09/2549	1	3.71	9.99	20.01	10.80	15331	195.69	192
		2	3.75	10.05	20.05	11.04	15291	192.85	
		3	3.80	10.13	20.06	11.34	15025	186.53	
28	9/10/2549	1	3.73	10.01	20.04	10.92	22457	285.50	285
		2	3.81	10.07	20.18	11.40	23089	290.05	
		3	3.81	10.05	20.15	11.40	22171	279.63	
90	10/12/2549	1	3.83	10.17	20.13	11.52	28084	345.89	348
		2	3.77	10.09	20.20	11.16	27961	349.87	
		3	3.75	10.07	19.96	11.04	27757	348.70	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR10

Spacimen : 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	27/09/2549	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	18/10/2549	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	19/12/2549	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	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OR20

Spacimen : 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	27/09/2549	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	18/10/2549	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	19/12/2549	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	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R10

Spacimen : 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	6/10/2549	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	27/10/2549	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	28/12/2549	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	

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R20

Spacimen : 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	6/10/2549	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	27/10/2549	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	28/12/2549	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	

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R30

Spacimen : 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	1/10/2549	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	22/10/2549	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	19/10/2549	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	

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1R40

Spacimen : 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	1/10/2549	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	22/10/2549	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	19/12/2549	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	

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R10

Spacimen : 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	5/01/2550	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	

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R20

Spacimen : 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	5/01/2550	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	

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R30

Spacimen : 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	30/12/2549	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	

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2R40

Spacimen : 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	30/12/2549	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	

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP10

Spacimen : 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	11.34	12977	164.32	160
		2	3.76	10.07	21.50	11.10	12283	154.31	
		3	3.77	10.00	20.00	11.16	12712	161.93	
28	9/11/2006	1	3.74	10.05	20.00	10.98	18695	235.79	237
		2	3.79	10.02	20.10	11.28	19256	244.32	
		3	3.72	10.06	20.00	10.86	18359	231.09	
90	10/01/2007	1	3.77	10.08	19.90	11.16	21427	268.64	271
		2	3.73	9.97	20.00	10.92	21233	272.12	
		3	3.77	10.12	20.15	11.16	21978	273.37	

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต OP20

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P10

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P20

Spacimen : G1P20 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	

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P30

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G1P40

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P10

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P20

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P30

Spacimen : 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	

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต G2P40

Spacimen : 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	

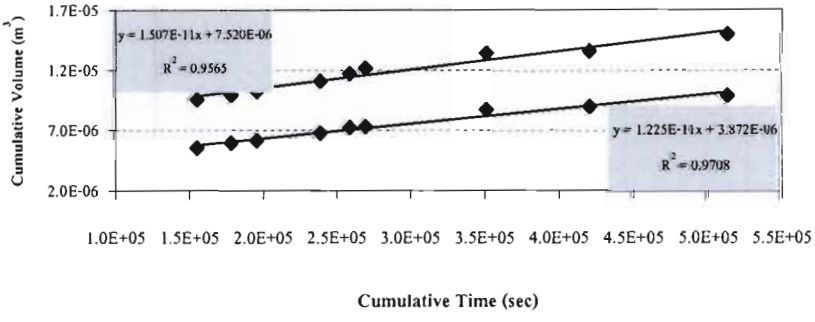
ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 28 วัน

Sample	CT1	Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	12/10/2006	10:30	45900	154800	33.20			
2	12/10/2006	16:54	23040	177840	32.95	0.25	3.848E-07	5.93E-06
3	12/10/2006	21:46	17520	195360	32.80	0.15	2.309E-07	6.16E-06
4	13/10/2006	9:45	43140	238500	32.40	0.4	6.158E-07	6.77E-06
5	13/10/2006	15:20	20100	258600	32.10	0.3	4.618E-07	7.24E-06
6	13/10/2006	18:15	10500	269100	32.05	0.05	7.697E-08	7.31E-06
7	14/10/2006	16:58	81780	350880	31.15	0.9	1.385E-06	8.70E-06
8	15/10/2006	12:12	69240	420120	31.00	0.15	2.309E-07	8.93E-06
9	16/10/2006	13:57	92700	512820	30.40	0.6	9.236E-07	9.85E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	12/10/2006	10:30	45900	154800	31.10			
2	12/10/2006	16:54	23040	177840	30.85	0.3	3.85E-07	9.93E-06
3	12/10/2006	21:46	17520	195360	30.65	0.2	3.08E-07	1.02E-05
4	13/10/2006	9:45	43140	238500	30.10	0.5	8.47E-07	1.11E-05
5	13/10/2006	15:20	20100	258600	29.70	0.4	6.16E-07	1.17E-05
6	13/10/2006	18:15	10500	269100	29.40	0.3	4.62E-07	1.22E-05
7	14/10/2006	16:58	81780	350880	28.60	0.8	1.23E-06	1.34E-05
8	15/10/2006	12:12	69240	420120	28.50	0.1	1.54E-07	1.35E-05
9	16/10/2006	13:57	92700	512820	27.60	0.9	1.39E-06	1.49E-05



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT1 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

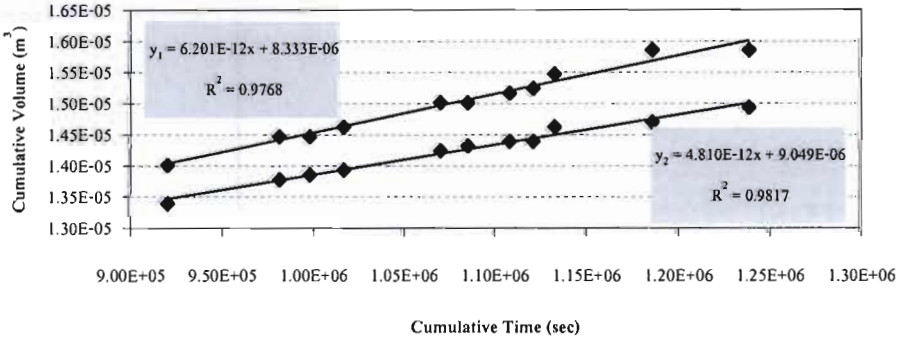
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.21	cm.
L_2	=	4.05	cm.

K_1	=	1.25E-12	m/sec
K_2	=	1.52E-12	m/sec
K_{avg}	=	1.38E-12	m/sec

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 90 วัน

Sample	CT1	Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/12/2006	18:08	67320	919920	30.05			
2	25/12/2006	15:45	77820	997740	29.75	0.3	4.618E-07	1.39E-05
3	25/12/2006	20:57	18720	1016460	29.70	0.05	7.697E-08	1.39E-05
4	26/12/2006	11:49	53520	1069980	29.50	0.2	3.079E-07	1.42E-05
5	26/12/2006	15:58	14940	1084920	29.45	0.05	7.697E-08	1.43E-05
6	26/12/2006	22:21	22980	1107900	29.40	0.05	7.697E-08	1.44E-05
7	27/12/2006	5:12	24660	1132560	29.25	0.15	2.309E-07	1.46E-05
8	27/12/2006	20:00	53280	1185840	29.20	0.05	7.697E-08	1.47E-05
9	28/12/2006	10:34	52440	1238280	29.05	0.15	2.309E-07	1.49E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/12/2006	18:08	67320	919920	29.65			
2	25/12/2006	15:45	77820	997740	29.35	0.3	4.62E-07	1.45E-05
3	25/12/2006	20:57	18720	1016460	29.25	0.1	1.54E-07	1.46E-05
4	26/12/2006	11:49	53520	1069980	29.00	0.3	3.85E-07	1.50E-05
5	26/12/2006	15:58	14940	1084920	29.00	0.0	0.00E+00	1.50E-05
6	26/12/2006	22:21	22980	1107900	28.90	0.1	1.54E-07	1.52E-05
7	27/12/2006	5:12	24660	1132560	28.70	0.2	3.08E-07	1.55E-05
8	27/12/2006	20:00	53280	1185840	28.65	0.1	7.70E-08	1.55E-05
9	28/12/2006	10:34	52440	1238280	28.45	0.0	0.00E+00	1.55E-05



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT1 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

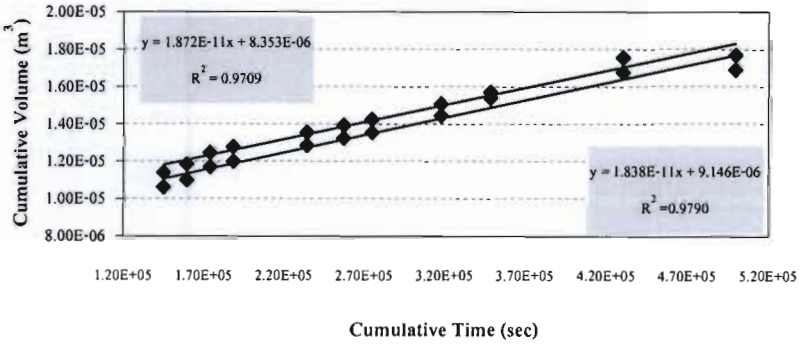
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	9.98	cm.
L_1	=	4.02	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	4.78E-13	m/sec
K_2	=	6.26E-13	m/sec
K_{avg}	=	5.70E-13	m/sec

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม CT5 ที่อายุ 28 วัน

Sample	CT5	Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	11/10/2006	17:45:00	14400	173700	25.70			
2	11/10/2006	21:45:00	14400	188100	25.50	0.2	3.079E-07	1.20E-05
3	12/10/2006	10:30:00	45900	234000	24.95	0.6	8.467E-07	1.29E-05
4	12/10/2006	16:54:00	23040	257040	24.70	0.3	3.848E-07	1.32E-05
5	12/10/2006	21:46:00	17520	274560	24.50	0.2	3.079E-07	1.35E-05
6	13/10/2006	9:45:00	43140	317700	23.90	0.6	9.236E-07	1.45E-05
7	13/10/2006	18:15:00	30600	348300	23.30	0.6	9.236E-07	1.54E-05
8	14/10/2006	16:58:00	81780	430080	22.40	0.9	1.385E-06	1.68E-05
9	15/10/2006	12:12:00	69240	499320	22.30	0.1	1.539E-07	1.69E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	11/10/2006	17:45:00	14400	173700	24.80			
2	11/10/2006	21:45:00	14400	188100	24.60	0.2	3.08E-07	1.28E-05
3	12/10/2006	10:30:00	45900	234000	24.10	0.5	7.70E-07	1.35E-05
4	12/10/2006	16:54:00	23040	257040	23.85	0.3	3.85E-07	1.39E-05
5	12/10/2006	21:46:00	17520	274560	23.65	0.2	3.08E-07	1.42E-05
6	13/10/2006	9:45:00	43140	317700	23.10	0.5	8.47E-07	1.51E-05
7	13/10/2006	18:15:00	30600	348300	22.70	0.4	6.16E-07	1.57E-05
8	14/10/2006	16:58:00	81780	430080	21.50	1.2	1.85E-06	1.75E-05
9	15/10/2006	12:12:00	69240	499320	21.40	0.1	1.54E-07	1.77E-05



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT5 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

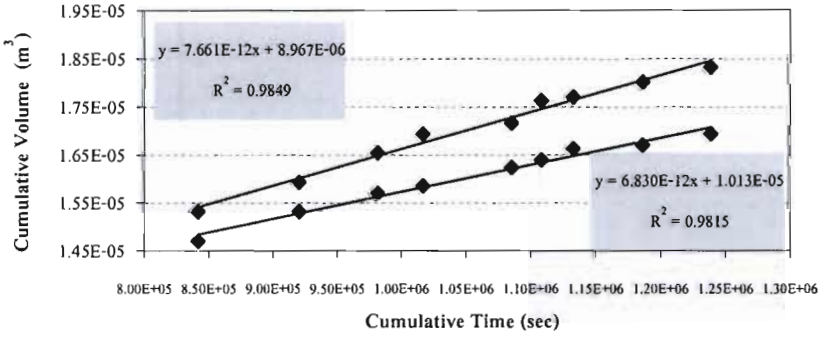
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.13	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	1.94E-12	m/sec
K_2	=	1.93E-12	m/sec
K_{avg}	=	1.93E-12	m/sec

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุม CT5 ที่อายุ 90 วัน

Sample	CT5	Age	90 Days	Sample No.	1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	23/12/2006	20:19:00	85440	841380	29.40			
2	24/12/2006	18:08:00	78540	919920	29.00	0.40	6.16E-07	1.53E-05
3	25/12/2006	11:09:00	61260	981180	28.75	0.25	3.85E-07	1.57E-05
4	25/12/2006	20:57:00	35280	1016460	28.65	0.10	1.54E-07	1.59E-05
5	26/12/2006	15:58:00	68460	1084920	28.40	0.25	3.85E-07	1.62E-05
6	26/12/2006	22:21:00	22980	1107900	28.30	0.10	1.54E-07	1.64E-05
7	27/12/2006	5:12:00	24660	1132560	28.15	0.15	2.31E-07	1.66E-05
8	27/12/2006	20:00:00	53280	1185840	28.10	0.05	7.70E-08	1.67E-05
9	28/12/2006	10:34:00	52440	1238280	27.95	0.15	2.31E-07	1.69E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	23/12/2006	20:19:00	85,440	841380	28.80			
2	24/12/2006	18:08:00	78540	919920	28.40	0.4	6.16E-07	1.59E-05
3	25/12/2006	11:09:00	61260	981180	28.15	0.4	6.16E-07	1.65E-05
4	25/12/2006	20:57:00	35280	1016460	28.00	0.3	3.85E-07	1.69E-05
5	26/12/2006	15:58:00	68460	1084920	27.70	0.1	2.31E-07	1.72E-05
6	26/12/2006	22:21:00	22980	1107900	27.65	0.3	4.62E-07	1.76E-05
7	27/12/2006	5:12:00	24660	1132560	27.45	0.1	7.70E-08	1.77E-05
8	27/12/2006	20:00:00	53280	1185840	27.40	0.2	3.08E-07	1.80E-05
9	28/12/2006	10:34:00	52440	1238280	27.20	0.2	3.08E-07	1.83E-05



รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต CT5 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.02	cm.
L_2	=	4.16	cm.

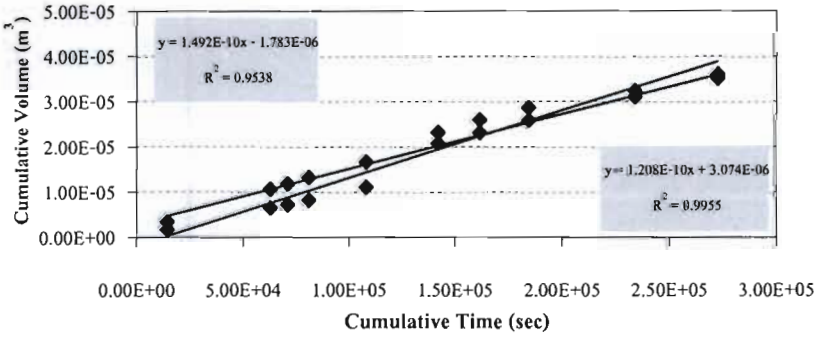
K_1	=	6.56E-13	m/sec
K_2	=	7.83E-13	m/sec
K_{avg}	=	7.20E-13	m/sec

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR10 ที่อายุ 28 วัน

Sample	OR10	Age	28 Days	Sample No.	1--2

Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	22/10/2006	20:00:00	14220	14220	34.05			
2	23/10/2006	11:43:00	8040	70800	28.60	0.80	1.232E-06	1.19E-05
3	23/10/2006	14:32:00	10140	80940	27.75	0.85	1.31E-06	1.32E-05
4	23/10/2006	22:02:00	27000	107940	25.50	2.25	3.464E-06	1.66E-05
5	24/10/2006	7:27:00	33900	141840	22.80	2.70	4.16E-06	2.08E-05
6	24/10/2006	12:54:00	19620	161460	21.30	1.50	2.31E-06	2.31E-05
7	24/10/2006	19:14:00	22800	184260	19.55	1.75	2.694E-06	2.58E-05
8	25/10/2006	9:01:00	49620	233880	16.20	3.35	5.16E-06	3.09E-05
9	25/10/2006	19:43:00	38520	272400	13.50	2.70	4.156E-06	3.51E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	22/10/2006	20:00:00	14220	14220	34.85			
2	23/10/2006	11:43:00	8040	70800	31.30	0.5	7.70E-07	7.24E-06
3	23/10/2006	14:32:00	10140	80940	30.65	0.7	1.00E-06	8.24E-06
4	23/10/2006	22:02:00	27000	107940	28.80	1.9	2.85E-06	1.11E-05
5	24/10/2006	7:27:00	33900	141840	21.00	7.8	1.20E-05	2.31E-05
6	24/10/2006	12:54:00	19620	161460	19.20	1.8	2.77E-06	2.59E-05
7	24/10/2006	19:14:00	22800	184260	17.40	1.8	2.77E-06	2.86E-05
8	25/10/2006	9:01:00	49620	233880	15.00	2.4	3.69E-06	3.23E-05
9	25/10/2006	19:43:00	38520	272400	12.60	2.4	3.69E-06	3.60E-05



รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

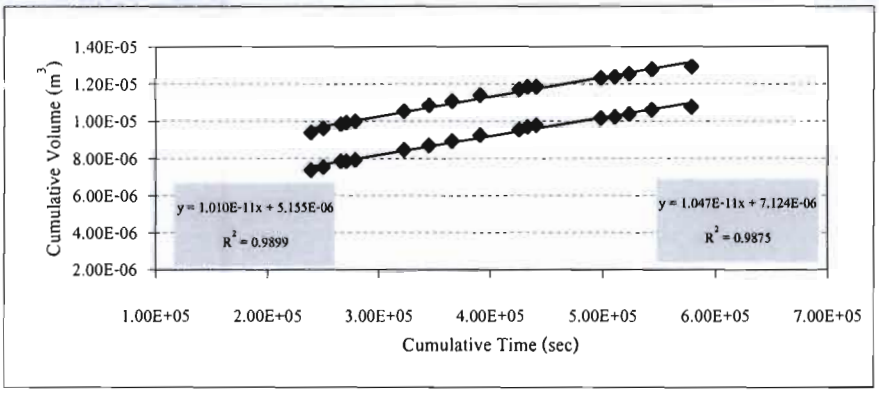
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.05	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	1.23E-11	m/sec
K_2	=	1.55E-11	m/sec
K_{avg}	=	**1.39E-11**	m/sec

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR10 ที่อายุ 90 วัน

Sample	OR10	Age	90 Days	Sample No.	1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	20/1/2007	18:15:00	15840	265500	31.80	0.1	2.31E-07	9.85E-06
2	20/1/2007	19:34:00	4740	270240	31.75	0.1	7.70E-08	9.93E-06
3	20/1/2007	21:51:00	8220	278460	31.70	0.1	7.70E-08	1.00E-05
4	21/1/2007	10:01:00	43800	322260	31.35	0.3	5.39E-07	1.05E-05
5	21/1/2007	16:15:00	22440	344700	31.15	0.2	3.08E-07	1.09E-05
6	21/1/2007	22:01:00	20760	365460	31.00	0.1	2.31E-07	1.11E-05
8	22/1/2007	14:37:00	34620	425220	30.60	0.2	3.08E-07	1.17E-05
9	22/1/2007	16:44:00	7620	432840	30.50	0.1	1.54E-07	1.19E-05
10	22/1/2007	18:56:00	7920	440760	30.50	0.0	0.00E+00	1.19E-05
11	23/1/2007	10:52:00	57360	498120	30.20	0.3	4.62E-07	1.23E-05
12	23/1/2007	14:14:00	12120	510240	30.15	0.1	7.70E-08	1.24E-05
13	23/1/2007	17:49:00	12900	523140	30.05	0.1	1.54E-07	1.25E-05
14	23/1/2007	23:23:00	20040	543180	29.90	0.2	2.31E-07	1.28E-05
15	24/1/2007	9:10:00	35220	578400	29.80	0.1	1.54E-07	1.29E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	20/1/2007	18:15:00	15840	265500	33.50	0.20	3.08E-07	7.85E-06
2	20/1/2007	19:34:00	4740	270240	33.50	0.00	0.00E+00	7.85E-06
3	20/1/2007	21:51:00	8220	278460	33.45	0.05	7.70E-08	7.93E-06
4	21/1/2007	10:01:00	43800	322260	33.10	0.35	5.39E-07	8.47E-06
5	21/1/2007	16:15:00	22440	344700	32.95	0.15	2.31E-07	8.70E-06
6	21/1/2007	22:01:00	20760	365460	32.80	0.15	2.31E-07	8.93E-06
8	22/1/2007	14:37:00	34620	425220	32.40	0.20	3.08E-07	9.54E-06
9	22/1/2007	16:44:00	7620	432840	32.30	0.10	1.54E-07	9.70E-06
10	22/1/2007	18:56:00	7920	440760	32.25	0.05	7.70E-08	9.78E-06
11	23/1/2007	10:52:00	57360	498120	32.00	0.25	3.85E-07	1.02E-05
12	23/1/2007	14:14:00	12120	510240	31.95	0.05	7.70E-08	1.02E-05
13	23/1/2007	17:49:00	12900	523140	31.85	0.10	1.54E-07	1.04E-05
14	23/1/2007	23:23:00	20040	543180	31.70	0.15	2.31E-07	1.06E-05
15	24/1/2007	9:10:00	35220	578400	31.60	0.10	1.54E-07	1.08E-05



รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

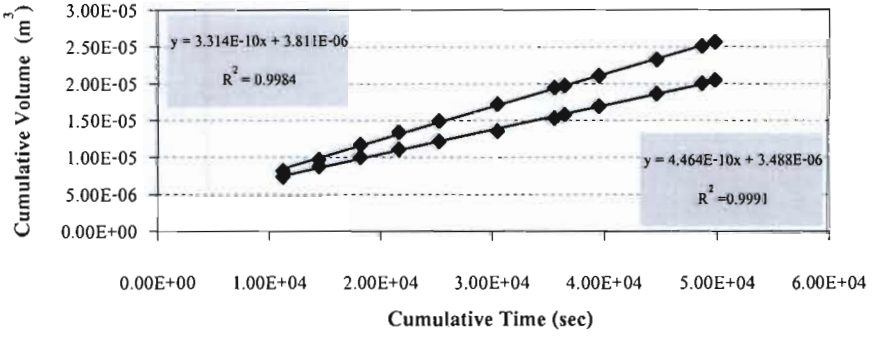
D_1	=	10.05	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.02	cm.
L_2	=	4.01	cm.

K_1	=	1.02E-12	m/sec
K_2	=	1.05E-12	m/sec
K_{avg}	=	**1.03E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR20 ที่อายุ 28 วัน

Sample	OR20	Age	28 Days	Sample No.	1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	21/10/2006	14:13:00	3480.00	21600	25.30			
2	21/10/2006	15:13:00	3600.00	25200	24.60	0.70	1.08E-06	1.22E-05
3	21/10/2006	16:40:00	5220.00	30420	23.70	0.90	1.39E-06	1.35E-05
4	21/10/2006	18:05:00	5100.00	35520	22.55	1.15	1.77E-06	1.53E-05
5	21/10/2006	18:20:00	900.00	36420	22.25	0.30	4.62E-07	1.58E-05
6	21/10/2006	19:11:00	3060.00	39480	21.50	0.75	1.15E-06	1.69E-05
7	21/10/2006	20:36:00	5100.00	44580	20.40	1.10	1.69E-06	1.86E-05
8	21/10/2006	21:43:00	4020.00	48600	19.50	0.90	1.39E-06	2.00E-05
9	21/10/2006	22:02:00	1140.00	49740	19.20	0.30	4.618E-07	2.05E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	21/10/2006	14:13:00	3,480	21600	30.00			
2	21/10/2006	15:13:00	3600	25200	29.00	1.0	1.54E-06	1.49E-05
3	21/10/2006	16:40:00	5220	30420	27.50	1.5	2.31E-06	1.72E-05
4	21/10/2006	18:05:00	5100	35520	26.05	1.5	2.23E-06	1.95E-05
5	21/10/2006	18:20:00	900	36420	25.90	0.2	2.31E-07	1.97E-05
6	21/10/2006	19:11:00	3060	39480	25.00	0.9	1.39E-06	2.11E-05
7	21/10/2006	20:36:00	5100	44580	23.60	1.4	2.16E-06	2.32E-05
8	21/10/2006	21:43:00	4020	48600	22.40	1.2	1.85E-06	2.51E-05
9	21/10/2006	22:02:00	1140	49740	22.05	0.3	5.39E-07	2.56E-05



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

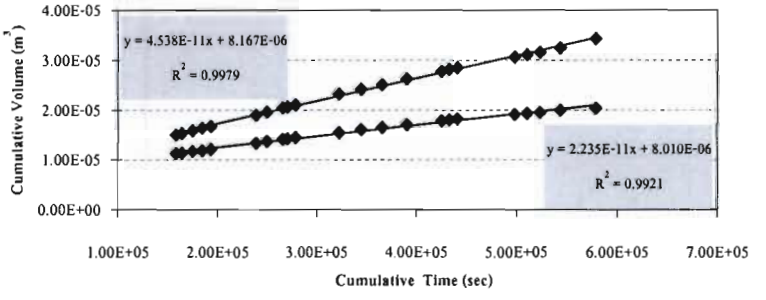
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.15	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	3.43E-11	m/sec
K_2	=	4.56E-11	m/sec
K_{avg}	=	4.00E-11	m/sec

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OR20 ที่อายุ 90 วัน

Sample	OR20	Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	19/1/2007	22:07:00	8700	193020	27.60	0.3	3.85E-07	1.67E-05
2	20/1/2007	13:51:00	10980	249660	25.75	0.4	6.16E-07	1.96E-05
3	20/1/2007	18:15:00	15840	265500	25.20	0.6	8.47E-07	2.04E-05
4	20/1/2007	19:34:00	4740	270240	25.05	0.1	2.31E-07	2.06E-05
5	20/1/2007	21:51:00	8220	278460	24.80	0.3	3.85E-07	2.10E-05
6	21/1/2007	10:01:00	43800	322260	23.40	1.4	2.16E-06	2.32E-05
7	21/1/2007	16:15:00	22440	344700	22.75	0.6	1.00E-06	2.42E-05
8	21/1/2007	22:01:00	20760	365460	22.15	0.6	9.24E-07	2.51E-05
9	22/1/2007	5:00:00	25140	390600	21.40	0.8	1.15E-06	2.62E-05
10	22/1/2007	14:37:00	34620	425220	20.45	0.9	1.46E-06	2.77E-05
11	22/1/2007	16:44:00	7620	432840	20.20	0.3	3.85E-07	2.81E-05
12	22/1/2007	18:56:00	7920	440760	20.00	0.2	3.08E-07	2.84E-05
13	23/1/2007	10:52:00	57360	498120	18.60	1.4	2.16E-06	3.06E-05
14	23/1/2007	14:14:00	12120	510240	18.30	0.3	4.62E-07	3.10E-05
15	23/1/2007	17:49:00	12900	523140	17.95	0.4	5.39E-07	3.16E-05
16	23/1/2007	23:23:00	20040	543180	17.40	0.6	8.47E-07	3.24E-05
17	24/1/2007	9:10:00	35220	578400	16.20	1.2	1.85E-06	3.43E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	19/1/2007	22:07:00	8700	193020	30.75	0.15	2.31E-07	1.21E-05
2	20/1/2007	13:51:00	10980	249660	29.70	0.25	3.85E-07	1.37E-05
3	20/1/2007	18:15:00	15840	265500	29.45	0.25	3.85E-07	1.41E-05
4	20/1/2007	19:34:00	4740	270240	29.35	0.10	1.54E-07	1.42E-05
5	20/1/2007	21:51:00	8220	278460	29.20	0.15	2.31E-07	1.45E-05
6	21/1/2007	10:01:00	43800	322260	28.55	0.65	1.00E-06	1.55E-05
7	21/1/2007	16:15:00	22440	344700	28.20	0.35	5.39E-07	1.60E-05
8	21/1/2007	22:01:00	20760	365460	27.90	0.30	4.62E-07	1.65E-05
9	22/1/2007	5:00:00	25140	390600	27.55	0.35	5.39E-07	1.70E-05
10	22/1/2007	14:37:00	34620	425220	27.05	0.50	7.70E-07	1.78E-05
11	22/1/2007	16:44:00	7620	432840	26.95	0.10	1.54E-07	1.79E-05
12	22/1/2007	18:56:00	7920	440760	26.80	0.15	2.31E-07	1.82E-05
13	23/1/2007	10:52:00	57360	498120	26.20	0.60	9.24E-07	1.91E-05
14	23/1/2007	14:14:00	12120	510240	26.10	0.10	1.54E-07	1.92E-05
15	23/1/2007	17:49:00	12900	523140	25.95	0.15	2.31E-07	1.95E-05
16	23/1/2007	23:23:00	20040	543180	25.65	0.30	4.62E-07	1.99E-05
17	24/1/2007	9:10:00	35220	578400	25.40	0.25	3.85E-07	2.03E-05



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OR20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

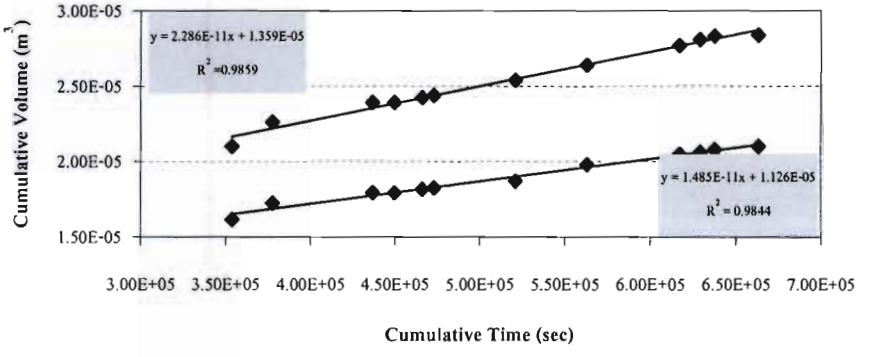
D_1	=	10.13	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.05	cm.

K_1	=	4.81E-12	m/sec
K_2	=	2.15E-12	m/sec
K_{avg}	=	**3.48E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R10 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1R10		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/11/2006	10:18:00	68700	353460	21.80			
2	1/11/2006	16:59:00	24060	377520	20.75	1.05	1.62E-06	2.26E-05
3	2/11/2006	9:26:00	59220	436740	19.90	0.85	1.31E-06	2.39E-05
4	2/11/2006	13:01:00	12900	449640	19.90	0.00	0.00E+00	2.39E-05
5	3/11/2006	8:50:00	47940	520980	18.95	0.65	1.00E-06	2.54E-05
6	3/11/2006	20:26:00	41760	562740	18.30	0.65	1.00E-06	2.64E-05
7	4/11/2006	11:27:00	54060	616800	17.45	0.85	1.31E-06	2.77E-05
8	4/11/2006	14:48:00	12060	628860	17.20	0.25	3.85E-07	2.81E-05
9	4/11/2006	17:09:00	8460	637320	17.05	0.15	2.31E-07	2.83E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/11/2006	10:18:00	68700	353460	27.15			
2	1/11/2006	16:59:00	24060	377520	26.45	0.7	1.08E-06	1.72E-05
3	2/11/2006	9:26:00	59220	436740	26.00	0.4	6.93E-07	1.79E-05
4	2/11/2006	13:01:00	12900	449640	26.00	0.0	0.00E+00	1.79E-05
5	3/11/2006	8:50:00	47940	520980	25.50	0.3	4.62E-07	1.87E-05
6	3/11/2006	20:26:00	41760	562740	24.80	0.7	1.08E-06	1.98E-05
7	4/11/2006	11:27:00	54060	616800	24.35	0.4	6.93E-07	2.05E-05
8	4/11/2006	14:48:00	12060	628860	24.25	0.1	1.54E-07	2.06E-05
9	4/11/2006	17:09:00	8460	637320	24.15	0.1	1.54E-07	2.08E-05



รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

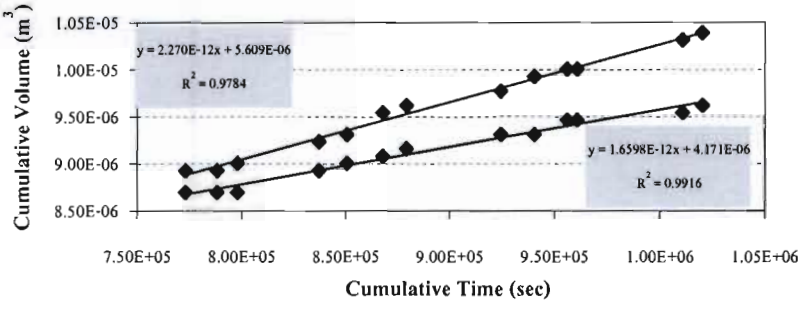
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.02	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	2.41E-12	m/sec
K_2	=	1.59E-12	m/sec
K_{avg}	=	**2.00E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R10 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1R10		Age 90 Days			Sample No. 1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	14/1/2007	15:10:00	5640	772920	34.10			
2	14/1/2007	19:24:00	15240	788160	34.10	0.00	0.00E+00	8.93E-06
3	14/1/2007	22:06:00	9720	797880	34.05	0.05	7.70E-08	9.01E-06
4	15/1/2007	8:58:00	39120	837000	33.90	0.15	2.31E-07	9.24E-06
5	15/1/2007	12:43:00	13500	850500	33.85	0.05	7.70E-08	9.31E-06
6	15/1/2007	17:31:00	17280	867780	33.70	0.15	2.31E-07	9.54E-06
7	15/1/2007	20:41:00	11400	879180	33.65	0.05	7.70E-08	9.62E-06
8	16/1/2007	9:14:00	45180	924360	33.55	0.10	1.54E-07	9.78E-06
9	16/1/2007	13:40:00	15960	940320	33.45	0.10	1.54E-07	9.93E-06
10	16/1/2007	18:00:00	15600	955920	33.40	0.05	7.70E-08	1.00E-05
11	16/1/2007	19:18:00	4680	960600	33.40	0.00	0.00E+00	1.00E-05
12	17/1/2007	9:12:00	50040	1010640	33.20	0.20	3.08E-07	1.03E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	14/1/2007	15:10:00	5640	772920	34.40			
2	14/1/2007	19:24:00	15240	788160	34.40	0.00	0.00E+00	8.70E-06
3	14/1/2007	22:06:00	9720	797880	34.40	0.00	0.00E+00	8.70E-06
4	15/1/2007	8:58:00	39120	837000	34.25	0.15	2.31E-07	8.93E-06
5	15/1/2007	12:43:00	13500	850500	34.20	0.05	7.70E-08	9.01E-06
6	15/1/2007	17:31:00	17280	867780	34.15	0.05	7.70E-08	9.08E-06
7	15/1/2007	20:41:00	11400	879180	34.10	0.05	7.70E-08	9.16E-06
8	16/1/2007	9:14:00	45180	924360	34.00	0.10	1.54E-07	9.31E-06
9	16/1/2007	13:40:00	15960	940320	34.00	0.00	0.00E+00	9.31E-06
10	16/1/2007	18:00:00	15600	955920	33.90	0.10	1.54E-07	9.47E-06
11	16/1/2007	19:18:00	4680	960600	33.90	0.00	0.00E+00	9.47E-06
12	17/1/2007	9:12:00	50040	1010640	33.85	0.05	7.70E-08	9.54E-06



รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุบ่ม 90 วัน

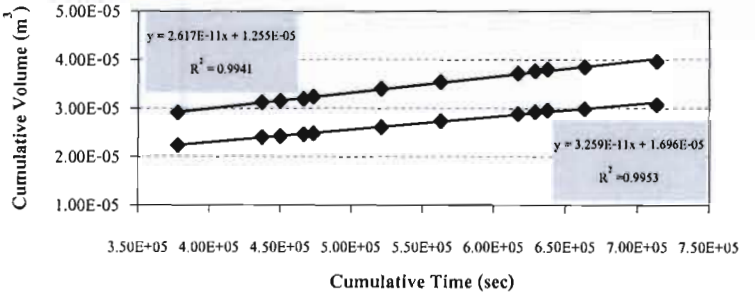
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	1.64E-13	m/sec
K_2	=	2.01E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.80E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R20 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1R20		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/11/2006	16:59:00	24060	377520	22.80			
2	2/11/2006	9:26:00	59220	436740	21.75	1.05	1.62E-06	2.40E-05
3	2/11/2006	13:01:00	12900	449640	21.60	0.15	2.31E-07	2.42E-05
4	2/11/2006	17:37:00	16560	466200	21.35	0.25	3.85E-07	2.46E-05
5	2/11/2006	19:31:00	6840	473040	21.20	0.15	2.31E-07	2.49E-05
6	3/11/2006	8:50:00	47940	520980	20.40	0.80	1.23E-06	2.61E-05
7	3/11/2006	20:26:00	41760	562740	19.55	0.85	1.31E-06	2.74E-05
8	4/11/2006	11:27:00	54060	616800	18.60	0.95	1.46E-06	2.89E-05
9	4/11/2006	14:48:00	12060	628860	18.35	0.25	3.85E-07	2.92E-05
10	4/11/2006	17:09:00	8460	637320	18.15	0.20	3.08E-07	2.96E-05
11	5/11/2006	0:18:00	25740	663060	17.95	0.20	3.08E-07	2.99E-05
12	5/11/2006	14:15:00	50220	713280	17.40	0.55	8.47E-07	3.07E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/11/2006	16:59:00	24060	377520	17.75			
2	2/11/2006	9:26:00	59220	436740	16.35	1.40	2.16E-06	3.12E-05
3	2/11/2006	13:01:00	12900	449640	16.15	0.20	3.08E-07	3.16E-05
4	2/11/2006	17:37:00	16560	466200	15.90	0.25	3.85E-07	3.19E-05
5	2/11/2006	19:31:00	6840	473040	15.60	0.30	4.62E-07	3.24E-05
6	3/11/2006	8:50:00	47940	520980	14.55	1.05	1.62E-06	3.40E-05
7	3/11/2006	20:26:00	41760	562740	13.65	0.90	1.39E-06	3.54E-05
8	4/11/2006	11:27:00	54060	616800	12.45	1.20	1.85E-06	3.73E-05
9	4/11/2006	14:48:00	12060	628860	12.15	0.30	4.62E-07	3.77E-05
10	4/11/2006	17:09:00	8460	637320	11.95	0.20	3.08E-07	3.80E-05
11	5/11/2006	0:18:00	25740	663060	11.65	0.30	4.62E-07	3.85E-05
12	5/11/2006	14:15:00	50220	713280	10.90	0.75	1.15E-06	3.96E-05



รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

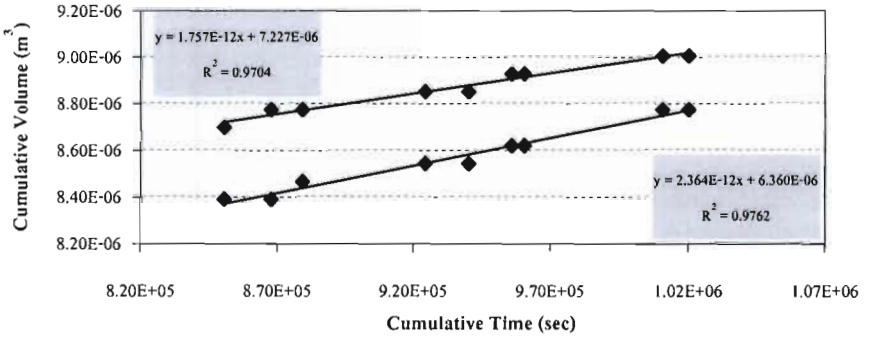
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	2.79E-12	m/sec
K_2	=	3.50E-12	m/sec
K_{avg}	=	**3.15E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R20 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1R20		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	15/1/2007	12:43:00	52620	850500	33.65			
2	15/1/2007	17:31:00	17280	867780	33.65	0.00	0.00E+00	8.39E-06
3	15/1/2007	20:41:00	11400	879180	33.60	0.05	7.70E-08	8.47E-06
4	16/1/2007	9:14:00	45180	924360	33.55	0.05	7.70E-08	8.54E-06
5	16/1/2007	13:40:00	15960	940320	33.55	0.00	0.00E+00	8.54E-06
6	16/1/2007	18:00:00	15600	955920	33.50	0.05	7.70E-08	8.62E-06
7	16/1/2007	19:18:00	4680	960600	33.50	0.00	0.00E+00	8.62E-06
8	17/1/2007	9:12:00	50040	1010640	33.40	0.10	1.54E-07	8.77E-06
9	17/1/2007	11:50:00	9480	1020120	33.40	0.00	0.00E+00	8.77E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	15/1/2007	12:43:00	52620	850500	33.35			
2	15/1/2007	17:31:00	17280	867780	33.30	0.05	7.70E-08	8.77E-06
3	15/1/2007	20:41:00	11400	879180	33.30	0.00	0.00E+00	8.77E-06
4	16/1/2007	9:14:00	45180	924360	33.25	0.05	7.70E-08	8.85E-06
5	16/1/2007	13:40:00	15960	940320	33.25	0.00	0.00E+00	8.85E-06
6	16/1/2007	18:00:00	15600	955920	33.20	0.05	7.70E-08	8.93E-06
7	16/1/2007	19:18:00	4680	960600	33.20	0.00	0.00E+00	8.93E-06
8	17/1/2007	9:12:00	50040	1010640	33.15	0.05	7.70E-08	9.01E-06
9	17/1/2007	11:50:00	9480	1020120	33.15	0.00	0.00E+00	9.01E-06



รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

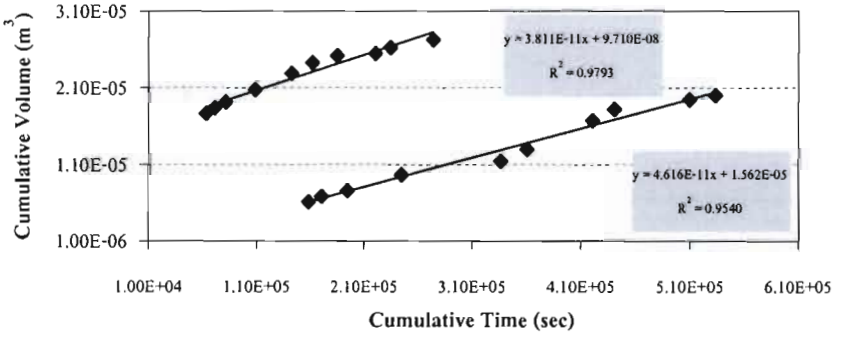
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	2.39E-13	m/sec
K_2	=	1.82E-13	m/sec
K_{avg}	=	2.10E-13	m/sec

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R30 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1R30		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	26/10/2006	8:49:00	45960	158100	33.90			
2	26/10/2006	12:15:00	12360	170460	33.45	0.45	6.93E-07	6.85E-06
3	26/10/2006	18:50:00	23700	194160	32.95	0.50	7.70E-07	7.62E-06
4	27/10/2006	8:51:00	50460	244620	31.60	1.35	2.08E-06	9.70E-06
5	28/10/2006	10:20:00	91740	336360	30.45	1.15	1.77E-06	1.15E-05
6	28/10/2006	17:02:00	24120	360480	29.45	1.00	1.54E-06	1.30E-05
7	29/10/2006	9:43:00	60060	420540	27.00	2.45	3.77E-06	1.68E-05
8	29/10/2006	15:14:00	19860	440400	26.05	0.95	1.46E-06	1.82E-05
9	30/10/2006	10:21:00	68820	509220	25.25	0.80	1.23E-06	1.95E-05
10	30/10/2006	17:00:00	23940	533160	24.90	0.35	5.39E-07	2.00E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	26/10/2006	8:49:00	48480	63000	25.70			
2	26/10/2006	12:15:00	8100	71100	25.25	0.45	6.93E-07	1.84E-05
3	26/10/2006	18:50:00	10260	81360	24.75	0.50	7.70E-07	1.92E-05
4	27/10/2006	8:51:00	26880	108240	23.70	1.05	1.62E-06	2.08E-05
5	28/10/2006	10:20:00	34020	142260	22.35	1.35	2.08E-06	2.29E-05
6	28/10/2006	17:02:00	19500	161760	21.45	0.90	1.39E-06	2.42E-05
7	29/10/2006	9:43:00	22860	184620	20.85	0.60	9.24E-07	2.52E-05
8	29/10/2006	15:14:00	35640	220260	20.65	0.20	3.08E-07	2.55E-05
9	30/10/2006	10:21:00	13920	234180	20.15	0.50	7.70E-07	2.62E-05
10	30/10/2006	17:00:00	39720	273900	19.50	0.65	1.00E-06	2.72E-05



รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

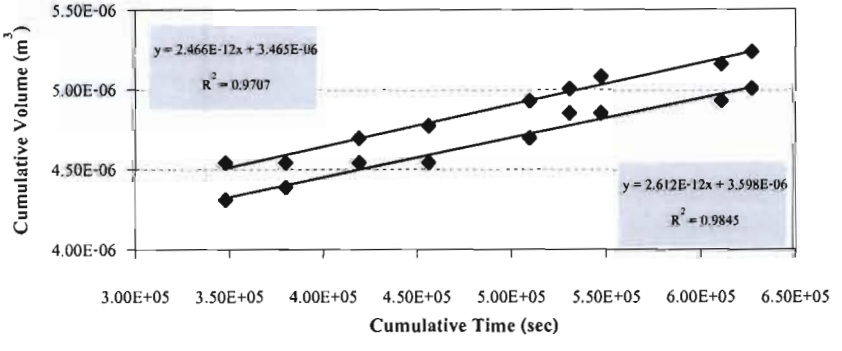
D_1	=	10.05	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.13	cm.

K_1	=	4.04E-12	m/sec
K_2	=	4.67E-12	m/sec
K_{avg}	=	**4.36E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R30 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1R30		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/1/2007	13:43:00	57300	347700	35.35			
2	1/1/2007	22:38:00	32100	379800	35.30	0.05	7.70E-08	4.39E-06
3	2/1/2007	9:31:00	39180	418980	35.20	0.10	1.54E-07	4.54E-06
4	2/1/2007	19:49:00	37080	456060	35.20	0.00	0.00E+00	4.54E-06
5	3/1/2007	10:41:00	53520	509580	35.10	0.10	1.54E-07	4.70E-06
6	3/1/2007	16:33:00	21120	530700	35.00	0.10	1.54E-07	4.85E-06
7	3/1/2007	21:11:00	16680	547380	35.00	0.00	0.00E+00	4.85E-06
8	4/1/2007	14:46:00	63300	610680	34.95	0.05	7.70E-08	4.93E-06
9	4/1/2007	19:12:00	15960	626640	34.90	0.05	7.70E-08	5.00E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/1/2007	13:43:00	57300	347700	35.00			
2	1/1/2007	22:38:00	32100	379800	35.00	0.00	0.00E+00	4.54E-06
3	2/1/2007	9:31:00	39180	418980	34.90	0.10	1.54E-07	4.70E-06
4	2/1/2007	19:49:00	37080	456060	34.85	0.05	7.70E-08	4.77E-06
5	3/1/2007	10:41:00	53520	509580	34.75	0.10	1.54E-07	4.93E-06
6	3/1/2007	16:33:00	21120	530700	34.70	0.05	7.70E-08	5.00E-06
7	3/1/2007	21:11:00	16680	547380	34.65	0.05	7.70E-08	5.08E-06
8	4/1/2007	14:46:00	63300	610680	34.60	0.05	7.70E-08	5.16E-06
9	4/1/2007	19:12:00	15960	626640	34.55	0.05	7.70E-08	5.23E-06



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

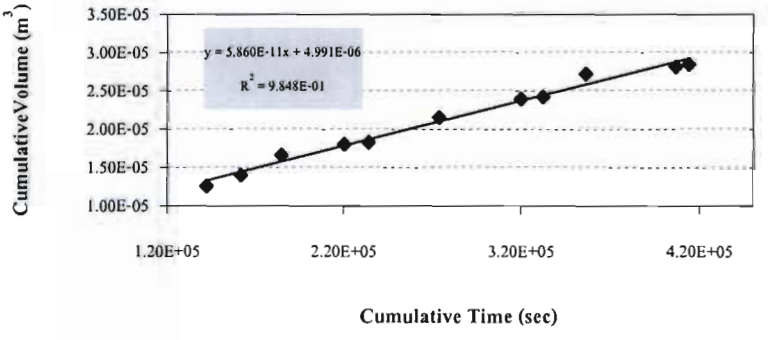
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.03	cm.
L_1	=	4.13	cm.
L_2	=	4.05	cm.

K_1	=	2.60E-13	m/sec
K_2	=	2.79E-13	m/sec
K_{avg}	=	2.69E-13	m/sec

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R40 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1R40		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/10/2006	20:56:00	18240	111960	34.90			
2	24/10/2006	15:12:00	65760	177720	34.70	0.20	3.08E-07	1.39E-06
3	24/10/2006	19:28:00	15360	193080	34.65	0.05	7.70E-08	1.46E-06
4	25/10/2006	10:20:00	53520	246600	34.50	0.15	2.31E-07	1.69E-06
5	25/10/2006	17:02:00	24120	270720	34.15	0.35	5.39E-07	2.23E-06
6	25/10/2006	9:44:00	60120	330840	34.05	0.10	1.54E-07	2.39E-06
7	26/10/2006	15:14:00	19800	350640	34.00	0.05	7.70E-08	2.46E-06
8	26/10/2006	10:21:00	68820	419460	33.95	0.05	7.70E-08	2.54E-06
9	26/10/2006	17:00:00	23940	443400	33.45	0.50	7.70E-07	3.31E-06
10	27/10/2006	9:26:00	59160	502560	33.30	0.15	2.31E-07	3.54E-06
11	27/10/2006	8:50:00	84240	586800	33.30	0.00	0.00E+00	3.54E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/10/2006	7:29:00	34020	142200	30.60			
2	24/10/2006	12:54:00	19500	161700	29.70	0.90	1.39E-06	1.40E-05
3	24/10/2006	19:15:00	22860	184560	28.00	1.70	2.62E-06	1.66E-05
4	25/10/2006	5:10:00	35700	220260	27.05	0.95	1.46E-06	1.81E-05
5	25/10/2006	9:01:00	13860	234120	26.90	0.15	2.31E-07	1.83E-05
6	25/10/2006	20:03:00	39720	273840	24.80	2.10	3.23E-06	2.16E-05
7	26/10/2006	8:49:00	45960	319800	23.25	1.55	2.39E-06	2.39E-05
8	26/10/2006	12:15:00	12360	332160	23.05	0.20	3.08E-07	2.42E-05
9	26/10/2006	18:50:00	23700	355860	21.10	1.95	3.00E-06	2.72E-05
10	27/10/2006	8:51:00	50460	406320	20.50	0.60	9.24E-07	2.82E-05
11	27/10/2006	10:53:00	7320	413640	20.30	0.20	3.08E-07	2.85E-05



รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.03	cm.
L_1	=	4.16	cm.
L_2	=	4.28	cm.

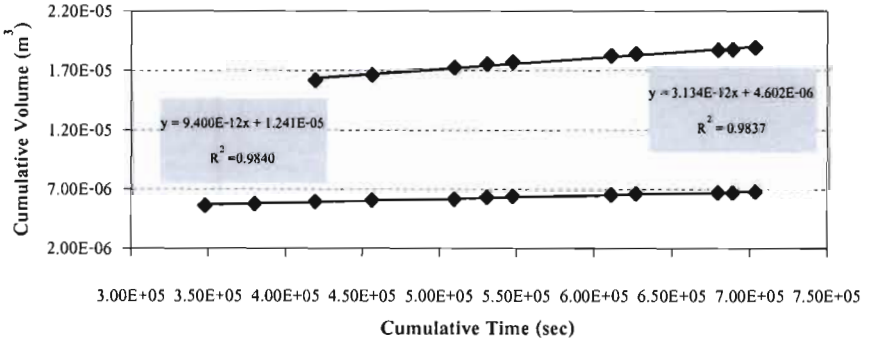
K_1	=	6.22E-13	m/sec
K_2	=	5.80E-12	m/sec
K_{avg}	=	5.80E-12	m/sec

หมายเหตุ : ค่า K_1 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก Epoxy แตกไม่สามารถวัดอัตราการซึมของน้ำไ

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1R40 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1R40		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	2/1/2007	9:31:00	39180	418980	27.40			
2	2/1/2007	19:49:00	37080	456060	27.10	0.30	4.62E-07	1.66E-05
3	3/1/2007	10:41:00	53520	509580	26.70	0.40	6.16E-07	1.72E-05
4	3/1/2007	16:33:00	21120	530700	26.50	0.20	3.08E-07	1.75E-05
5	3/1/2007	21:11:00	16680	547380	26.40	0.10	1.54E-07	1.77E-05
6	4/1/2007	14:46:00	63300	610680	26.05	0.35	5.39E-07	1.82E-05
7	4/1/2007	19:12:00	15960	626640	25.95	0.10	1.54E-07	1.84E-05
8	5/1/2007	9:47:00	52500	679140	25.75	0.20	3.08E-07	1.87E-05
9	5/1/2007	12:26:00	9540	688680	25.70	0.05	7.70E-08	1.88E-05
10	5/1/2007	16:28:00	14520	703200	25.60	0.10	1.54E-07	1.89E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	2/1/2007	9:31:00	39180	418980	34.00			
2	2/1/2007	19:49:00	37080	456060	33.90	0.10	1.54E-07	6.08E-06
3	3/1/2007	10:41:00	53520	509580	33.85	0.05	7.70E-08	6.16E-06
4	3/1/2007	16:33:00	21120	530700	33.75	0.10	1.54E-07	6.31E-06
5	3/1/2007	21:11:00	16680	547380	33.70	0.05	7.70E-08	6.39E-06
6	4/1/2007	14:46:00	63300	610680	33.60	0.10	1.54E-07	6.54E-06
7	4/1/2007	19:12:00	15960	626640	33.55	0.05	7.70E-08	6.62E-06
8	5/1/2007	9:47:00	52500	679140	33.50	0.05	7.70E-08	6.70E-06
9	5/1/2007	12:26:00	9540	688680	33.50	0.00	0.00E+00	6.70E-06
10	5/1/2007	16:28:00	14520	703200	33.45	0.05	7.70E-08	6.77E-06



รูปที่ ข.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1R40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

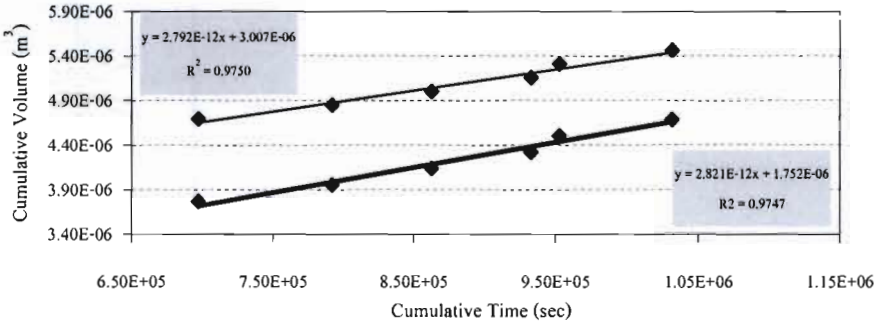
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.03	cm.
L_1	=	4.01	cm.
L_2	=	4.03	cm.

K_1	=	6.22E-13	m/sec
K_2	=	2.50E-13	m/sec
K_{avg}	=	**4.40E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R10 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2R10		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	17/11/2006	14:28:00	39180	418980	34.30			
2	18/11/2006	16:47:00	37080	456060	34.20	0.30	4.62E-07	1.66E-05
3	19/11/2006	12:25:00	53520	509580	34.10	0.40	6.16E-07	1.72E-05
4	20/11/2006	7:57:00	21120	530700	34.00	0.20	3.08E-07	1.75E-05
5	20/11/2006	13:24:00	16680	547380	33.90	0.10	1.54E-07	1.77E-05
6	21/11/2006	11:19:00	63300	610680	33.80	0.35	5.39E-07	1.82E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	17/11/2006	14:28:00	39180	418980	37.30			
2	18/11/2006	16:47:00	37080	456060	37.20	0.10	1.54E-07	6.08E-06
3	19/11/2006	12:25:00	53520	509580	37.10	0.05	7.70E-08	6.16E-06
4	20/11/2006	7:57:00	21120	530700	37.00	0.10	1.54E-07	6.31E-06
5	20/11/2006	13:24:00	16680	547380	36.90	0.05	7.70E-08	6.39E-06
6	21/11/2006	11:19:00	63300	610680	36.80	0.10	1.54E-07	6.54E-06



รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

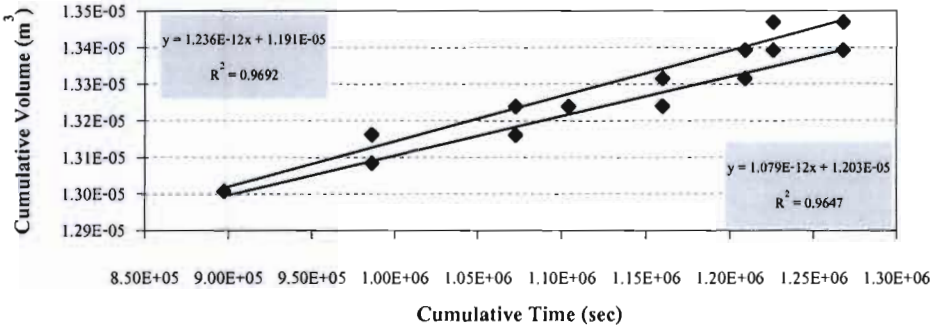
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.33	cm.

K_1	=	2.81E-13	m/sec
K_2	=	2.79E-13	m/sec
K_{avg}	=	**2.80E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R10 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2R10		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	8/2/2007	9:17:00	43680	897180	29.65			
2	9/2/2007	9:58:00	88860	986040	29.60	0.05	7.697E-08	1.31E-05
3	10/2/2007	9:56:00	86280	1072320	29.55	0.05	7.70E-08	1.32E-05
4	10/2/2007	18:46:00	31800	1104120	29.50	0.05	7.697E-08	1.32E-05
5	11/2/2007	10:12:00	55560	1159680	29.50	0.00	0.00E+00	1.32E-05
6	11/2/2007	23:50:00	49080	1208760	29.45	0.05	7.70E-08	1.33E-05
7	12/2/2007	4:30:00	16800	1225560	29.40	0.05	7.697E-08	1.34E-05
8	12/2/2007	16:09:00	41940	1267500	29.40	0.00	0.00E+00	1.34E-05
9	4/1/2007	14:46:00	63300	1005600	31.30	0.10	1.539E-07	1.20E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	8/2/2007	9:17:00	43680	897180	29.65			
2	9/2/2007	9:58:00	88860	986040	29.55	0.1	1.54E-07	1.32E-05
3	10/2/2007	9:56:00	86280	1072320	29.50	0.1	7.70E-08	1.32E-05
4	10/2/2007	18:46:00	31800	1104120	29.50	0.0	0.00E+00	1.32E-05
5	11/2/2007	10:12:00	55560	1159680	29.45	0.1	7.70E-08	1.33E-05
6	11/2/2007	23:50:00	49080	1208760	29.40	0.1	7.70E-08	1.34E-05
7	12/2/2007	4:30:00	16800	1225560	29.35	0.0	7.70E-08	1.35E-05
8	12/2/2007	16:09:00	41940	1267500	29.35	0.0	0.00E+00	1.35E-05
9	4/1/2007	14:46:00	63300	1005600	30.30	0.2	3.08E-07	1.32E-05



รูปที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

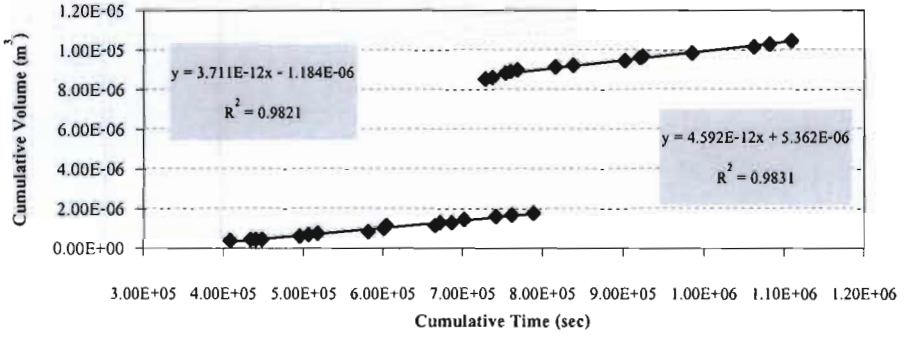
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.02	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	1.09E-13	m/sec
K_2	=	1.28E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.20E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R20 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2R20		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	16/11/2006	22:24:00	8400	448200	39.75	0.00	0.00E+00	4.62E-07
2	17/11/2006	11:30:00	47160	495360	39.65	0.10	1.54E-07	6.16E-07
3	17/11/2006	14:28:00	10680	506040	39.60	0.05	7.70E-08	6.93E-07
4	17/11/2006	17:41:00	11580	517620	39.55	0.05	7.70E-08	7.70E-07
5	18/11/2006	11:28:00	64020	581640	39.50	0.05	7.70E-08	8.47E-07
6	18/11/2006	16:47:00	19140	600780	39.40	0.10	1.54E-07	1.00E-06
7	18/11/2006	17:42:00	3300	604080	39.30	0.10	1.54E-07	1.15E-06
8	19/11/2006	10:38:00	60960	665040	39.30	0.00	0.00E+00	1.15E-06
9	19/11/2006	12:25:00	6420	671460	39.20	0.10	1.54E-07	1.31E-06
10	19/11/2006	16:29:00	14640	686100	39.20	0.00	0.00E+00	1.31E-06
11	19/11/2006	20:51:00	15720	701820	39.10	0.10	1.54E-07	1.46E-06
12	20/11/2006	7:57:00	39960	741780	39.00	0.10	1.54E-07	1.62E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	16/11/2006	22:24:00	16620	753600	28.25	0.15	2.31E-07	8.85E-06
2	17/11/2006	11:30:00	5940	759540	28.20	0.05	7.70E-08	8.93E-06
3	17/11/2006	14:28:00	8400	767940	28.15	0.05	7.70E-08	9.01E-06
4	17/11/2006	17:41:00	47160	815100	28.05	0.10	1.54E-07	9.16E-06
5	18/11/2006	11:28:00	22260	837360	28.00	0.05	7.70E-08	9.24E-06
6	18/11/2006	16:47:00	64020	901380	27.85	0.15	2.31E-07	9.47E-06
7	18/11/2006	17:42:00	19140	920520	27.75	0.10	1.54E-07	9.62E-06
8	19/11/2006	10:38:00	3300	923820	27.70	0.05	7.70E-08	9.70E-06
9	19/11/2006	12:25:00	60960	984780	27.60	0.10	1.54E-07	9.85E-06
10	19/11/2006	16:29:00	76740	1061520	27.40	0.20	3.08E-07	1.02E-05
11	19/11/2006	20:51:00	19620	1081140	27.30	0.10	1.54E-07	1.03E-05
12	20/11/2006	7:57:00	27180	1108320	27.20	0.10	1.54E-07	1.05E-05



รูปที่ ข.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

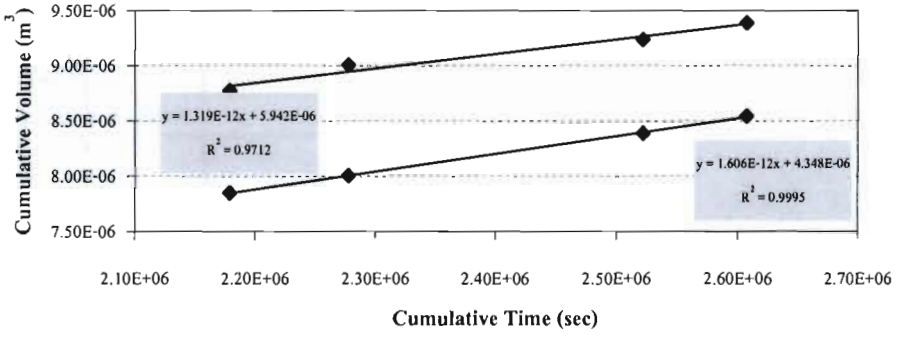
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.01	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	4.83E-13	m/sec
K_2	=	3.89E-13	m/sec
K_{avg}	=	**4.40E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R20 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2R20		Age 90 Days			Sample No. 1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/2/2007	15:01:00	17160	2094900	30.00			
2	19/2/2007	14:15:00	83640	2178540	29.75	0.25	3.85E-07	7.85E-06
3	20/2/2007	17:47:00	99120	2277660	29.65	0.10	1.54E-07	8.00E-06
4	23/2/2007	13:33:00	243960	2521620	29.40	0.25	3.85E-07	8.39E-06
5	24/2/2007	13:17:00	85440	2607060	29.30	0.10	1.54E-07	8.54E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/2/2007	15:01:00	17160	2094900	28.85			
2	19/2/2007	14:15:00	83640	2178540	28.65	0.2	3.08E-07	8.77E-06
3	20/2/2007	17:47:00	99120	2277660	28.50	0.1	2.31E-07	9.01E-06
4	23/2/2007	13:33:00	243960	2521620	28.35	0.1	2.31E-07	9.24E-06
5	24/2/2007	13:17:00	85440	2607060	28.25	0.1	1.54E-07	9.39E-06



รูปที่ ข.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

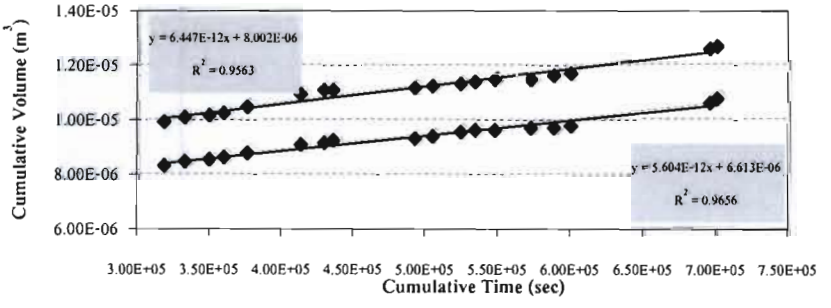
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.01	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.03	cm.

K_1	=	1.69E-13	m/sec
K_2	=	1.41E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.50E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R30 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2R30		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/11/2006	20:34:00	10140	360120	28.65			
2	8/11/2006	15:57:00	16320	429900	28.10	0.10	1.54E-07	1.11E-05
3	8/11/2006	17:42:00	6300	436200	28.10	0.00	0.00E+00	1.11E-05
4	9/11/2006	12:54:00	12300	505320	28.00	0.05	7.70E-08	1.12E-05
5	9/11/2006	18:15:00	19260	524580	27.95	0.05	7.70E-08	1.13E-05
6	9/11/2006	21:05:00	10200	534780	27.90	0.05	7.70E-08	1.14E-05
7	10/11/2006	0:51:00	13560	548340	27.85	0.05	7.70E-08	1.15E-05
8	10/11/2006	7:42:00	24660	573000	27.85	0.00	0.00E+00	1.15E-05
9	10/11/2006	12:07:00	15900	588900	27.75	0.10	1.54E-07	1.16E-05
10	10/11/2006	15:19:00	11520	600420	27.70	0.05	7.70E-08	1.17E-05
11	11/11/2006	17:54:00	95700	696120	27.10	0.60	9.24E-07	1.26E-05
12	11/11/2006	19:14:00	4800	700920	27.05	0.05	7.70E-08	1.27E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/11/2006	20:34:00	10140	360120	31.10			
2	8/11/2006	15:57:00	16320	429900	30.75	0.05	7.70E-08	9.16E-06
3	8/11/2006	17:42:00	6300	436200	30.70	0.05	7.70E-08	9.24E-06
4	9/11/2006	12:54:00	12300	505320	30.60	0.05	7.70E-08	9.39E-06
5	9/11/2006	18:15:00	19260	524580	30.50	0.10	1.54E-07	9.54E-06
6	9/11/2006	21:05:00	10200	534780	30.45	0.05	7.70E-08	9.62E-06
7	10/11/2006	0:51:00	13560	548340	30.45	0.00	0.00E+00	9.62E-06
8	10/11/2006	7:42:00	24660	573000	30.40	0.05	7.70E-08	9.70E-06
9	10/11/2006	12:07:00	15900	588900	30.40	0.00	0.00E+00	9.70E-06
10	10/11/2006	15:19:00	11520	600420	30.35	0.05	7.70E-08	9.78E-06
11	11/11/2006	17:54:00	95700	696120	29.80	0.55	8.47E-07	1.06E-05
12	11/11/2006	19:14:00	4800	700920	29.70	0.10	1.54E-07	1.08E-05



รูปที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

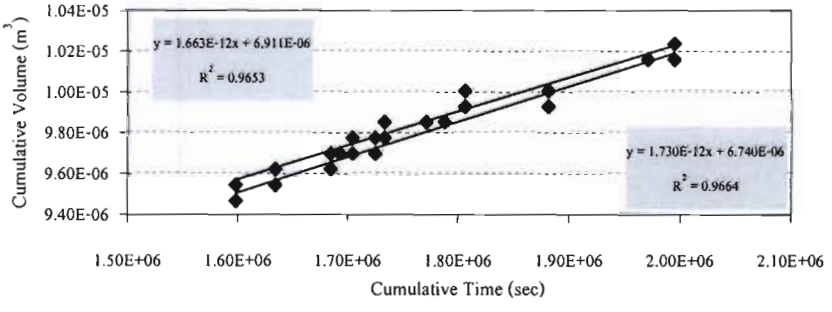
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.26	cm.
L_2	=	4.13	cm.

K_1	=	5.80E-13	m/sec
K_2	=	6.60E-13	m/sec
K_{avg}	=	6.20E-13	m/sec

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R30 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2R30		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/1/2007	9:10:00	35220	1598160	31.00			
2	24/1/2007	19:06:00	35760	1633920	30.95	0.1	7.70E-08	9.62E-06
3	25/1/2007	9:06:00	50400	1684320	30.90	0.1	7.70E-08	9.70E-06
4	25/1/2007	11:28:00	8520	1692840	30.90	0.0	0.00E+00	9.70E-06
5	25/1/2007	14:40:00	11520	1704360	30.85	0.0	7.70E-08	9.78E-06
6	25/1/2007	20:25:00	20700	1725060	30.85	0.0	0.00E+00	9.78E-06
7	25/1/2007	22:44:00	8340	1733400	30.80	0.1	7.70E-08	9.85E-06
8	26/1/2007	9:16:00	37920	1771320	30.80	0.0	0.00E+00	9.85E-06
9	26/1/2007	13:54:00	16680	1788000	30.80	0.0	0.00E+00	9.85E-06
10	26/1/2007	19:02:00	18480	1806480	30.70	0.1	1.54E-07	1.00E-05
11	27/1/2007	15:52:00	75000	1881480	30.70	0.0	0.00E+00	1.00E-05
12	28/1/2007	16:37:00	89100	1970580	30.60	0.1	1.54E-07	1.02E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	24/1/2007	20:34:00	10140	360120	31.10			
2	24/1/2007	15:57:00	16320	429900	30.75	0.05	7.70E-08	9.16E-06
3	25/1/2007	17:42:00	6300	436200	30.70	0.05	7.70E-08	9.24E-06
4	25/1/2007	12:54:00	12300	505320	30.60	0.05	7.70E-08	9.39E-06
5	25/1/2007	18:15:00	19260	524580	30.50	0.10	1.54E-07	9.54E-06
6	25/1/2007	21:05:00	10200	534780	30.45	0.05	7.70E-08	9.62E-06
7	25/1/2007	0:51:00	13560	548340	30.45	0.00	0.00E+00	9.62E-06
8	26/1/2007	7:42:00	24660	573000	30.40	0.05	7.70E-08	9.70E-06
9	26/1/2007	12:07:00	15900	588900	30.40	0.00	0.00E+00	9.70E-06
10	26/1/2007	15:19:00	11520	600420	30.35	0.05	7.70E-08	9.78E-06
11	27/1/2007	17:54:00	95700	696120	29.80	0.55	8.47E-07	1.06E-05
12	28/1/2007	19:14:00	4800	700920	29.70	0.10	1.54E-07	1.08E-05



รูปที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

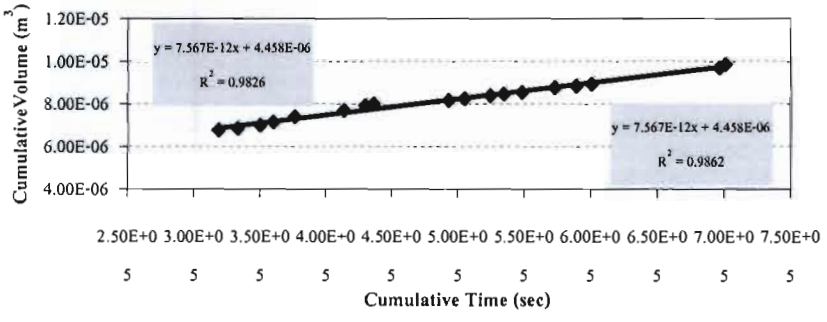
D_1	=	10.01	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.10	cm.

K_1	=	1.74E-13	m/sec
K_2	=	1.83E-13	m/sec
K_{avg}	=	1.79E-13	m/sec

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R40 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2R40		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/11/2006	17:45:00	16860	349980	32.15			
2	7/11/2006	20:34:00	10140	360120	32.10	0.05	7.70E-08	6.85E-06
3	8/11/2006	11:25:00	37200	413580	31.85	0.15	2.31E-07	7.24E-06
4	8/11/2006	15:57:00	16320	429900	31.75	0.10	1.54E-07	7.39E-06
5	8/11/2006	17:42:00	6300	436200	31.55	0.20	3.08E-07	7.70E-06
6	9/11/2006	12:54:00	12300	505320	31.30	0.10	1.54E-07	8.08E-06
7	9/11/2006	18:15:00	19260	524580	31.20	0.10	1.54E-07	8.24E-06
8	9/11/2006	21:05:00	10200	534780	31.10	0.10	1.54E-07	8.39E-06
9	10/11/2006	7:42:00	38220	573000	31.10	0.00	0.00E+00	8.39E-06
10	10/11/2006	15:19:00	27420	600420	31.05	0.05	7.70E-08	8.47E-06
11	11/11/2006	17:54:00	95700	696120	30.50	0.55	8.47E-07	9.31E-06
12	11/11/2006	19:14:00	4800	700920	30.40	0.10	1.54E-07	9.47E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/11/2006	17:45:00	16860	349980	31.95			
2	7/11/2006	20:34:00	10140	360120	31.85	0.10	1.54E-07	7.16E-06
3	8/11/2006	11:25:00	37200	413580	31.50	0.20	3.08E-07	7.70E-06
4	8/11/2006	15:57:00	16320	429900	31.35	0.15	2.31E-07	7.93E-06
5	8/11/2006	17:42:00	6300	436200	31.30	0.05	7.70E-08	8.00E-06
6	9/11/2006	12:54:00	12300	505320	31.15	0.05	7.70E-08	8.24E-06
7	9/11/2006	18:15:00	19260	524580	31.05	0.10	1.54E-07	8.39E-06
8	9/11/2006	21:05:00	10200	534780	31.00	0.05	7.70E-08	8.47E-06
9	10/11/2006	7:42:00	24660	573000	30.80	0.15	2.31E-07	8.77E-06
10	10/11/2006	15:19:00	11520	600420	30.70	0.05	7.70E-08	8.93E-06
11	11/11/2006	17:54:00	95700	696120	30.20	0.50	7.70E-07	9.70E-06
12	11/11/2006	19:14:00	4800	700920	30.10	0.10	1.54E-07	9.85E-06



รูปที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

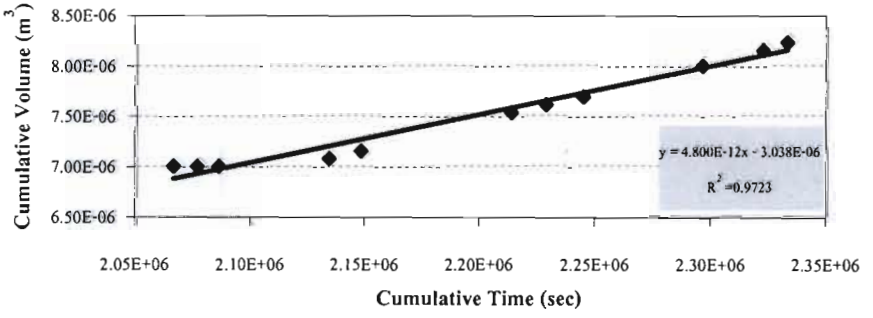
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.07	cm.

K_1	=	**7.59E-13**	m/sec
K_2	=	**8.01E-13**	m/sec
K_{avg}	=	**7.80E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2R40 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2R40		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	29/1/2007	19:19:00	20940	2066700	34.10			
2	29/1/2007	22:12:00	10380	2077080	34.10	0.00	0.00E+00	7.00E-06
3	30/1/2007	0:48:00	9360	2086440	34.10	0.00	0.00E+00	7.00E-06
4	30/1/2007	14:09:00	48060	2134500	34.05	0.05	7.70E-08	7.08E-06
5	30/1/2007	18:01:00	13920	2148420	34.00	0.05	7.70E-08	7.16E-06
6	31/1/2007	12:14:00	65580	2214000	33.75	0.25	3.85E-07	7.54E-06
7	31/1/2007	16:25:00	15060	2229060	33.70	0.05	7.70E-08	7.62E-06
8	31/1/2007	20:53:00	16080	2245140	33.65	0.05	7.70E-08	7.70E-06
9	1/2/2007	11:09:00	51360	2296500	33.45	0.20	3.08E-07	8.00E-06
10	1/2/2007	18:24:00	26100	2322600	33.35	0.10	1.54E-07	8.16E-06
11	1/2/2007	21:21:00	10620	2333220	33.30	0.05	7.70E-08	8.24E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	29/1/2007	19:19:00	20940	2066700	34.10			
2	29/1/2007	22:12:00	10380	2077080	34.10	0.00	0.00E+00	7.00E-06
3	30/1/2007	0:48:00	9360	2086440	34.10	0.00	0.00E+00	7.00E-06
4	30/1/2007	14:09:00	48060	2134500	34.05	0.05	7.70E-08	7.08E-06
5	30/1/2007	18:01:00	13920	2148420	34.00	0.05	7.70E-08	7.16E-06
6	31/1/2007	12:14:00	65580	2214000	33.75	0.25	3.85E-07	7.54E-06
7	31/1/2007	16:25:00	15060	2229060	33.70	0.05	7.70E-08	7.62E-06
8	31/1/2007	20:53:00	16080	2245140	33.65	0.05	7.70E-08	7.70E-06
9	1/2/2007	11:09:00	51360	2296500	33.45	0.20	3.08E-07	8.00E-06
10	1/2/2007	18:24:00	26100	2322600	33.35	0.10	1.54E-07	8.16E-06
11	1/2/2007	21:21:00	10620	2333220	33.30	0.05	7.70E-08	8.24E-06



รูปที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2R40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.05	cm.
L_1	=	4.16	cm.
L_2	=	4.10	cm.

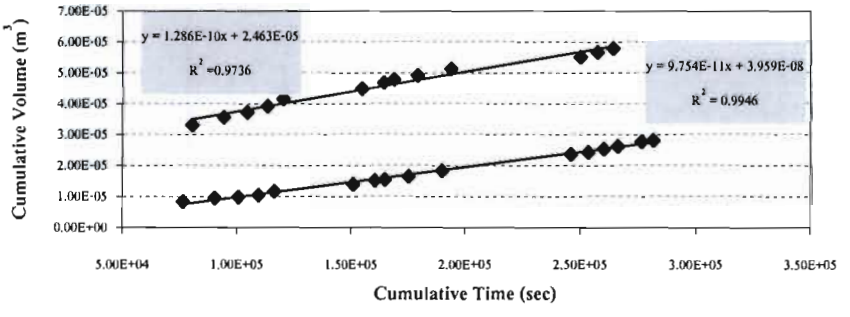
K_1	=	2.19E-12
K_2	=	2.00E-13
K_{avg}	=	2.00E-13

หมายเหตุ : ค่า K1 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก Epoxy แตกไม่สามารถวัดอัตราการซึมของน้ำได

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP10 ที่อายุ 28 วัน

Sample	OP10	Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	13/11/2006	14:47:00	13800	90180	19.60			
2	13/11/2006	17:39:00	10320	100500	18.00	3.85E-07	9.85E-06	3.73E-11
3	13/11/2006	20:07:00	8880	109380	15.85	6.16E-07	1.05E-05	6.93E-11
4	13/11/2006	22:01:00	6840	116220	14.60	1.23E-06	1.17E-05	1.80E-10
5	14/11/2006	7:38:00	34620	150840	13.90	2.31E-06	1.40E-05	6.67E-11
6	14/11/2006	10:18:00	9600	160440	13.05	1.23E-06	1.52E-05	1.28E-10
7	14/11/2006	11:30:00	4320	164760	11.70	3.08E-07	1.55E-05	7.13E-11
8	14/11/2006	14:24:00	10440	175200	9.20	1.08E-06	1.66E-05	1.03E-10
9	14/11/2006	18:28:00	14640	189840	8.20	1.77E-06	1.84E-05	1.21E-10
10	15/11/2006	10:03:00	56100	245940	7.40	5.23E-06	2.36E-05	9.33E-11

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	13/11/2006	14:47:00	13800	94140	21.90			
2	13/11/2006	17:39:00	10320	104460	20.90	1.0	1.54E-06	3.71E-05
3	13/11/2006	20:07:00	8880	113340	19.60	1.3	2.00E-06	3.91E-05
4	13/11/2006	22:01:00	6840	120180	18.00	1.6	2.46E-06	4.16E-05
5	14/11/2006	7:38:00	34620	154800	15.85	2.2	3.31E-06	4.49E-05
6	14/11/2006	10:18:00	9600	164400	14.60	1.3	1.92E-06	4.68E-05
7	14/11/2006	11:30:00	4320	168720	13.90	0.7	1.08E-06	4.79E-05
8	14/11/2006	14:24:00	10440	179160	13.05	0.9	1.31E-06	4.92E-05
9	14/11/2006	18:28:00	14640	193800	11.70	1.4	2.08E-06	5.13E-05
10	15/11/2006	10:03:00	56100	249900	9.20	2.5	3.85E-06	5.51E-05



รูปที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

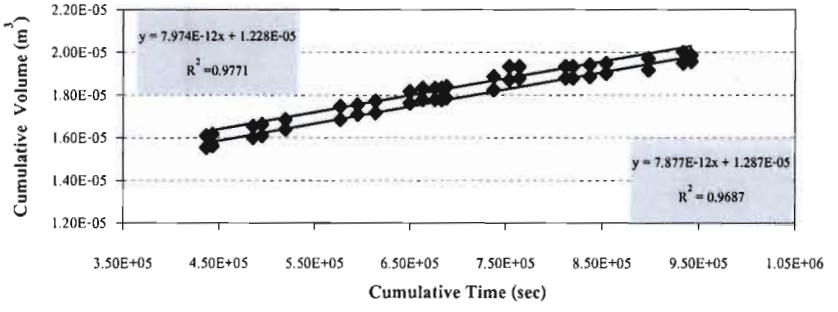
D_1	=	10.05	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.13	cm.
L_2	=	4.10	cm.

K_1	=	1.37E-11	m/sec
K_2	=	1.01E-11	m/sec
K_{avg}	=	**1.19E-11**	m/sec

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP10 ที่อายุ 90 วัน

Sample	OP10	Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	3/2/2007	14:51:00	42240	485220	26.60			
2	3/2/2007	17:26:00	9300	494520	26.55	0.05	7.70E-08	1.66E-05
3	4/2/2007	16:17:00	57720	576780	26.00	0.40	6.16E-07	1.75E-05
4	4/2/2007	21:21:00	18240	595020	25.95	0.05	7.70E-08	1.75E-05
5	5/2/2007	21:48:00	6960	683040	25.45	0.00	0.00E+00	1.83E-05
6	5/2/2007	23:09:00	4860	687900	25.40	0.05	7.70E-08	1.84E-05
7	6/2/2007	17:19:00	16140	753300	24.80	0.30	4.62E-07	1.93E-05
8	6/2/2007	20:11:00	10320	763620	24.80	0.00	0.00E+00	1.93E-05
9	7/2/2007	9:31:00	48000	811620	24.80	0.00	0.00E+00	1.93E-05
10	7/2/2007	11:38:00	7620	819240	24.80	0.00	0.00E+00	1.93E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	3/2/2007	14:51:00	42240	485220	27.25			
2	3/2/2007	17:26:00	9300	494520	27.20	0.1	7.70E-08	1.61E-05
3	4/2/2007	16:17:00	57720	576780	26.70	0.3	4.62E-07	1.69E-05
4	4/2/2007	21:21:00	18240	595020	26.55	0.1	2.31E-07	1.71E-05
5	5/2/2007	21:48:00	6960	683040	26.10	0.0	0.00E+00	1.78E-05
6	5/2/2007	23:09:00	4860	687900	26.05	0.1	7.70E-08	1.79E-05
7	6/2/2007	17:19:00	16140	753300	25.50	0.3	4.62E-07	1.87E-05
8	6/2/2007	20:11:00	10320	763620	25.45	0.1	7.70E-08	1.88E-05
9	7/2/2007	16:27:00	17340	836580	25.40	0.1	7.70E-08	1.89E-05
10	7/2/2007	21:09:00	16920	853500	25.30	0.1	1.54E-07	1.90E-05



รูปที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

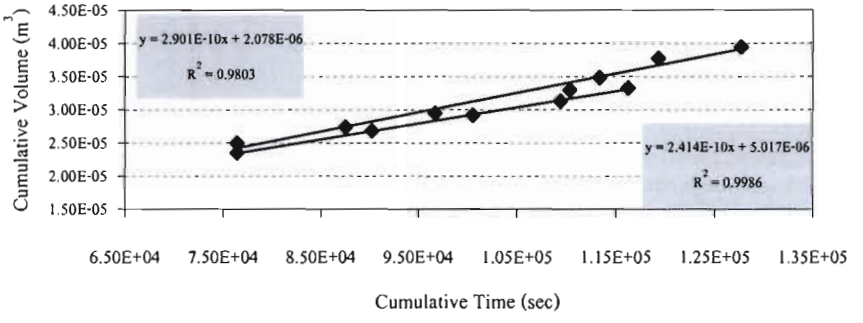
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.15	cm.
L_2	=	4.03	cm.

K_1	=	7.63E-13	m/sec
K_2	=	7.24E-13	m/sec
K_{avg}	=	7.40E-13	m/sec

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP20 ที่อายุ 28 วัน

Sample	OP20	Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	16/11/2006	8:09:00	38640	76380	20.60			
2	16/11/2006	11:14:00	11100	87480	19.00	1.60	2.46E-06	2.74E-05
3	16/11/2006	13:47:00	9180	96660	17.65	1.35	2.08E-06	2.95E-05
4	16/11/2006	17:35:00	13680	110340	15.40	2.25	3.46E-06	3.29E-05
5	16/11/2006	18:25:00	3000	113340	14.20	1.20	1.85E-06	3.48E-05
6	16/11/2006	20:04:00	5940	119280	12.30	1.90	2.92E-06	3.77E-05
7	16/11/2006	22:24:00	8400	127680	11.20	1.10	1.69E-06	3.94E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	16/11/2006	8:09:00	45540	76380	24.30			
2	16/11/2006	11:14:00	13800	90180	22.10	2.20	3.39E-06	2.69E-05
3	16/11/2006	13:47:00	10320	100500	20.60	1.50	2.31E-06	2.92E-05
4	16/11/2006	17:35:00	8880	109380	19.25	1.35	2.08E-06	3.12E-05
5	16/11/2006	18:25:00	6840	116220	17.95	1.30	2.00E-06	3.33E-05



รูปที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

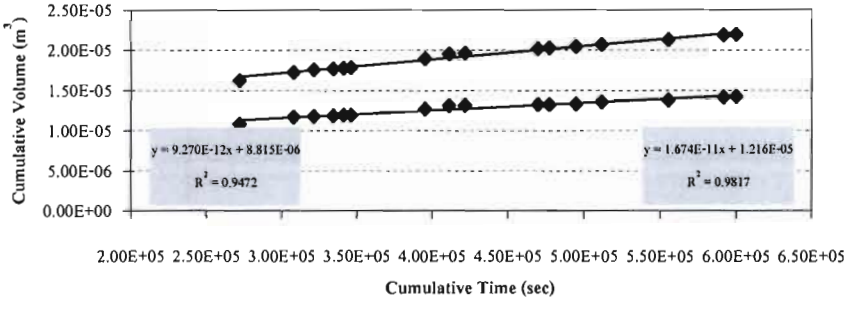
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.12	cm.

K_1	=	2.54E-11	m/sec
K_2	=	3.27E-11	m/sec
K_{avg}	=	**2.90E-11**	m/sec

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต OP20 ที่อายุ 90 วัน

Sample	OP20	Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	3/2/2007	17:26:00	9300	494520	26.55			
2	4/2/2007	16:17:00	57720	576780	26.00	0.40	6.16E-07	1.75E-05
3	4/2/2007	21:21:00	18240	595020	25.95	0.05	7.70E-08	1.75E-05
4	5/2/2007	21:48:00	6960	683040	25.45	0.00	0.00E+00	1.83E-05
5	5/2/2007	23:09:00	4860	687900	25.40	0.05	7.70E-08	1.84E-05
6	6/2/2007	17:19:00	16140	753300	24.80	0.30	4.62E-07	1.93E-05
7	6/2/2007	20:11:00	10320	763620	24.80	0.00	0.00E+00	1.93E-05
8	7/2/2007	21:09:00	16920	853500	24.70	0.05	7.70E-08	1.95E-05
9	8/2/2007	9:17:00	43680	897180	24.55	0.15	2.31E-07	1.97E-05
10	8/2/2007	19:21:00	36240	933420	24.35	0.20	3.08E-07	2.00E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	3/2/2007	17:26:00	9300	494520	27.20			
2	4/2/2007	16:17:00	57720	576780	26.70	0.3	4.62E-07	1.69E-05
3	4/2/2007	21:21:00	18240	595020	26.55	0.1	2.31E-07	1.71E-05
4	5/2/2007	21:48:00	6960	683040	26.10	0.0	0.00E+00	1.78E-05
5	5/2/2007	23:09:00	4860	687900	26.05	0.1	7.70E-08	1.79E-05
6	6/2/2007	17:19:00	16140	753300	25.50	0.3	4.62E-07	1.87E-05
7	6/2/2007	20:11:00	10320	763620	25.45	0.1	7.70E-08	1.88E-05
8	7/2/2007	21:09:00	16920	853500	25.30	0.1	1.54E-07	1.90E-05
9	8/2/2007	9:17:00	43680	897180	25.20	0.1	1.54E-07	1.92E-05
10	8/2/2007	19:21:00	36240	933420	25.00	0.2	3.08E-07	1.95E-05



รูปที่ ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต OP20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

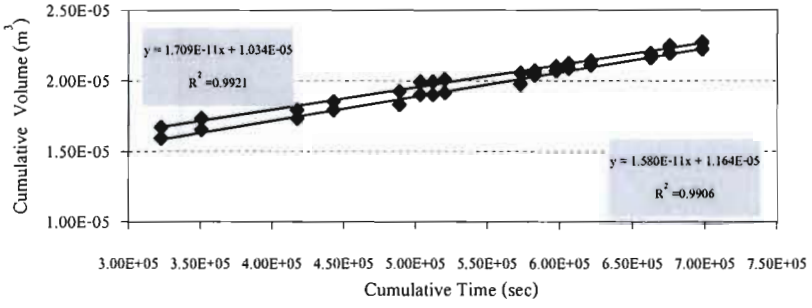
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.29	cm.
L_2	=	4.11	cm.

K_1	=	9.38E-13	m/sec
K_2	=	1.73E-12	m/sec
K_{avg}	=	**1.29E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P10 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1P10		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/11/2006	18:57:00	28080	350400	26.60			
2	26/11/2006	13:28:00	66660	417060	26.20	0.4	6.16E-07	1.79E-05
3	26/11/2006	20:35:00	25620	442680	25.80	0.4	6.16E-07	1.85E-05
4	27/11/2006	9:20:00	45900	488580	25.35	0.4	6.93E-07	1.92E-05
5	27/11/2006	13:24:00	14640	503220	24.90	0.5	6.93E-07	1.99E-05
6	27/11/2006	15:48:00	8640	511860	24.90	0.0	0.00E+00	1.99E-05
7	27/11/2006	18:07:00	8340	520200	24.80	0.1	1.54E-07	2.01E-05
8	28/11/2006	8:40:00	52380	572580	24.50	0.3	4.62E-07	2.06E-05
9	28/11/2006	11:24:00	9840	582420	24.40	0.1	1.54E-07	2.07E-05
10	28/11/2006	15:30:00	14760	597180	24.20	0.2	3.08E-07	2.10E-05
11	28/11/2006	17:53:00	8580	605760	24.05	0.1	2.31E-07	2.12E-05
12	29/11/2006	9:32:00	41100	662100	23.60	0.3	5.39E-07	2.19E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/11/2006	18:57:00	28080	350400	23.60			
2	26/11/2006	13:28:00	66660	417060	23.10	0.5	7.70E-07	1.73E-05
3	26/11/2006	20:35:00	25620	442680	22.70	0.4	6.16E-07	1.79E-05
4	27/11/2006	9:20:00	45900	488580	22.45	0.3	3.85E-07	1.83E-05
5	27/11/2006	13:24:00	14640	503220	22.00	0.4	6.93E-07	1.90E-05
6	27/11/2006	15:48:00	8640	511860	22.00	0.0	0.00E+00	1.90E-05
7	27/11/2006	18:07:00	8340	520200	21.90	0.1	1.54E-07	1.92E-05
8	28/11/2006	8:40:00	52380	572580	21.50	0.4	6.16E-07	1.98E-05
9	28/11/2006	11:24:00	9840	582420	21.10	0.4	6.16E-07	2.04E-05
10	28/11/2006	15:30:00	14760	597180	20.90	0.2	3.08E-07	2.07E-05
11	28/11/2006	17:53:00	8580	605760	20.80	0.1	1.54E-07	2.09E-05
12	29/11/2006	9:32:00	41100	662100	20.30	0.3	5.39E-07	2.16E-05



รูปที่ ข.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

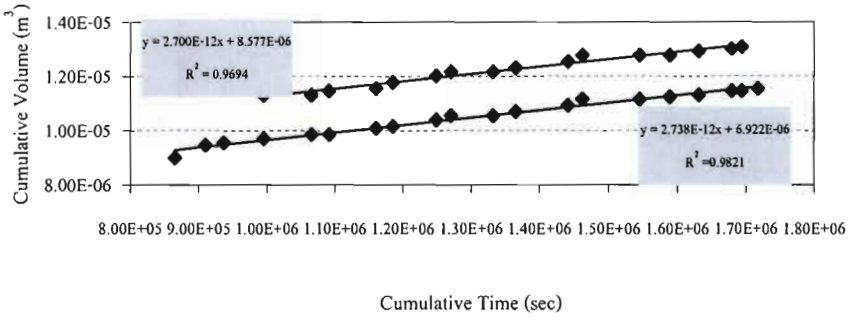
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.15	cm.

K_1	=	1.60E-12	m/sec
K_2	=	1.69E-12	m/sec
K_{avg}	=	**1.65E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P10 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1P10		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	23/2/2007	1:00:00	29100	864420	30.80			
2	23/2/2007	13:33:00	45180	909600	30.50	0.30	4.62E-07	9.47E-06
3	23/2/2007	20:58:00	26700	936300	30.45	0.05	7.70E-08	9.54E-06
4	24/2/2007	13:17:00	58740	995040	30.35	0.10	1.54E-07	9.70E-06
5	25/2/2007	8:46:00	70140	1065180	30.25	0.10	1.54E-07	9.85E-06
6	25/2/2007	15:56:00	25800	1090980	30.25	0.00	0.00E+00	9.85E-06
7	26/2/2007	11:13:00	69420	1160400	30.10	0.15	2.31E-07	1.01E-05
8	26/2/2007	18:07:00	24840	1185240	30.05	0.05	7.70E-08	1.02E-05
9	27/2/2007	11:43:00	63360	1248600	29.90	0.15	2.31E-07	1.04E-05
10	27/2/2007	17:52:00	22140	1270740	29.80	0.10	1.54E-07	1.05E-05
11	28/2/2007	10:52:00	61200	1331940	29.80	0.00	0.00E+00	1.05E-05
12	28/2/2007	20:00:00	32880	1364820	29.70	0.10	1.54E-07	1.07E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	23/2/2007	1:00:00	29100	864420	29.80			
2	23/2/2007	13:33:00	45180	909600	29.55	0.3	3.85E-07	1.09E-05
3	23/2/2007	20:58:00	26700	936300	29.45	0.1	1.54E-07	1.11E-05
4	24/2/2007	13:17:00	58740	995040	29.30	0.1	2.31E-07	1.13E-05
5	25/2/2007	8:46:00	70140	1065180	29.30	0.0	0.00E+00	1.13E-05
6	25/2/2007	15:56:00	25800	1090980	29.20	0.1	1.54E-07	1.15E-05
7	26/2/2007	11:13:00	69420	1160400	29.15	0.1	7.70E-08	1.15E-05
8	26/2/2007	18:07:00	24840	1185240	29.00	0.1	2.31E-07	1.18E-05
9	27/2/2007	11:43:00	63360	1248600	28.85	0.1	2.31E-07	1.20E-05
10	27/2/2007	17:52:00	22140	1270740	28.75	0.1	1.54E-07	1.22E-05
11	28/2/2007	10:52:00	61200	1331940	28.75	0.0	0.00E+00	1.22E-05
12	28/2/2007	20:00:00	32880	1364820	28.65	0.1	1.54E-07	1.23E-05



รูปที่ ข.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

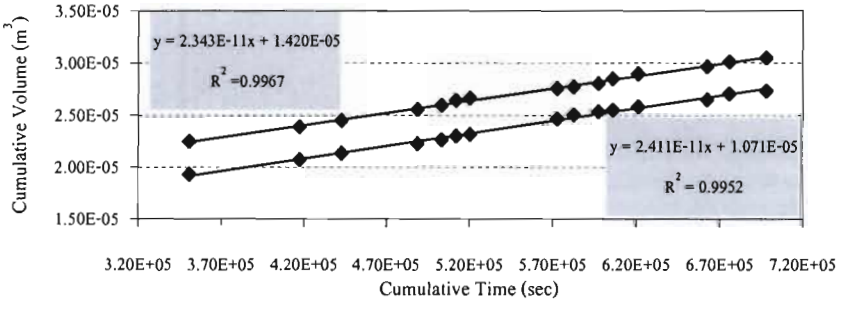
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.05	cm.
L_1	=	4.21	cm.
L_2	=	4.15	cm.

K_1	=	2.84E-13	m/sec
K_2	=	2.32E-13	m/sec
K_{avg}	=	**2.50E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P20 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1P20		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/11/2006	18:59:00	28200	350520	23.20			
2	26/11/2006	13:28:00	66540	417060	22.30	0.90	1.39E-06	2.39E-05
3	26/11/2006	20:35:00	25620	442680	21.90	0.40	6.16E-07	2.45E-05
4	27/11/2006	9:20:00	45900	488580	21.20	0.70	1.08E-06	2.56E-05
5	27/11/2006	13:24:00	14640	503220	20.95	0.25	3.85E-07	2.59E-05
6	27/11/2006	15:48:00	8640	511860	20.65	0.30	4.62E-07	2.64E-05
7	27/11/2006	18:07:00	8340	520200	20.50	0.15	2.31E-07	2.66E-05
8	28/11/2006	8:40:00	52380	572580	19.90	0.60	9.24E-07	2.76E-05
9	28/11/2006	11:24:00	9840	582420	19.80	0.10	1.54E-07	2.77E-05
10	28/11/2006	15:30:00	14760	597180	19.60	0.20	3.08E-07	2.80E-05
11	28/11/2006	17:53:00	8580	605760	19.30	0.30	4.62E-07	2.85E-05
12	28/11/2006	22:07:00	15240	621000	19.00	0.30	4.62E-07	2.89E-05
13	29/11/2006	9:32:00	41100	662100	18.55	0.45	6.93E-07	2.96E-05
14	29/11/2006	13:14:00	13320	675420	18.25	0.30	4.62E-07	3.01E-05
15	29/11/2006	19:26:00	22320	697740	18.00	0.25	3.85E-07	3.05E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/11/2006	18:59:00	28200	350520	21.70			
2	26/11/2006	13:28:00	66540	417060	20.80	0.90	1.39E-06	2.07E-05
3	26/11/2006	20:35:00	25620	442680	20.40	0.40	6.16E-07	2.13E-05
4	27/11/2006	9:20:00	45900	488580	19.80	0.60	9.24E-07	2.22E-05
5	27/11/2006	13:24:00	14640	503220	19.55	0.25	3.85E-07	2.26E-05
6	27/11/2006	15:48:00	8640	511860	19.30	0.25	3.85E-07	2.30E-05
7	27/11/2006	18:07:00	8340	520200	19.20	0.10	1.54E-07	2.32E-05
8	28/11/2006	8:40:00	52380	572580	18.25	0.95	1.46E-06	2.46E-05
9	28/11/2006	11:24:00	9840	582420	18.00	0.25	3.85E-07	2.50E-05
10	28/11/2006	15:30:00	14760	597180	17.80	0.20	3.08E-07	2.53E-05
11	28/11/2006	17:53:00	8580	605760	17.70	0.10	1.54E-07	2.55E-05
12	28/11/2006	22:07:00	15240	621000	17.50	0.20	3.08E-07	2.58E-05
13	29/11/2006	9:32:00	41100	662100	17.05	0.45	6.93E-07	2.65E-05
14	29/11/2006	13:14:00	13320	675420	16.70	0.35	5.39E-07	2.70E-05
15	29/11/2006	19:26:00	22320	697740	16.50	0.20	3.08E-07	2.73E-05



รูปที่ ข.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

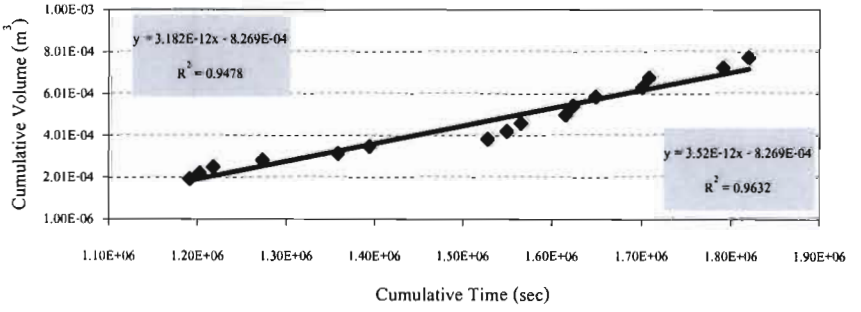
D_1	=	10.01	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.15	cm.

K_1	=	2.54E-12	m/sec
K_2	=	2.46E-12	m/sec
K_{avg}	=	**2.50E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P20 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1P20		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/3/2007	17:24:00	11520	1202220	31.50			
2	7/3/2007	21:35:00	15060	1217280	31.45	19.2	2.95E-05	2.51E-04
3	8/3/2007	13:02:00	55620	1272900	31.40	20.2	3.10E-05	2.82E-04
4	9/3/2007	12:44:00	85320	1358220	31.30	21.2	3.26E-05	3.15E-04
5	9/3/2007	22:40:00	35760	1393980	31.10	22.2	3.41E-05	3.49E-04
6	11/3/2007	11:56:00	134160	1528140	30.90	23.2	3.56E-05	3.85E-04
7	11/3/2007	17:46:00	21000	1549140	30.90	24.2	3.72E-05	4.22E-04
8	11/3/2007	22:12:00	15960	1565100	30.90	25.2	3.87E-05	4.61E-04
9	12/3/2007	11:58:00	49560	1614660	30.85	26.2	4.03E-05	5.01E-04
10	12/3/2007	14:22:00	8640	1623300	30.85	27.2	4.18E-05	5.43E-04
11	12/3/2007	21:25:00	25380	1648680	30.85	28.2	4.33E-05	5.86E-04
12	13/3/2007	11:51:00	51960	1700640	30.80	29.2	4.49E-05	6.31E-04
13	13/3/2007	13:59:00	7680	1708320	30.80	30.2	4.64E-05	6.77E-04
14	14/3/2007	12:55:00	82560	1790880	30.75	31.2	4.80E-05	7.25E-04
15	14/3/2007	20:57:00	28920	1819800	30.60	32.2	4.95E-05	7.75E-04

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	7/3/2007	17:24:00	11520	1202220	31.50			
2	7/3/2007	21:35:00	15060	1217280	31.45	19.2	2.95E-05	2.51E-04
3	8/3/2007	13:02:00	55620	1272900	31.40	20.2	3.10E-05	2.82E-04
4	9/3/2007	12:44:00	85320	1358220	31.30	21.2	3.26E-05	3.15E-04
5	9/3/2007	22:40:00	35760	1393980	31.10	22.2	3.41E-05	3.49E-04
6	11/3/2007	11:56:00	134160	1528140	30.90	23.2	3.56E-05	3.85E-04
7	11/3/2007	17:46:00	21000	1549140	30.90	24.2	3.72E-05	4.22E-04
8	11/3/2007	22:12:00	15960	1565100	30.90	25.2	3.87E-05	4.61E-04
9	12/3/2007	11:58:00	49560	1614660	30.85	26.2	4.03E-05	5.01E-04
10	12/3/2007	14:22:00	8640	1623300	30.85	27.2	4.18E-05	5.43E-04
11	12/3/2007	21:25:00	25380	1648680	30.85	28.2	4.33E-05	5.86E-04
12	13/3/2007	11:51:00	51960	1700640	30.80	29.2	4.49E-05	6.31E-04
13	13/3/2007	13:59:00	7680	1708320	30.80	30.2	4.64E-05	6.77E-04
14	14/3/2007	12:55:00	82560	1790880	30.75	31.2	4.80E-05	7.25E-04
15	14/3/2007	20:57:00	28920	1819800	30.60	32.2	4.95E-05	7.75E-04



รูปที่ ข.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

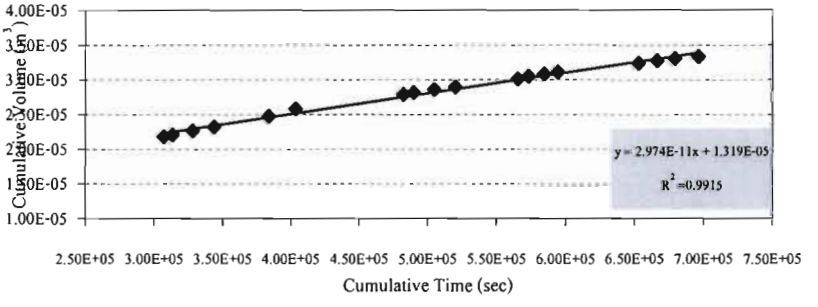
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.21	cm.
L_2	=	4.18	cm.

K_1	=	4.35E-13	m/sec
K_2	=	3.40E-13	m/sec
K_{avg}	=	3.80E-13	m/sec

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P30 ที่อายุ 28 วัน

Sample	G1P30	Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	19/11/2006	10:38:00	60960	306780	25.35			
2	19/11/2006	12:25:00	6420	313200	25.15	0.2	3.08E-07	2.21E-05
3	19/11/2006	16:29:00	14640	327840	24.80	0.3	5.39E-07	2.26E-05
4	19/11/2006	20:51:00	15720	343560	24.45	0.4	5.39E-07	2.32E-05
5	20/11/2006	7:57:00	39960	383520	23.45	1.0	1.54E-06	2.47E-05
6	20/11/2006	13:24:00	19620	403140	22.75	0.7	1.08E-06	2.58E-05
7	21/11/2006	11:19:00	78900	482040	21.40	1.4	2.08E-06	2.79E-05
8	21/11/2006	13:27:00	7680	489720	21.20	0.2	3.08E-07	2.82E-05
9	21/11/2006	17:37:00	15000	504720	20.95	0.3	3.85E-07	2.86E-05
10	21/11/2006	21:52:00	15300	520020	20.70	0.3	3.85E-07	2.89E-05
11	22/11/2006	10:27:00	45300	565320	19.95	0.8	1.15E-06	3.01E-05
12	22/11/2006	12:36:00	7740	573060	19.70	0.3	3.85E-07	3.05E-05
13	22/11/2006	15:44:00	11280	584340	19.50	0.2	3.08E-07	3.08E-05
14	22/11/2006	18:30:00	9960	594300	19.30	0.2	3.08E-07	3.11E-05
15	23/11/2006	10:38:00	58080	652380	18.50	0.8	1.23E-06	3.23E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	19/11/2006	10:38:00	60960	306780	33.35			
2	19/11/2006	12:25:00	6420	313200	33.30	0.1	7.70E-08	9.31E-06
3	19/11/2006	16:29:00	14640	327840	33.20	0.1	1.54E-07	9.47E-06
4	19/11/2006	20:51:00	15720	343560	33.10	0.1	1.54E-07	9.62E-06
5	20/11/2006	7:57:00	39960	383520	32.80	0.3	4.62E-07	1.01E-05
6	20/11/2006	13:24:00	19620	403140	32.70	0.1	1.54E-07	1.02E-05
7	21/11/2006	11:19:00	78900	482040	32.50	0.2	3.08E-07	1.05E-05
8	21/11/2006	13:27:00	7680	489720	32.35	0.1	2.31E-07	1.08E-05
9	21/11/2006	17:37:00	15000	504720	32.25	0.1	1.54E-07	1.09E-05
10	21/11/2006	21:52:00	15300	520020	32.15	0.1	1.54E-07	1.11E-05
11	22/11/2006	10:27:00	45300	565320	31.95	0.2	3.08E-07	1.14E-05
12	22/11/2006	12:36:00	7740	573060	31.90	0.1	7.70E-08	1.15E-05
13	22/11/2006	15:44:00	11280	584340	31.85	0.0	7.70E-08	1.15E-05
14	22/11/2006	18:30:00	9960	594300	31.80	0.1	7.70E-08	1.16E-05
15	23/11/2006	10:38:00	58080	652380	31.65	0.2	2.31E-07	1.19E-05



รูปที่ ข.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.13	cm.
L_2	=	4.16	cm.

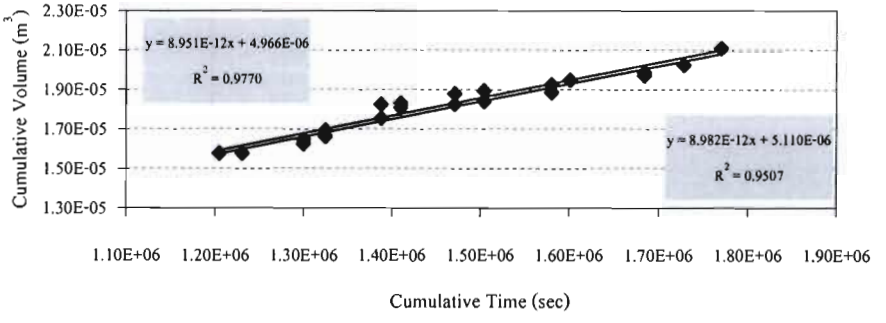
K_1	=	3.06E-12	m/sec
K_2	=	8.68E-13	m/sec
K_{avg}	=	3.06E-12	m/sec

หมายเหตุ : ค่า K_2 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก Epoxy แตกไม่สามารถวัดอัตราการซึมของน้ำไ

ตารางที่ ข.34 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P30 ที่อายุ 90 วัน

Sample G1P30		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/2/2007	8:46:00	70140	1204440	24.00			
2	25/2/2007	15:56:00	25800	1230240	24.00	0.0	0.00E+00	1.58E-05
3	26/2/2007	11:13:00	69420	1299660	23.70	0.3	4.62E-07	1.62E-05
4	26/2/2007	18:07:00	24840	1324500	23.25	0.4	6.93E-07	1.69E-05
5	27/2/2007	11:43:00	63360	1387860	22.85	0.4	6.16E-07	1.75E-05
6	27/2/2007	17:52:00	22140	1410000	22.50	0.4	5.39E-07	1.81E-05
7	28/2/2007	10:52:00	61200	1471200	22.40	0.1	1.54E-07	1.82E-05
8	28/2/2007	20:00:00	32880	1504080	22.30	0.1	1.54E-07	1.84E-05
9	1/3/2007	17:10:00	76200	1580280	22.00	0.3	4.62E-07	1.89E-05
10	1/3/2007	22:54:00	20640	1600920	21.60	0.4	6.16E-07	1.95E-05
11	2/3/2007	21:55:00	82860	1683780	21.45	0.2	2.31E-07	1.97E-05
12	3/3/2007	10:09:00	44040	1727820	21.10	0.3	5.39E-07	2.02E-05
13	3/3/2007	21:47:00	41880	1769700	20.55	0.6	8.47E-07	2.11E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	25/2/2007	8:46:00	70140	1204440	24.00			
2	25/2/2007	15:56:00	25800	1230240	24.00	0.00	0.00E+00	1.58E-05
3	26/2/2007	11:13:00	69420	1299660	23.55	0.45	6.93E-07	1.65E-05
4	26/2/2007	18:07:00	24840	1324500	23.45	0.10	1.54E-07	1.66E-05
5	27/2/2007	11:43:00	63360	1387860	22.40	1.05	1.62E-06	1.82E-05
6	27/2/2007	17:52:00	22140	1410000	22.35	0.05	7.70E-08	1.83E-05
7	28/2/2007	10:52:00	61200	1471200	22.05	0.30	4.62E-07	1.88E-05
8	28/2/2007	20:00:00	32880	1504080	21.95	0.10	1.54E-07	1.89E-05
9	1/3/2007	17:10:00	76200	1580280	21.75	0.20	3.08E-07	1.92E-05
10	1/3/2007	22:54:00	20640	1600920	21.60	0.15	2.31E-07	1.95E-05
11	2/3/2007	21:55:00	82860	1683780	21.35	0.25	3.85E-07	1.99E-05
12	3/3/2007	10:09:00	44040	1727820	21.10	0.25	3.85E-07	2.02E-05
13	3/3/2007	21:47:00	41880	1769700	20.55	0.55	8.47E-07	2.11E-05



รูปที่ ข.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

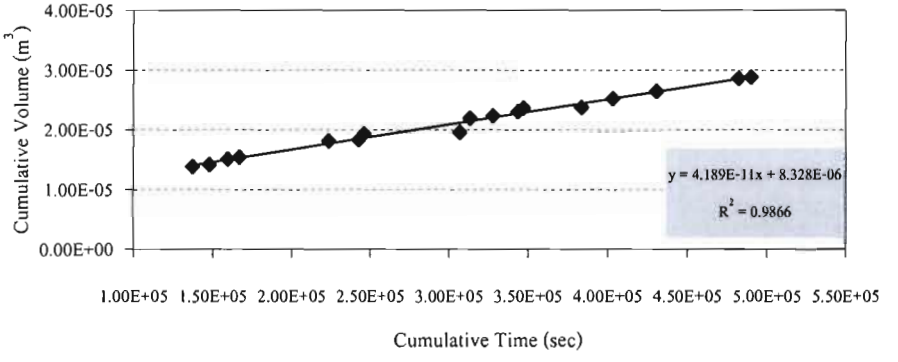
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.05	cm.
L_1	=	4.21	cm.
L_2	=	4.02	cm.

K_1	=	9.42E-13	m/sec
K_2	=	9.59E-13	m/sec
K_{avg}	=	**9.50E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.35 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P40 ที่อายุ 28 วัน

Sample G1P40	Age 28 Days	Sample No. 1

Sample1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	17/11/2006	17:41:00	11580	159360	32.30			
2	17/11/2006	19:44:00	7380	166740	32.20	0.1	1.54E-07	7.85E-06
3	18/11/2006	11:28:00	56640	223380	31.45	0.8	1.15E-06	9.01E-06
4	18/11/2006	16:47:00	19140	242520	31.10	0.3	5.39E-07	9.54E-06
5	18/11/2006	17:42:00	3300	245820	30.95	0.2	2.31E-07	9.78E-06
6	19/11/2006	10:38:00	60960	306780	30.50	0.4	6.93E-07	1.05E-05
7	19/11/2006	12:25:00	6420	313200	30.35	0.1	2.31E-07	1.07E-05
8	19/11/2006	16:29:00	14640	327840	30.10	0.3	3.85E-07	1.11E-05
9	19/11/2006	20:51:00	15720	343560	29.95	0.2	2.31E-07	1.13E-05
10	19/11/2006	21:48:00	3420	346980	29.90	0.1	7.70E-08	1.14E-05
11	20/11/2006	7:57:00	36540	383520	29.50	0.4	6.16E-07	1.20E-05
12	20/11/2006	13:24:00	19620	403140	29.20	0.3	4.62E-07	1.25E-05
13	20/11/2006	20:57:00	27180	430320	28.85	0.3	5.39E-07	1.30E-05
14	21/11/2006	11:19:00	51720	482040	28.75	0.1	1.54E-07	1.32E-05
15	21/11/2006	13:27:00	7680	489720	28.70	0.1	7.70E-08	1.32E-05



รูปที่ ข.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุบ่ม 28 วัน

D_1 = 10.00 cm.

D_2 = 10.02 cm.

L_1 = 4.10 cm.

L_2 = 4.00 cm.

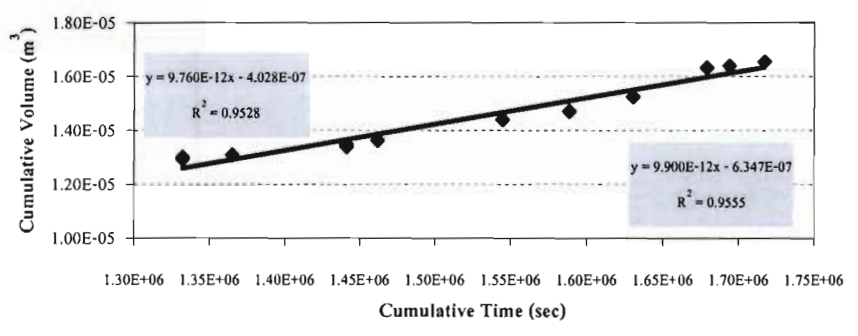
K_{avg} = **4.38E-12**

หมายเหตุ : ค่า K_2 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก Epoxy แตกไม่สามารถวัดอัตราการซึมของน้ำได

ตารางที่ ข.36 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G1P40 ที่อายุ 90 วัน

Sample	G1P40	Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	28/2/2007	10:52:00	61200	1331940	28.25			
2	28/2/2007	20:00:00	32880	1364820	28.15	0.10	1.54E-07	1.31E-05
3	1/3/2007	17:10:00	76200	1441020	27.95	0.20	3.08E-07	1.34E-05
4	1/3/2007	22:54:00	20640	1461660	27.80	0.15	2.31E-07	1.36E-05
5	2/3/2007	21:55:00	82860	1544520	27.30	0.50	7.70E-07	1.44E-05
6	3/3/2007	10:09:00	44040	1588560	27.10	0.20	3.08E-07	1.47E-05
7	3/3/2007	21:47:00	41880	1630440	26.75	0.35	5.39E-07	1.52E-05
8	4/3/2007	11:15:00	48480	1678920	26.05	0.70	1.08E-06	1.63E-05
9	4/3/2007	15:19:00	14640	1693560	26.00	0.05	7.70E-08	1.64E-05
10	4/3/2007	21:47:00	23280	1716840	25.90	0.10	1.54E-07	1.65E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	28/2/2007	10:52:00	61200	1331940	28.10			
2	28/2/2007	20:00:00	32880	1364820	28.05	0.1	7.70E-08	1.31E-05
3	1/3/2007	17:10:00	76200	1441020	27.80	0.3	3.85E-07	1.35E-05
4	1/3/2007	22:54:00	20640	1461660	27.70	0.1	1.54E-07	1.36E-05
5	2/3/2007	21:55:00	82860	1544520	27.20	0.5	7.70E-07	1.44E-05
6	3/3/2007	10:09:00	44040	1588560	27.00	0.2	3.08E-07	1.47E-05
7	3/3/2007	21:47:00	41880	1630440	26.65	0.4	5.39E-07	1.52E-05
8	4/3/2007	11:15:00	48480	1678920	25.95	0.7	1.08E-06	1.63E-05
9	4/3/2007	15:19:00	14640	1693560	25.90	0.1	7.70E-08	1.64E-05
10	4/3/2007	21:47:00	23280	1716840	25.80	0.1	1.54E-07	1.65E-05



รูปที่ ข.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G1P40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

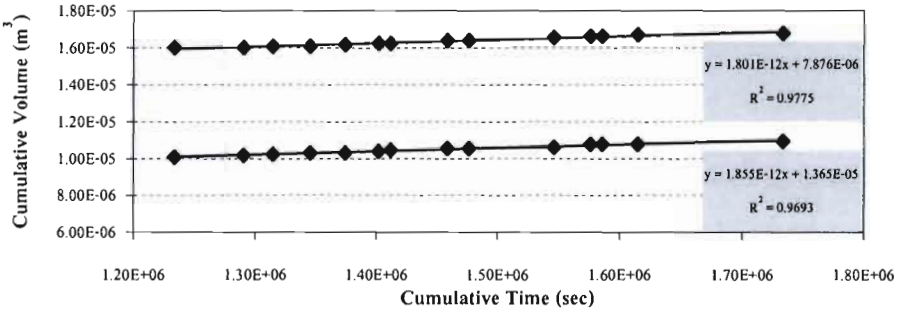
D_1	=	10.02	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.13	cm.

K_1	=	1.00E-12	m/sec
K_2	=	1.06E-12	m/sec
K_{avg}	=	**1.03E-12**	m/sec

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P10 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2P10		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/12/2006	1:29:00	18720	1233300	32.30			
2	18/12/2006	17:18:00	56940	1290240	32.25	0.05	7.70E-08	1.02E-05
3	18/12/2006	23:59:00	24060	1314300	32.20	0.05	7.70E-08	1.02E-05
4	19/12/2006	8:32:00	30780	1345080	32.15	0.05	7.70E-08	1.03E-05
5	19/12/2006	16:33:00	28860	1373940	32.15	0.00	0.00E+00	1.03E-05
6	20/12/2006	0:19:00	27960	1401900	32.10	0.05	7.70E-08	1.04E-05
7	20/12/2006	3:00:00	9660	1411560	32.05	0.05	7.70E-08	1.05E-05
8	20/12/2006	16:06:00	47160	1458720	32.00	0.05	7.70E-08	1.05E-05
9	20/12/2006	20:59:00	17580	1476300	32.00	0.00	0.00E+00	1.05E-05
10	21/12/2006	16:23:00	69840	1546140	31.95	0.05	7.70E-08	1.06E-05
11	22/12/2006	0:41:00	29880	1576020	31.85	0.10	1.54E-07	1.08E-05
12	22/12/2006	3:22:00	9660	1585680	31.85	0.00	0.00E+00	1.08E-05
13	22/12/2006	11:24:00	28920	1614600	31.85	0.00	0.00E+00	1.08E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/12/2006	1:29:00	18720	1233300	28.45			
2	18/12/2006	17:18:00	56940	1290240	28.45	0.00	0.00E+00	1.60E-05
3	18/12/2006	23:59:00	24060	1314300	28.40	0.05	7.70E-08	1.61E-05
4	19/12/2006	8:32:00	30780	1345080	28.40	0.00	0.00E+00	1.61E-05
5	19/12/2006	16:33:00	28860	1373940	28.35	0.05	7.70E-08	1.62E-05
6	20/12/2006	0:19:00	27960	1401900	28.30	0.05	7.70E-08	1.62E-05
7	20/12/2006	3:00:00	9660	1411560	28.30	0.00	0.00E+00	1.62E-05
8	20/12/2006	16:06:00	47160	1458720	28.20	0.10	1.54E-07	1.64E-05
9	20/12/2006	20:59:00	17580	1476300	28.20	0.00	0.00E+00	1.64E-05
10	21/12/2006	16:23:00	69840	1546140	28.10	0.10	1.54E-07	1.65E-05
11	22/12/2006	0:41:00	29880	1576020	28.05	0.05	7.70E-08	1.66E-05
12	22/12/2006	3:22:00	9660	1585680	28.05	0.00	0.00E+00	1.66E-05
13	22/12/2006	11:24:00	28920	1614600	28.00	0.05	7.70E-08	1.67E-05



รูปที่ ข.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

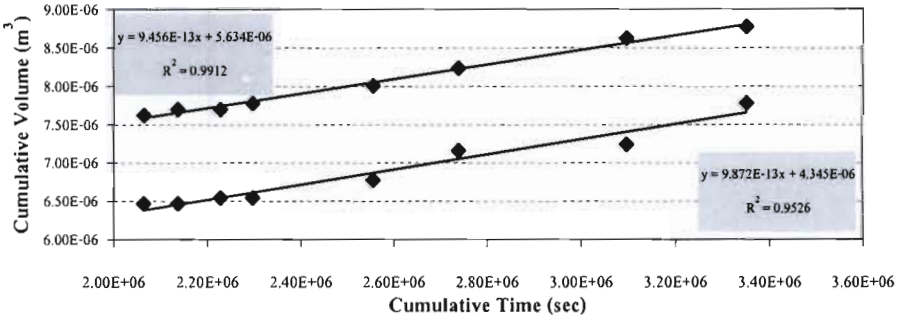
D_1	=	10.01	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.13	cm.
L_2	=	4.04	cm.

K_1	=	1.95E-13	m/sec
K_2	=	2.01E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.98E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P10 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2P10		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	28/3/2007	21:20:00	118500	2063640	33.85			
2	29/3/2007	17:22:00	72120	2135760	33.80	0.05	7.70E-08	7.70E-06
3	30/3/2007	18:42:00	91200	2226960	33.80	0.00	0.00E+00	7.70E-06
4	31/3/2007	13:49:00	68820	2295780	33.75	0.05	7.70E-08	7.77E-06
5	3/4/2007	13:46:00	259020	2554800	33.60	0.15	2.31E-07	8.00E-06
6	5/4/2007	16:39:00	183180	2737980	33.45	0.15	2.31E-07	8.24E-06
7	9/4/2007	19:55:00	357360	3095340	33.20	0.25	3.85E-07	8.62E-06
8	12/4/2007	18:34:00	254340	3349680	33.10	0.10	1.54E-07	8.77E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	28/3/2007	21:20:00	118500	2063640	34.50			
2	29/3/2007	17:22:00	72120	2135760	34.50	0.0	0.00E+00	6.47E-06
3	30/3/2007	18:42:00	91200	2226960	34.45	0.0	7.70E-08	6.54E-06
4	31/3/2007	13:49:00	68820	2295780	34.45	0.0	0.00E+00	6.54E-06
5	3/4/2007	13:46:00	259020	2554800	34.30	0.2	2.31E-07	6.77E-06
6	5/4/2007	16:39:00	183180	2737980	34.05	0.3	3.85E-07	7.16E-06
7	9/4/2007	19:55:00	357360	3095340	34.00	0.0	7.70E-08	7.24E-06
8	12/4/2007	18:34:00	254340	3349680	33.65	0.4	5.39E-07	7.77E-06



รูปที่ ข.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P10 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

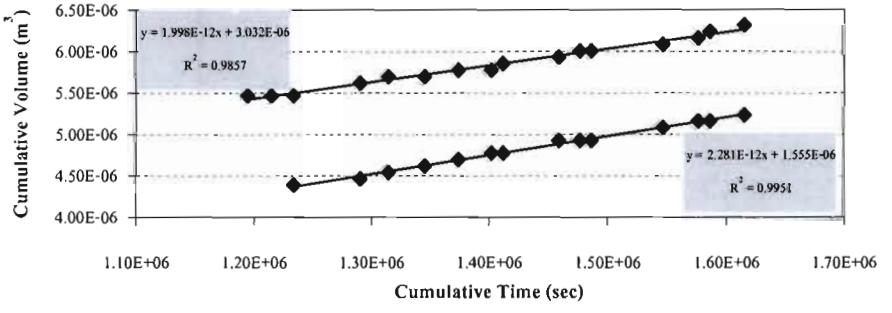
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.03	cm.

K_1	=	1.04E-13	m/sec
K_2	=	1.01E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.02E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P20 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2P20		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/12/2006	1:29:00	18720	1233300	36.25			
2	18/12/2006	17:18:00	56940	1290240	36.20	0.05	7.70E-08	4.46E-06
3	18/12/2006	23:59:00	24060	1314300	36.15	0.05	7.70E-08	4.54E-06
4	19/12/2006	8:32:00	30780	1345080	36.10	0.05	7.70E-08	4.62E-06
5	19/12/2006	16:33:00	28860	1373940	36.05	0.05	7.70E-08	4.70E-06
6	20/12/2006	0:19:00	27960	1401900	36.00	0.05	7.70E-08	4.77E-06
7	20/12/2006	3:00:00	9660	1411560	36.00	0.00	0.00E+00	4.77E-06
8	20/12/2006	16:06:00	47160	1458720	35.90	0.10	1.54E-07	4.93E-06
9	20/12/2006	20:59:00	17580	1476300	35.90	0.00	0.00E+00	4.93E-06
10	20/12/2006	23:38:00	9540	1485840	35.90	0.00	0.00E+00	4.93E-06
11	21/12/2006	16:23:00	60300	1546140	35.80	0.10	1.54E-07	5.08E-06
12	22/12/2006	0:41:00	29880	1576020	35.75	0.05	7.70E-08	5.16E-06
13	22/12/2006	3:22:00	9660	1585680	35.75	0.00	0.00E+00	5.16E-06
14	22/12/2006	11:24:00	28920	1614600	35.70	0.05	7.70E-08	5.23E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/12/2006	1:29:00	18720	1233300	35.65			
2	18/12/2006	17:18:00	56940	1290240	35.55	0.10	1.54E-07	5.62E-06
3	18/12/2006	23:59:00	24060	1314300	35.50	0.05	7.70E-08	5.70E-06
4	19/12/2006	8:32:00	30780	1345080	35.50	0.00	0.00E+00	5.70E-06
5	19/12/2006	16:33:00	28860	1373940	35.45	0.05	7.70E-08	5.77E-06
6	20/12/2006	0:19:00	27960	1401900	35.45	0.00	0.00E+00	5.77E-06
7	20/12/2006	3:00:00	9660	1411560	35.40	0.05	7.70E-08	5.85E-06
8	20/12/2006	16:06:00	47160	1458720	35.35	0.05	7.70E-08	5.93E-06
9	20/12/2006	20:59:00	17580	1476300	35.30	0.05	7.70E-08	6.00E-06
10	20/12/2006	23:38:00	9540	1485840	35.30	0.00	0.00E+00	6.00E-06
11	21/12/2006	16:23:00	60300	1546140	35.25	0.05	7.70E-08	6.08E-06
12	22/12/2006	0:41:00	29880	1576020	35.20	0.05	7.70E-08	6.16E-06
13	22/12/2006	3:22:00	9660	1585680	35.15	0.05	7.70E-08	6.23E-06
14	22/12/2006	11:24:00	28920	1614600	35.10	0.05	7.70E-08	6.31E-06



รูปที่ ข.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

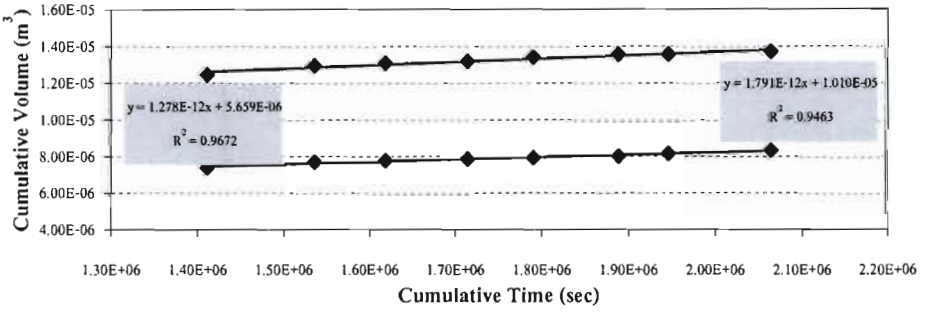
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.19	cm.

K_1	=	2.10E-13	m/sec
K_2	=	2.40E-13	m/sec
K_{avg}	=	**2.20E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.40 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P20 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2P20		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	21/3/2007	7:58:00	43020	1410720	30.60			
2	22/3/2007	18:34:00	124560	1535280	30.30	0.3	4.62E-07	1.29E-05
3	23/3/2007	17:29:00	82500	1617780	30.20	0.1	1.54E-07	1.31E-05
4	24/3/2007	20:06:00	95820	1713600	30.15	0.1	7.70E-08	1.32E-05
5	25/3/2007	17:17:00	76260	1789860	30.00	0.1	2.31E-07	1.34E-05
6	26/3/2007	20:35:00	98280	1888140	29.90	0.1	1.54E-07	1.35E-05
7	27/3/2007	12:25:00	57000	1945140	29.90	0.0	0.00E+00	1.35E-05
8	28/3/2007	21:20:00	118500	2063640	29.80	0.1	1.54E-07	1.37E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	21/3/2007	7:58:00	43020	1410720	34.00			
2	22/3/2007	18:34:00	124560	1535280	33.80	0.20	3.08E-07	7.70E-06
3	23/3/2007	17:29:00	82500	1617780	33.75	0.05	7.70E-08	7.77E-06
4	24/3/2007	20:06:00	95820	1713600	33.70	0.05	7.70E-08	7.85E-06
5	25/3/2007	17:17:00	76260	1789860	33.65	0.05	7.70E-08	7.93E-06
6	26/3/2007	20:35:00	98280	1888140	33.60	0.05	7.70E-08	8.00E-06
7	27/3/2007	12:25:00	57000	1945140	33.50	0.10	1.54E-07	8.16E-06
8	28/3/2007	21:20:00	118500	2063640	33.40	0.10	1.54E-07	8.31E-06



รูปที่ ข.40 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P20 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

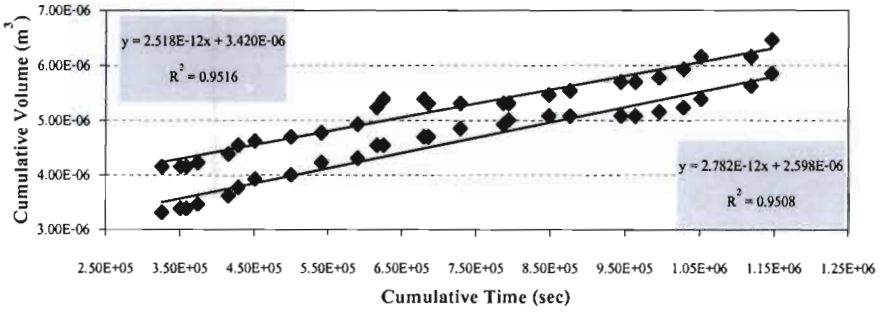
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.18	cm.

K_1	=	1.89E-13	m/sec
K_2	=	1.36E-13	m/sec
K_{avg}	=	1.60E-13	m/sec

ตารางที่ ข.41 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P30 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2P30		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/12/2006	19:56:00	9420	624960	35.70			
2	2/12/2006	11:08:00	54720	679680	35.60	0.10	1.54E-07	4.70E-06
3	2/12/2006	12:46:00	5880	685560	35.60	0.00	0.00E+00	4.70E-06
4	3/12/2006	0:44:00	43080	728640	35.50	0.10	1.54E-07	4.85E-06
5	3/12/2006	16:59:00	58500	787140	35.45	0.05	7.70E-08	4.93E-06
6	3/12/2006	18:54:00	6900	794040	35.40	0.05	7.70E-08	5.00E-06
7	4/12/2006	9:51:00	53820	847860	35.35	0.05	7.70E-08	5.08E-06
8	4/12/2006	17:38:00	28020	875880	35.35	0.00	0.00E+00	5.08E-06
9	5/12/2006	12:40:00	68520	944400	35.35	0.00	0.00E+00	5.08E-06
10	5/12/2006	17:59:00	19140	963540	35.35	0.00	0.00E+00	5.08E-06
11	6/12/2006	2:45:00	31560	995100	35.30	0.05	7.70E-08	5.16E-06
12	6/12/2006	11:49:00	32640	1027740	35.25	0.05	7.70E-08	5.23E-06
13	6/12/2006	18:20:00	23460	1051200	35.15	0.10	1.54E-07	5.39E-06
14	7/12/2006	12:55:00	66900	1118100	35.00	0.15	2.31E-07	5.62E-06
15	7/12/2006	20:38:00	27780	1145880	34.85	0.15	2.31E-07	5.85E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/12/2006	19:56:00	9420	624960	34.70			
2	2/12/2006	11:08:00	54720	679680	34.70	0.00	0.00E+00	5.39E-06
3	2/12/2006	12:46:00	5880	685560	34.75	0.05	7.70E-08	5.31E-06
4	3/12/2006	0:44:00	43080	728640	34.75	0.00	0.00E+00	5.31E-06
5	3/12/2006	16:59:00	58500	787140	34.75	0.00	0.00E+00	5.31E-06
6	3/12/2006	18:54:00	6900	794040	34.75	0.00	0.00E+00	5.31E-06
7	4/12/2006	9:51:00	53820	847860	34.65	0.10	1.54E-07	5.46E-06
8	4/12/2006	17:38:00	28020	875880	34.60	0.05	7.70E-08	5.54E-06
9	5/12/2006	12:40:00	68520	944400	34.50	0.10	1.54E-07	5.70E-06
10	5/12/2006	17:59:00	19140	963540	34.50	0.00	0.00E+00	5.70E-06
11	6/12/2006	2:45:00	31560	995100	34.45	0.05	7.70E-08	5.77E-06
12	6/12/2006	11:49:00	32640	1027740	34.35	0.10	1.54E-07	5.93E-06
13	6/12/2006	18:20:00	23460	1051200	34.20	0.15	2.31E-07	6.16E-06
14	7/12/2006	12:55:00	66900	1118100	34.20	0.00	0.00E+00	6.16E-06
15	7/12/2006	20:38:00	27780	1145880	34.00	0.20	3.08E-07	6.47E-06



รูปที่ ข.41 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

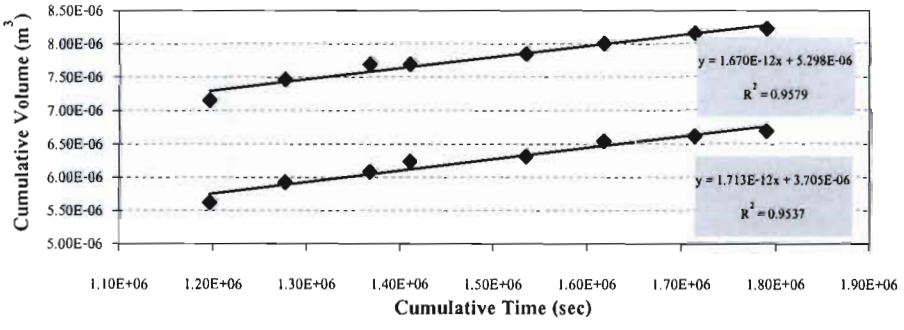
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.01	cm.

K_1	=	2.67E-13	m/sec
K_2	=	2.58E-13	m/sec
K_{avg}	=	**2.60E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.42 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P30 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2P30		Age 90 Days			Sample No. 1--2			
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/3/2007	20:26:00	82680	1196400	34.35			
2	19/3/2007	18:48:00	80520	1276920	34.15	0.20	3.08E-07	7.47E-06
3	20/3/2007	20:01:00	90780	1367700	34.00	0.15	2.31E-07	7.70E-06
4	21/3/2007	7:58:00	43020	1410720	34.00	0.00	0.00E+00	7.70E-06
5	22/3/2007	18:34:00	124560	1535280	33.90	0.10	1.54E-07	7.85E-06
6	23/3/2007	17:29:00	82500	1617780	33.80	0.10	1.54E-07	8.00E-06
7	24/3/2007	20:06:00	95820	1713600	33.70	0.10	1.54E-07	8.16E-06
8	25/3/2007	17:17:00	76260	1789860	33.65	0.05	7.70E-08	8.24E-06

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	18/3/2007	20:26:00	82680	1196400	35.10			
2	19/3/2007	18:48:00	80520	1276920	34.90	0.2	3.08E-07	5.93E-06
3	20/3/2007	20:01:00	90780	1367700	34.80	0.1	1.54E-07	6.08E-06
4	21/3/2007	7:58:00	43020	1410720	34.70	0.1	1.54E-07	6.23E-06
5	22/3/2007	18:34:00	124560	1535280	34.65	0.1	7.70E-08	6.31E-06
6	23/3/2007	17:29:00	82500	1617780	34.50	0.1	2.31E-07	6.54E-06
7	24/3/2007	20:06:00	95820	1713600	34.45	0.0	7.70E-08	6.62E-06
8	25/3/2007	17:17:00	76260	1789860	34.40	0.1	7.70E-08	6.70E-06



รูปที่ ข.42 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P30 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

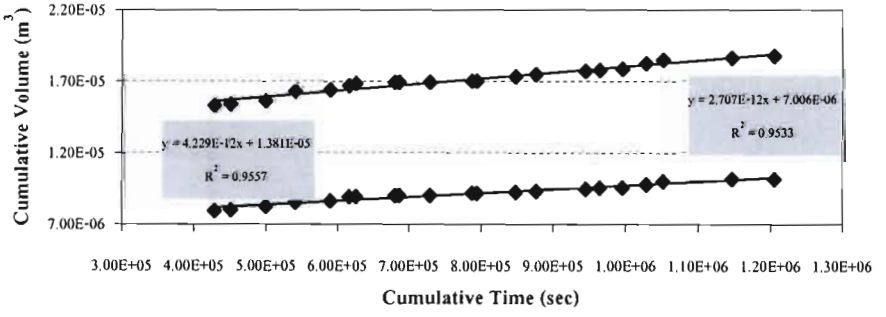
D_1	=	10.01	cm.
D_2	=	10.00	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.00	cm.

K_1	=	1.71E-13	m/sec
K_2	=	1.78E-13	m/sec
K_{avg}	=	**1.75E-13**	m/sec

ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P40 ที่อายุ 28 วัน

Sample G2P40		Age 28 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/12/2006	19:56:00	9420	624960	32.05			
2	2/12/2006	11:08:00	54720	679680	32.00	0.05	7.70E-08	9.01E-06
3	2/12/2006	12:46:00	5880	685560	32.00	0.00	0.00E+00	9.01E-06
4	3/12/2006	0:44:00	43080	728640	32.00	0.00	0.00E+00	9.01E-06
5	3/12/2006	16:59:00	58500	787140	31.90	0.10	1.54E-07	9.16E-06
6	3/12/2006	18:54:00	6900	794040	31.90	0.00	0.00E+00	9.16E-06
7	4/12/2006	9:51:00	53820	847860	31.85	0.05	7.70E-08	9.24E-06
8	4/12/2006	17:38:00	28020	875880	31.80	0.05	7.70E-08	9.31E-06
9	5/12/2006	12:40:00	68520	944400	31.70	0.10	1.54E-07	9.47E-06
10	5/12/2006	17:59:00	19140	963540	31.65	0.05	7.70E-08	9.54E-06
11	6/12/2006	2:45:00	31560	995100	31.65	0.00	0.00E+00	9.54E-06
12	6/12/2006	11:49:00	32640	1027740	31.50	0.15	2.31E-07	9.78E-06
13	6/12/2006	18:20:00	23460	1051200	31.35	0.15	2.31E-07	1.00E-05
14	7/12/2006	20:38:00	94680	1145880	31.25	0.10	1.54E-07	1.02E-05
15	8/12/2006	13:00:00	58920	1204800	31.25	0.00	0.00E+00	1.02E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	1/12/2006	19:56:00	9420	624960	26.55			
2	2/12/2006	11:08:00	54720	679680	26.50	0.05	7.70E-08	1.69E-05
3	2/12/2006	12:46:00	5880	685560	26.50	0.00	0.00E+00	1.69E-05
4	3/12/2006	0:44:00	43080	728640	26.50	0.00	0.00E+00	1.69E-05
5	3/12/2006	16:59:00	58500	787140	26.45	0.05	7.70E-08	1.70E-05
6	3/12/2006	18:54:00	6900	794040	26.45	0.00	0.00E+00	1.70E-05
7	4/12/2006	9:51:00	53820	847860	26.25	0.20	3.08E-07	1.73E-05
8	4/12/2006	17:38:00	28020	875880	26.15	0.10	1.54E-07	1.75E-05
9	5/12/2006	12:40:00	68520	944400	26.00	0.15	2.31E-07	1.77E-05
10	5/12/2006	17:59:00	19140	963540	25.95	0.05	7.70E-08	1.78E-05
11	6/12/2006	2:45:00	31560	995100	25.90	0.05	7.70E-08	1.79E-05
12	6/12/2006	11:49:00	32640	1027740	25.65	0.25	3.85E-07	1.82E-05
13	6/12/2006	18:20:00	23460	1051200	25.50	0.15	2.31E-07	1.85E-05
14	7/12/2006	20:38:00	94680	1145880	25.40	0.10	1.54E-07	1.86E-05
15	8/12/2006	13:00:00	58920	1204800	25.30	0.10	1.54E-07	1.88E-05



รูปที่ ข.43 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 28 วัน

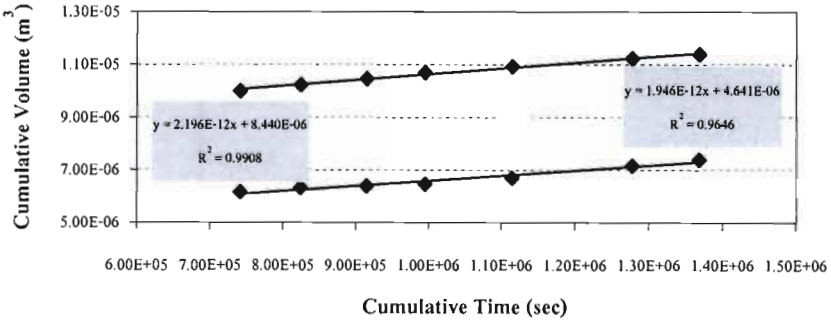
D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.02	cm.
L_1	=	4.03	cm.
L_2	=	4.12	cm.

K_1	=	2.80E-13	m/sec
K_2	=	4.33E-13	m/sec
K_{avg}	=	3.57E-13	m/sec

ตารางที่ ข.44 ผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต G2P40 ที่อายุ 90 วัน

Sample G2P40		Age 90 Days		Sample No. 1--2				
Sample 1	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	13/3/2007	13:59:00	7680	741180	32.20			
2	14/3/2007	12:55:00	82560	823740	32.05	0.2	2.31E-07	1.02E-05
3	15/3/2007	14:14:00	91140	914880	31.90	0.1	2.31E-07	1.05E-05
4	16/3/2007	12:31:00	80220	995100	31.75	0.1	2.31E-07	1.07E-05
5	17/3/2007	21:28:00	118620	1113720	31.60	0.1	2.31E-07	1.09E-05
6	19/3/2007	18:48:00	163200	1276920	31.40	0.2	3.08E-07	1.12E-05
7	20/3/2007	20:01:00	90780	1367700	31.30	0.1	1.54E-07	1.14E-05

Sample 2	DATE	Reading time	time(sec)	Cumulative time(sec)	level (cm)	difference level(cm)	Volume (m^3)	Cumulative Volume (m^3)
1	13/3/2007	13:59:00	7680	741180	34.80			
2	14/3/2007	12:55:00	82560	823740	34.70	0.10	1.54E-07	6.31E-06
3	15/3/2007	14:14:00	91140	914880	34.65	0.05	7.70E-08	6.39E-06
4	16/3/2007	12:31:00	80220	995100	34.60	0.05	7.70E-08	6.47E-06
5	17/3/2007	21:28:00	118620	1113720	34.45	0.15	2.31E-07	6.70E-06
6	19/3/2007	18:48:00	163200	1276920	34.15	0.30	4.62E-07	7.16E-06
7	20/3/2007	20:01:00	90780	1367700	34.00	0.15	2.31E-07	7.39E-06



รูปที่ ข.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต G2P40 (ตัวอย่างที่ 1และ2) ที่อายุ 90 วัน

D_1	=	10.00	cm.
D_2	=	10.01	cm.
L_1	=	4.00	cm.
L_2	=	4.02	cm.

K_1	=	2.31E-13	m/sec
K_2	=	2.08E-13	m/sec
K_{avg}	=	**2.20E-13**	m/sec

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล นางสาววลัยลักษณ์ สาระจันทร์

วัน เดือน ปีเกิด 18 มกราคม 2525

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย พ.ศ. 2544

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2548

ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ วลัยลักษณ์ สาระจันทร์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูลย์, 2550, "ผลกระทบของความละเอียดและอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต", **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12**, 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน จ.พิษณุโลก, หน้า MAT55-MAT60

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 14 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2550

ข้าพเจ้า ~~นาย/นาง~~/นางสาว **วลัยลักษณ์ สาระจันทร์รหัสประจำตัว 48400321** เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับ ○ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ∅ ปริญญาโท ○ ปริญญาเอก หลักสูตร **วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต** สาขาวิชา **วิศวกรรมโยธา** คณะ **วิศวกรรมศาสตร์** อยู่บ้านเลขที่ **82** หมู่ **16** ตำบล **เหนือเมือง** อำเภอ **เมือง** จังหวัด **ร้อยเอ็ด** รหัสไปรษณีย์ **45000** เป็น "ผู้โอน" ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี **รศ.ดร. เอก ไชยสวัสดิ์** ตำแหน่ง **คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์** เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง **ผลกระทบของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต่ออัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต** ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ **ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล** อาจารย์ที่ปรึกษา ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

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

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....ผู้โอนสิทธิ
(นางสาววลัยลักษณ์ สาระจันทร์)

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

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

ลงชื่อ.....พยาน
(รศ.เอนก ศิริพานิชกร)