

ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อกำลังอัด
และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

EFFECTS OF USING RICE HUSK ASH FROM BIOMASS POWER
PLANT ON COMPRESSIVE STRENGTH AND WATER
PERMEABILITY OF CONCRETE



สุชีพ ศรีชู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของการใช้เก้าอี้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อกำลั้งอัด
และการซึ่มน้ำของคอนกรีต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบั้ณทิติ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะชองบุรี

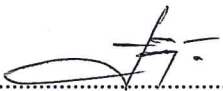
ปีการศึกษา 2559


ลิขสิธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะชองบุรี

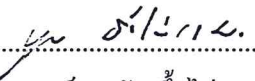
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อกำลังอัด
และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต
Effects of Using Rice Husk Ash from Biomass Power Plant on
Compressive Strength and Water Permeability of Concrete

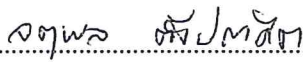
ชื่อ - นามสกุล นายสุชีพ ศรีชู
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

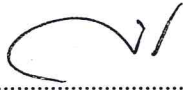

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศักดิ์ กร้ามาตร, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทชัย ชูศิลป์, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 2 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต
ชื่อ -นามสกุล	นายสุชีพ ศรีชู
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน ที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ ด้านกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

โดยใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที. ไอพาวเวอร์ จำกัด จ.พิจิตร มี 2 ขนาด คือ เถ้าแกลบไม่บด กับ เถ้าแกลบบดละเอียด แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 90 วัน

ผลการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบบดละเอียด สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้สูง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่มีการแทนที่ร้อยละ 10 ทั้งกรณีที่กำหนดค่าการไหลคงที่และที่กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน สำหรับคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐานมีค่าสูงกว่าการหล่อแบบธรรมดา ร้อยละ 48 สำหรับการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบไม่บด และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) ซึ่งการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และยังพบอีกว่าการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันจะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตลดลงโดยที่การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บดและคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P)

คำสำคัญ: เถ้าแกลบ กำลังอัด การซึมผ่านน้ำ การหล่อแบบอัดความดัน

Thesis Title	Effects of Using Rice Husk Ash from Biomass Power Plant on Compressive Strength and Water Permeability of Concrete
Name - Surname	Mr. Sucheep Srichoo
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Mr. Jatuphon Tangpagasit, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

This thesis aimed to study the effects of the using Rice Husk Ash (RHA) as partial replacement in cement on the compressive strength of motar, compressive strength and permeability of concrete under pressure mold.

Currently, there are 2 types of RHA from A.T. Biopower Co. Ltd. in Phichit province: a) Ground Rich Husk Ash (GRHA) and b) Unground Rice Husk Ash (URHA). These two types of RHA are mainly used to partially replace portland cement at 10% and 20% by weight of binder. The compressive strength of motar is determined based on its saturated stage at 3, 7, 28, 60 and 90-day duration. For the compressive strength of concrete on the other hand, it is determined at 7, 28, 60 and 90 days. Lastly, the permeability of concrete is determined at 28 and 90 days.

In this study, it was found that GRHA could produce highly pozzolanic reaction and the pozzolan materials passed the ASTM C 618 quality standard. The compressive strength of motar with control flow and control water-cementitious material ratio which were determined at the drying stage of 3, 7, 28, 60 and 90 days showed that the replacement of GRH in portland cement type I at the rate of 10% gave higher strength than standard motar. In terms of the development of compressive strength of standard concrete under pressure mold (CON-P), the result yielded compressive strength higher than the normal casting of 48% at 90 days duration. In the same manner, the replacement of GRH in concrete under pressure mold (GRH-P) gave higher strength of concrete than the concrete under pressure mold URH (URH-P) and CON-P. The replacement of GRH-P 20% by weight in portland cement could produce higher compressive strength than the replacement of GRH at 10%. It was also found that by using concrete casting pressure compressed, the water permeability decreased and the replacement of GRH-P 10% by weight in portland cement developed concrete with a lower permeability values than URH-P and CON-P.

Keywords: rice husk ash, compressive strength, permeability, pressure mold

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณการรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะ ในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร ดร.บุญชัย ฝั่งไผ่งาม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย ชูศิลป์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เอ.ที. ไบโอพาวเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้อง เพื่อนที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้อง หากการทำวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย



สุชีพ ศรีชู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	13
1.4 การดำเนินการศึกษา.....	14
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I).....	16
2.2 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ.....	16
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials).....	18
2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction).....	19
2.5 เถ้าแกลบ.....	20
2.6 สารลดน้ำพิเศษ.....	23
2.7 การอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect).....	24
2.8 วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Material).....	24
2.9 กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength).....	25
2.10 ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต (Permeability of Concrete).....	26
2.11 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	36
3.3 ขั้นตอนวิธีการศึกษา.....	38
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	48
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	48
4.2 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมถั่วแกลบ.....	51
4.3 คุณสมบัติคอนกรีตผสมถั่วแกลบ.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	94
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
บรรณานุกรม	96
ภาคผนวก	101
ภาคผนวก ก คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	102
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของมอร์ตาร์	108
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของคอนกรีต.....	115
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	160
ประวัติผู้เขียน.....	173

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ	21
ตารางที่ 2.2 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ	28
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน	29
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	39
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ	42
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบและทรายบด	49
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ	50
ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบและทรายบด	51
ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่	52
ตารางที่ 4.5 ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่	56
ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่	60
ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่	62
ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานคงที่	66
ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่	70
ตารางที่ 4.10 ค่าการยุบตัวและการเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	73
ตารางที่ 4.11 กำลังอัดประลัยและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ	74
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ	82

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อการซึมผ่านของ (ก)ซีเมนต์เพสต์ และ (ข)คอนกรีต.....	26
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาตรของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์.....	27
รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต.....	37
รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต.....	37
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต.....	44
รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำ.....	46
รูปที่ 3.5 การหล่ออีพอกซี.....	46
รูปที่ 3.6 การประกอบตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับชุดทดสอบ.....	47
รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดทดสอบกับเครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ.....	47
รูปที่ 4.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	53
รูปที่ 4.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	53
รูปที่ 4.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมทรายบดร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	55
รูปที่ 4.4 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	57
รูปที่ 4.5 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	58
รูปที่ 4.6 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	59
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	63
รูปที่ 4.9 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	64
รูปที่ 4.10 กำลังอัดมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	65
รูปที่ 4.11 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	67
รูปที่ 4.12 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	68
รูปที่ 4.13 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	69
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่.....	71
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (URH)	76
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (GRH)	77
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) กับกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน	78
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน	79
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10	80
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20	81
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	83

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (URH) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	84
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (GRH) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	85
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้แบบหล่อธรรมดา.....	86
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน	86
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตมาตรฐาน	87
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH)	89
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (GRH)	89
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH)	90
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (GRH)	91
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) ในอัตราร้อยละ 10	92
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของ คอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) ในอัตราร้อยละ 20	93

บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำแนวคิดเรื่องคอนกรีตสีเขียว (Green Concrete) มาใช้กันมากขึ้น โดยเป็นการนำคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุเหลือใช้หรือวัสดุจากธรรมชาติมาผสมในคอนกรีตเพื่อช่วยลดปัญหาหรือช่วยให้ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและอาจจะช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีให้กับคอนกรีตได้ อย่างไม่น่าเชื่อ การที่นำวัสดุเหลือใช้มาผสมลงในคอนกรีตจะเป็นการช่วยลดปริมาณขยะอันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยลงได้ ซึ่งคอนกรีตสีเขียวแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบหลักๆ ได้แก่ คอนกรีตผสมของเสียหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม คอนกรีตที่ผสมจากมวลรวมที่ถูกใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่และคอนกรีตผสมวัสดุเนื้อที่สามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต [1] การนำวัสดุเหลือทิ้ง จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตโดยการนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ใช้ทำคอนกรีต โดยที่คอนกรีตยังคงคุณสมบัติไม่ต่างจากเดิมหรือมีสมบัติดีกว่าเดิม [2] ทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงและยังเป็นการช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

จากพื้นฐานของประเทศไทยที่เป็นเกษตรกรรมมีข้าว เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก ซึ่งแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกก็เป็นวัตถุดิบสำคัญในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล แกลบที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นซิลิกา (Silica) สูง เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์โดยให้กำลังอัดที่เท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์ปกติ ที่มีปริมาณการใช้ไม่เกินร้อยละ 20 [3, 4]

นอกจากการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังมีการศึกษาวิจัยในด้านการพัฒนาคอนกรีตให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลงซึ่งก็เป็นแนวทางในการลดปัญหาทางด้านมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย โดยมีการศึกษาการหล่อคอนกรีตภายใต้แบบอัดความดันสามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยไม่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น หมายความว่า ถ้าใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่าเดิมการใช้แบบหล่ออัดความดันจะสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ [5] จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดัน

และการใช้เสาแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ร่วมกันจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปได้มีการพัฒนาระบบการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยอุตสาหกรรมผลิตเสาเข็มกลมแรงเหวี่ยงอัดแรง (Spun Pile) ซึ่งเป็นรูปแบบการผลิตใช้กรรมวิธีการปั่นคอนกรีตในแบบหล่อที่หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยวิธีธรรมดา [6]

จากแนวคิดดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ซึ่งมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มทางเลือกในการผลิตคอนกรีตที่มีการพัฒนาวิธีการหล่อโดยใช้แบบหล่ออัดความดันและการใช้เสาแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำให้ลดต้นทุนการผลิตและลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก โดยจะทำการศึกษาคูสมบัติของเสาแกลบ ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ผลกระทบของการใช้เสาแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดันที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเสาแกลบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาค่ากำลังอัด ค่าดัชนีกำลังและผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ผสมเสาแกลบ

1.2.2 เพื่อทดสอบกำลังอัดประลัยและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเสาแกลบภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเสาแกลบต่อสมบัติกำลังอัดประลัยและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุเบื้องต้น คือ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด องค์กรประกอบทางเคมี และ ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

1.3.2 ตัวอย่างมอร์ตาร์ ใช้สำหรับการทดสอบค่ากำลังอัด โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์กำหนดให้ปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75

- 2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน งานวิจัยนี้ทำการศึกษา 2 กรณี
 - ก. กรณีที่ 1 กำหนดให้ค่าการไหลคงที่ เท่ากับ 110 ± 5
 - ข. กรณีที่ 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ เท่ากับ 0.485
- 3) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและทรายบด กำหนดอัตราการแทนที่ ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะไม่พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์
- 4) ชนิดของเถ้าแกลบ จากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท เอ.ที โป โอปาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร มี 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH)
- 5) ทรายบด มี 2 ชนิด คือ มีขนาดอนุภาคเท่ากับเถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด
- 6) ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน

1.3.3 ตัวอย่างคอนกรีต ใช้สำหรับการทดสอบสมบัติของคอนกรีต คือ กำลังอัดประสิทธิภาพซึมผ่านน้ำของคอนกรีต โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ กำหนดอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะไม่พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์
- 2) ชนิดของเถ้าแกลบ จากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท เอ.ที โป โอปาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร มี 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH)
- 3) การหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะใช้แบบหล่อธรรมดาและแบบหล่ออัดความดัน
- 4) ทดสอบกำลังอัดประลัย ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน
- 5) ทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 90 วัน

1.4 การดำเนินการศึกษา

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดแผนการทำวิจัย ดังนี้

1.4.1 จัดเตรียมวัสดุเถ้าแกลบไม่บด เถ้าแกลบบด และทรายบด

1.4.2 ทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบไม่บด เถ้าแกลบบด และทรายบด

1.4.3 ทดสอบซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าแกลบและใช้ทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

1.4.4 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ตามวิธีการของสถาบันอเมริกัน (ACI)

1.4.5 ทดสอบคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

1.4.6 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์สรุป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบค่ากำลังอัด ค่าดัชนีกำลังและผลการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบ

1.5.2 ทราบค่ากำลังอัดประลัยและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้ากลบ

1.5.3 ทราบผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้ากลบต่อสมบัติด้านกำลังอัดประลัยและการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

1.5.4 เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตโดยลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงจากการใช้เถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าแกลบ สารผสมเพิ่ม สารลดน้ำพิเศษ การอัดตัวของอนุภาค กำลังต้านทานแรงอัด และความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต ตลอดจนการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาตำรา เอกสาร วารสาร และงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I)

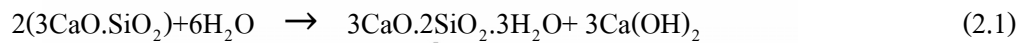
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเหล็กแล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกันซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตมาตรฐานอเมริกา (ASTM C.150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก.15 ของไทย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตก้อนอิฐอุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง

2.2 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

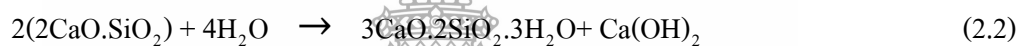
2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1



2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตแต่จะได้ผลิตภัณฑ์เหมือนกัน คือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2



2.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3



เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของเอตริงไจท์ (Ettringite : $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}\cdot\text{SO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4



2.2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่าและมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของแอสทริทท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยาลดลงและเฟสที่มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึกและปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้นตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอสทริทท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต และเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซัลเฟตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.3.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และ ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) มีรายละเอียด ดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ภูเขาไฟ (Volcanic ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) เกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน [7] เกิดขึ้นหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วเพราะ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำปฏิกิริยารวมกับ SiO_2 ที่มีอยู่แล้วในถ่านหินทำให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตและ Ca(OH)_2 และอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 จะได้สารแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7



สารประกอบทั้ง 2 ตัว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่ดีขึ้นเมื่อรวมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดก่อนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จะทำให้ได้ค่าการอัดตัวรวมของซีเมนต์เพสต์

ปฏิกิริยาปอซโซลาน [7] เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอิสระเพราะต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ASTM C618 [8] ให้นิยามสารปอซโซลาน หมายถึง สารซิลิเซียสหรือสารอลูมิโน-ซิลิเซียส ซึ่งโดยทั่วไปสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน

น้อยมากหรือไม่มีเลยแต่ในกรณีที่มีสารปอซโซลานมีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิปกติกับด่างอัลคาไลด์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของ มอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์ควบคุมและกำหนดให้ขนาดของวัสดุปอซโซลานมีน้ำหนัก ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485

2.5 เถ้าแกลบ [3]

ข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญมาก ในปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ทั่วโลก ประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุด มีกำลังการผลิตข้าวปีละ ประมาณ 25 ล้านตัน ในปีหนึ่งๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตัน (1000 กิโลกรัม) ของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัมและเมื่อนำแกลบไปเผา จะได้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กิโลกรัม เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกา (Silica) สูง จึงเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่เหมาะสม สำหรับการนำมาพัฒนาทำเป็นวัสดุปอซโซลาน

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี SiO_2 สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ทำนองเดียวกัน บूरจักร และฟิซซ์, บूरจักร และเชดพงค์, และ สโตรโรจน์ และคณะ พบว่า เถ้าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36 และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณ ร้อยละ 2 - 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่ สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านคุดน้ำสูงและ ถ้ามียังจำนวนมาก จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

สารประกอบ	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO ₂	86.9-97.3	88.33	89.95
K ₂ O	0.6-2.5	2.76	1.49
Na ₂ O	0-1.5	0.15	0.07
CaO	0.2-1.5	0.52	0.5
MgO	0.12-1.96	0.28	0.23
Fe ₂ O ₃	0-0.6	3.37	1.89
P ₂ O ₅	0.2-2.9	NA	NA
SO ₃	0.1-1.1	0.12	0.02
Cl	0-0.4	NA	NA
Al ₂ O ₃	NA	0.48	0.54
LOI	NA	3.71	4.70

2.5.2 คุณสมบัติของเถ้าแกลบ

2.5.2.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา เถ้าแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ไม่เผาไหม้ไม่หมดและคาร์บอนปนอยู่มากและจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะเถ้าแกลบที่เผาไหม้ก่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9 - 2.3 และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มเป็น 2.20 และ 2.30 ที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 °C ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนลดน้อยลง

2.5.2.2 ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ

ความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบสามารถวัดได้โดยการทดสอบค่าดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C 311 [9] โดยใช้การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าดัชนีกำลังคือค่ากำลังที่ทดสอบได้เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของมอร์ต้าร์

ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน หากค่าดัชนีกำลังมีค่าสูงแสดงถึงความเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีของ
เถ้าแกลบ

2.5.3 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตสด

การที่เถ้าแกลบมีรูพรุนสูงมากและรูปร่างที่ไม่แน่นอนทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสม
ของเถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การที่เถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้
กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เพื่อแก้ไขปัญหาจึงนำเถ้าแกลบมาบดให้ละเอียดขึ้นซึ่งจะทำลาย
รูพรุนของเถ้าแกลบได้และใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เท่าเดิมและมีความสามารถในการเทตามต้องการเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์
ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวต้นจะเพิ่มขึ้น
ไม่มากนัก แต่ระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเถ้าแกลบทำให้การเข้มน้ำของคอนกรีต
ลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้แกลบผสมร่วมกับวัสดุปอชโซลานอื่น
เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีคุณสมบัติดีขึ้น

2.5.4 คุณสมบัติกำลังรับแรงของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่อายุต้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าแกลบ
เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงจะทำให้กำลังในระยะต้นสูงเนื่องจากความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา
ส่วนเถ้าแกลบซึ่งได้จากการเผาแกลบโดยตรงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำเพราะมีขนาดใหญ่และ
ดูดน้ำมาก เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอชโซลานดังนั้นต้องใช้ต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์
มาทำปฏิกิริยาจึงทำให้กำลังในช่วงอายุต้นต่ำ แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ
สามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบได้ โดยเฉพาะกรณีที่เถ้าแกลบมีความละเอียดสูง เช่น
การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดซึ่งมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์
เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูง โดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสามารถในการเท พบว่าในช่วงอายุต้น
(3 ถึง 7 วัน) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่เมื่ออายุ 28 และ
56 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การ
แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่านี้จะให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลาย

การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด โดยกำลังอัด
ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูง ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์
ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไป
ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ

2.6 สารลดน้ำพิเศษ [3]

สารลดน้ำพิเศษหรือเรียกอย่างหนึ่งว่า “ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์” สามารถลดน้ำในปริมาณที่มากกว่าสารลดน้ำธรรมดา แต่เนื่องจากมีราคาแพงจึงใช้เฉพาะงานคอนกรีตที่สำคัญและต้องการคุณสมบัติพิเศษ

วัสดุที่ใช้ทำเป็นซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

- 1) ซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต
(Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates)
- 2) ซัลโฟเนตแนพทาไลน์ฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต
(Sulfonated naphthalene Formaldehyde Condensates)
- 3) โมดิฟายด์ลิกโนซัลโฟเนต (Modified Lignosulfonates)
- 4) สารลดน้ำพิเศษอื่น เช่น กรดซัลโฟนิคเอสเทอร์และคาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์
(Sulfonic Acid Esters and Carbohydrate Esters)

สารลดน้ำ 2 กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่ใช้กันค่อนข้างมาก ซึ่งเรียกว่าซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ กลุ่มเมลามีนและกลุ่มแนพทาไลน์ สารลดน้ำพิเศษเป็นโพลีเมอร์ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ตามกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน ทำให้ได้โมเลกุลที่ยาวและมีมวลสูงเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และแนพทาไลน์ฟอร์มัลดีไฮด์ มีโมเลกุลของสารลิกโนซัลโฟเนตเป็นองค์ประกอบหลักของการลดน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตได้จำนวนมากมีความคล้ายกับกรณีของการใช้สารลดน้ำธรรมดา แต่ไม่มีผลกระทบต่อความตึงผิวของน้ำมากนัก ดังนั้นจึงเกิดฟองอากาศในส่วนผสมค่อนข้างน้อยทำให้สามารถใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สูงได้มาตรฐาน ASTM C494 [10] จัดสารลดน้ำพิเศษอยู่ในประเภท F และสารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัวในประเภท G

การใช้งานของสารลดน้ำพิเศษโดยทั่วไปนิยมใช้ 2 กรณี คือ เพิ่มความสามารถในการเทหรือทำคอนกรีตไหลและทำคอนกรีตกำลังสูง

โดยทั่วไปสารลดน้ำพิเศษที่เป็นของเหลวจะมีน้ำผสมอยู่ประมาณร้อยละ 50-60 และมีวัสดุที่ใช้ในการลดน้ำอยู่ร้อยละ 40 - 50 ในการคำนวณปริมาณน้ำจะต้องไม่ลืมคิดปริมาณน้ำที่อยู่ในสารลดน้ำพิเศษ ในการเพิ่มความสามารถในการเทของคอนกรีตควรใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ 1 ถึง 3 ลิตรต่อคอนกรีต 1 m³ และในการทำคอนกรีตกำลังสูงจะใช้สารลดน้ำพิเศษมากขึ้นคือ 5 ถึง 20 ลิตรต่อคอนกรีต 1 m³ สารลดน้ำพิเศษสามารถใช้ทำคอนกรีตไหลได้ซึ่งมีค่ายุบตัวอย่างน้อย 19 cm ขึ้นไปและไม่เกิดการแยกตัว การเติมน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้มีค่ายุบตัวสูงชันมากเช่นนี้จะทำ

ให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวได้ง่าย สารลดน้ำพิเศษสามารถใช้ทำคอนกรีตไหลโดยทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นมากและสามารถไหลได้โดยไม่เกิดการแยกตัว

การใช้สารลดน้ำพิเศษไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการคืบ การหดตัว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและความสามารถในการต้านทานสภาวะของการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน การใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น เป็นผลให้ความต้านต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตดีขึ้น

2.7 การอัดตัวของอนุภาค (Packing Effect)

การอัดตัวของอนุภาคเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการที่ขนาดของอนุภาคมีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น โดยที่ค่าการอัดตัวของอนุภาคเกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างหรือในช่องอากาศระหว่างอนุภาคที่ใหญ่กว่าที่มีอยู่ในคอนกรีต [11] ซึ่งเป็นการทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นได้ Larrard และ Sedran [12] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้ทรายขนาดละเอียดจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้น ในการที่จะหาค่าการอัดตัวของอนุภาคจะต้องใช้วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อการพัฒนากำลังมาใช้เพื่อที่จะได้ค่าการอัดตัวของอนุภาคที่แท้จริง โดยการใช้วัสดุที่มีขนาดที่เท่ากันทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของอนุภาคระหว่างวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานเพื่อหาความแตกต่างกันของค่ากำลังอัดจะทำให้ทราบถึงค่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่ไม่มีผลกระทบจากค่าการอัดตัวของอนุภาค วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นวัสดุที่เป็นผลึกซึ่งความเป็นผลึกจะทําให้อนุภาคไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เรียกวัดชนิดนี้ว่า วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง

2.8 วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Material)

วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างเป็นตัววัดสิ่งแปลกปลอมในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัตถุคืบที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และสารที่เจือปนมากับขี้บข้มในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ปูนซีเมนต์เพสต์มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อมีปริมาณวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างมากขึ้น [11] ในปี 2535 ปานเทพ และ คณะ [13] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ จากการศึกษาได้ใช้ดินเผาละเอียดนำมาทำการแยกและล้างตามขบวนการทางเคมี ซึ่งจะได้กากขึ้นมาเรียกว่า กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) โดยการนำไปแทนที่ในปูนซีเมนต์ ผลที่ได้พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จะลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณของกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่ากากที่ไม่ละลาย

ในกรดและด่าง ไม่มีผลทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงตามปริมาณกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างที่เพิ่มขึ้น และในปี 2536 ไมตรี และ คณะ [14] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการใส่ทรายบดละเอียดที่มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์เป็นกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ผลที่ได้คือค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ซึ่งแสดงว่ากากทรายไม่มีผลทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นแต่จะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลงจากการวิจัยทั้ง 2 แบบ จะพบว่าวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการแทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังอัดเพื่อหาค่าการอัดตัวของอนุภาคได้เนื่องจากวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้เกิดค่ากำลังอัดเหมือนเถ้าแกลบที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งในการนำไปแทนที่ในปูนซีเมนต์โดยใช้ขนาดที่มีความใกล้เคียงกับเถ้าแกลบในปริมาณที่เท่ากันจะทำให้ได้ค่าความแตกต่างของกำลังอัด ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันของค่ากำลังอัดระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลานกับค่าการอัดตัวของอนุภาค

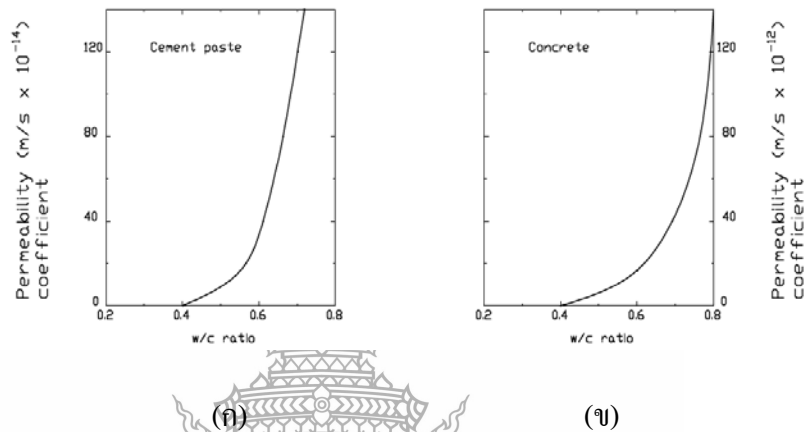
2.9 กำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength)

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต เป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงคุณสมบัติอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี เพราะค่ากำลังต้านทานหรือรับแรงแบบอื่นเป็นส่วนกำลังต้านทานแรงอัด และด้วยเหตุที่คอนกรีตมีกำลังต้านทานต่อแรงอัดมากกว่ากำลังต้านทานต่อแรงดึงหลายเท่า ดังนั้น ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงออกแบบโดยพิจารณาให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดเพียงอย่างเดียว ส่วนแรงดึงที่เกิดขึ้นให้เหล็กเสริมซึ่งหล่ออยู่ในคอนกรีตทำหน้าที่ต้านทาน

การทดสอบหาลำดับกำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต ทำได้โดยการกดหรืออัดแท่งทดสอบมาตรฐาน (รูปทรงกระบอก หรือรูปลูกบาศก์) ซึ่งบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนด ด้วยเครื่องทดสอบตามวิธีการมาตรฐานจนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก น้ำหนักกดหรืออัดสูงสุดที่ได้ เมื่อหารด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรง จะเป็นค่าความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตนั้น ค่ากำลังต้านทานต่อแรงอัดนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสม ปริมาณน้ำ อายุของแท่งทดสอบ การบ่ม ตลอดจนรูปร่างและขนาดของแท่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

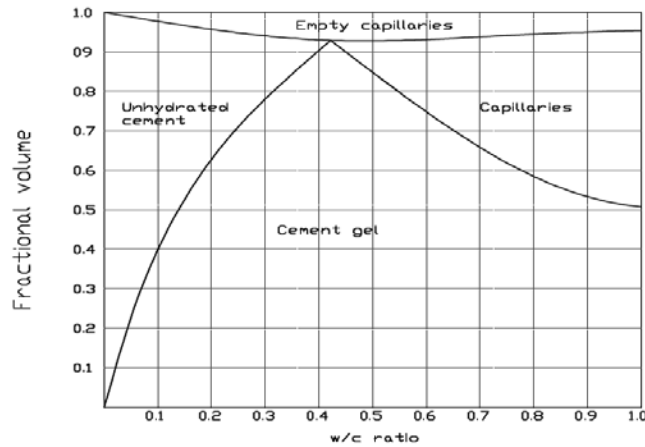
2.10 ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต (Permeability of Concrete)

ตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดต่อความคงทนของคอนกรีตคือ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c Ratio) โดยที่หากคอนกรีตมีค่า w/c Ratio ลดลงคอนกรีตจะมีความหนาแน่นตัวมากขึ้นหรือที่บ่งชี้ว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [15]



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของ w/c Ratio ที่มีต่อการซึมผ่านของ (ก) ซีเมนต์เพสต์ และ (ข) คอนกรีต [15]

กลไกการซึมผ่านของคอนกรีตคือการซึมของสารผ่านรูพรุนหรือรอยร้าวในเนื้อซีเมนต์เพสต์ โดยปกติในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะมีรูพรุน 2 ประเภทเป็นหลักคือรูพรุนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าช่องว่างคาร์ปิลารี (Capillary Pore) และรูพรุนขนาดเล็กที่เรียกว่าช่องว่างในเจล (Gel Pore) การซึมผ่านจะเกิดโดยการซึมผ่านรูพรุนขนาดใหญ่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นหลักมากกว่าการซึมผ่านรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยนั้นจะแปรผันตามค่า w/c Ratio ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ค่า w/c Ratio มากกว่า 0.42 นอกจากนี้ ค่า w/c Ratio ที่ลดลง และทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นยังมีผลตามมาคือทำให้ความสามารถในการต้านทานรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตสูงขึ้นด้วยจึงเป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีตเช่นกัน [15]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ [15]

จากที่ได้กล่าวมาความพรุนในเนื้อคอนกรีตจะเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีต จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการซึมผ่านยังอาจเกิดได้มากขึ้นหากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมในเนื้อคอนกรีตเกิดรอยร้าวขึ้น ในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงการซึมผ่านของน้ำเป็นหลักซึ่งมีผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้าง โดยเฉพาะ โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องใช้ในการกักเก็บน้ำเป็นต้น เมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติด้านนี้ในวงการก่อสร้างมักจะกล่าวถึงในรูปของความทึบน้ำ (Watertightness) ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกับความสามารถในการต้านการซึมผ่านของน้ำ (Impermeability)

การหาค่าความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำสามารถหาได้โดยการคำนวณจากกฎของ Dary's law ดังสมการที่ 2.5

$$V = K_p (h/x) \quad (2.5)$$

- โดย
- V = อัตราการไหลของน้ำ
 - h = แรงดันของน้ำ (Hydraulic Pressure)
 - x = ความหนาของตัวอย่างที่น้ำไหลผ่าน
 - K_p = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

โดยค่า K_p มีค่าไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กับ w/c Ratio และอายุซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงตารางที่ 2.2 และโดยทั่วไปการซึมผ่านของสารจำพวกก๊าซจะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าน้ำประมาณ 10 ถึง 100 เท่า [15]

ตารางที่ 2.2 อิทธิพลของอายุของซีเมนต์เพสต์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (w/c Ratio = 0.51)

Coefficient w/c = 0.51

Age (days)	K_p (m/s)	
Fresh paste	10^{-5}	Independent of w/c
1	10^{-8}	
3	10^{-9}	Capillary pores interconnected
4	10^{-10}	
7	10^{-11}	
14	10^{-12}	
28	10^{-13}	Capillary pores discontinuous
100	10^{-16}	
240 (maximum hydration)	10^{-18}	

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์นั้นปกติมีค่าต่ำมาก ถึงแม้ว่าจะมีความพรุนมากก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ซึ่งจะเข้าไปอุดรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ให้รูพรุนที่มีอยู่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขที่มีการบ่มอย่างต่อเนื่องของคอนกรีตจึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อความสามารถในการซึมผ่านคือยิ่งคอนกรีตมีอายุมากจะยังมีจำนวนรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกันมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [15]

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาที่ต้องการในการบ่มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกัน [15]

w/c Ratio	Curing Time (days)
0.4	3
0.45	7
0.5	28
0.6	180 (6 months)
0.7	365 (1 year)
> 0.7	Not possible

เมื่อก้าวถึงความสามารถในการซึมผ่านการผสมสารจำพวกสารกระจายแก๊งฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) ก็มีผลต่อคุณสมบัตินี้เช่นกัน กล่าวคือ ปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณสมบัตินี้ในทางตรงกันข้ามการผสมสารจำพวกนี้มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีการเชื่อมและการแยกตัวน้อยลงรวมทั้งความต้องการน้ำในส่วนผสมก็น้อยลงด้วยซึ่งล้วนเป็นผลดีต่อคุณสมบัติในด้านนี้ ดังนั้นหากพิจารณาผลทั้งหมดพบว่าการใส่สารจำพวกนี้มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านนี้โดยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ดีขึ้น [15]

การผสมสารผสมเพิ่มจำพวกแร่ธาตุ (Mineral Admixture) เช่น ซิลิกาฟูมก็มีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้นเช่นกัน โดยสารผสมเพิ่มชนิดนี้เป็นวัสดุผงละเอียดได้จากกระบวนการผลิต โลหะซิลิกอนหรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยส์ (Ferro-Silicon Alloy) เป็นผงความละเอียดสูงมาก(ขนาดเล็กกว่าผงปูนซีเมนต์ประมาณ 70 ถึง 100 เท่า) ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนกว่าร้อยละ 90 ทำปฏิกิริยาเร็วมาก ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงลดการเชื่อมและการแยกตัวทำให้ความทึบน้ำสูงเนื่องจากมีอนุภาคเล็กจึงสามารถอุดช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อคอนกรีตได้รวมทั้งด้วยคุณสมบัติที่เป็นสารปอซโซลานจึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลลัพท์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และให้ CSH ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังรวมทั้งยังเป็นตัวอุดช่องว่างระหว่างรูพรุนในเนื้อคอนกรีตดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ข้อดีของการใช้ซิลิกาฟูม คือความสามารถในการทำงานไม่คืนน้ำ ดังนั้นจึงต้องใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ในการทำคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) สารชนิดนี้มีทั้งชนิดเป็นผงและชนิดของเหลวซึ่งได้จากการผสมร่วมกับน้ำในอัตราส่วน 50:50 อัตราการใช้ประมาณ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [16]

2.11 งานวิจัยที่ผ่านมา

จตุพล ตั้งปกาศิตและคณะ [2] ได้ศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยทำการบดวัสดุปอซโซลานและทรายให้มีขนาดใกล้เคียงกันสามขนาด คือมีน้ำหนักที่ต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 , 13.5 ± 2 (ซึ่งเป็นน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการศึกษาต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5) และ 34 ± 2 และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายบดละเอียดที่มีน้ำหนักที่ต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 และ 34 ± 2 ทำให้มีค่าดัชนีกำลังที่เกิดขึ้นจากการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 และลดลงร้อยละ 3 ตามลำดับ ส่วนค่าดัชนีกำลังที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยทรายบดละเอียดร้อยละ 20 ซึ่งมีน้ำหนักต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 80 สำหรับค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคต่างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 11 และ 5 ที่อายุ 3 วัน ร้อยละ 20 และ 18 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 และ 23 ที่อายุ 90 วัน

สุกฤษ มณีรัตน์และคณะ [5] ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่ออัดความดันเพื่อเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ตามวิธี ACI ให้มีกำลังอัดเท่ากับ 200, 300 และ 400 kg/cm^2 ที่อายุ 28 วัน โดยใช้แบบหล่อธรรมดาและแบบหล่ออัดความดัน ขนาดของตัวอย่างคอนกรีต $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ ทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่ออัดความดันมีกำลังอัดมากกว่าที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาที่อายุ 28 วัน ร้อยละ 17 สำหรับการออกแบบกำลังอัดที่ 200 kg/cm^2 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 เมื่อมีกำลังอัดเป็น 300 kg/cm^2 และร้อยละ 24 เมื่อออกแบบกำลังอัดที่ 400 kg/cm^2 โดยเมื่อออกแบบกำลังอัดมากขึ้น คอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่ออัดความดันมีแนวโน้มกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดามากยิ่งขึ้น

บุรฉัตร ฉัตรวีระและวัชรการ วงศ์คำจันทร์ [17] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด พบว่า เถ้าแกลบละเอียดมีการทำปฏิกิริยาปอซโซนิคสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ในคอนกรีตได้ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขนาดอนุภาค 44 ไมโครเมตร สำหรับส่วนผสมเดียวกันพบว่าหน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

ละเอียดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ w/b เท่ากับ 0.5 และ 0.6 สำหรับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย
เถ้าแกลบร้อยละ 20 โมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดพบว่าต่ำกว่าคอนกรีต
ธรรมดาเล็กน้อย อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียดต่ำกว่าคอนกรีต
ธรรมดาในทุกส่วนผสม

ณัฐพงษ์ ลาตบัตร์ และคณะ [18] ได้ศึกษาทดลองพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่
ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (200 300 และ 400 °C) โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการซึม
ของน้ำผ่านคอนกรีต ผลจากการทดลองพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้า
แกลบมีค่ามากขึ้นและมากกว่าคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติและหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ
ต่างๆค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อัตราการแทนที่
ร้อยละ 10 พบว่ามีค่าการซึมผ่านน้ำน้อยที่สุดและมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติและ
เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น

Zhang และคณะ [19] ใช้เถ้าแกลบขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7 ไมโครเมตร และซิลิกาฟุ่มเป็น
ส่วนผสมในคอนกรีต โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
เพื่อศึกษาโครงสร้างโพรงเถ้าแกลบสามารถลดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเพสต์ และมวลรวม
ได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว

Isaia และคณะ [20] ทำการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานและผลของการจัดตัวของอนุภาค
โดยใช้เถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมในคอนกรีตจากผลการทดลอง พบว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน
และผลของการอัดตัวของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น และผลการจัดตัวของอนุภาคมีผลกระทบต่อกำลังอัด
ของคอนกรีตมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน

A. Goldman และ A. Bentur [21] ใช้คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มและคาร์บอนแบล็ค
เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่ม พบว่า การอัดตัวของอนุภาคมีผลอย่างมากต่อ
กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม ซึ่งเมื่อทำการร่อนคอนกรีตโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเพื่อ
ทำเพสต์เมทริกซ์ (Paste-Matrix) ปรากฏว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มจะให้กำลังอัดมากกว่าเพสต์เมทริกซ์
ส่วนคอนกรีตที่ไม่มีซิลิกาฟุ่มจะมีกำลังอัดต่ำกว่าเพสต์เมทริกซ์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการอัดตัวของ
อนุภาคที่มีขนาดเล็กของซิลิกาฟุ่มจะทำให้บริเวณที่เป็นรอยต่อของเพสต์และมวลรวมแน่นตัวขึ้น
ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น

เรืองรุชดี และคณะ [22] ได้ศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยา
ปอซโซลานและการอัดตัวของอนุภาคที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแม่เมาะในรูปของดัชนีกำลัง โดย
ใช้วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและค่าที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหินแม่เมาะแต่ไม่ทำปฏิกิริยา

ทางเคมี และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าในช่วง 3-28 วัน ความแตกต่างระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 2.7 และ 160 ไมโครเมตร เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และที่อายุ 90 วัน พบว่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นมากกว่าการอัดตัวของอนุภาคเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาค 2.7 ไมโครเมตร

R. Cheerarat และคณะ (2004) [23] ทำการศึกษากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 19.4, 13.8 และ 6.3 ไมโครเมตร โดยใช้ทรายบดที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งมีขนาดเท่ากับ 20.6, 11.7 และ 6.4 ไมโครเมตร และที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อายุต้นๆ กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเพียงเล็กน้อย แต่เมื่ออายุของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจะมีค่าสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะขนาดอนุภาคเท่ากับ 6.3 ไมโครเมตรในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะสามารถให้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 90 วันมากกว่าร้อยละ 50 ของกำลังอัดของมอร์ตาร์

Detwiler และ Mehta [24] ใช้คาร์บอนแบล็คที่มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับซิลิกาฟูมทั้งขนาดและรูปร่าง แต่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ทดแทนซิลิกาฟูม เพื่อหาผลกระทบทางกายภาพ (Physical Effect) และผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Effect) ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม ซึ่งพบว่าที่อายุ 7 วัน อิทธิพลของกำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูมมาจากผลกระทบทางกายภาพ ซึ่งก็คือผลของการอัดตัวของอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูม

นายรัฐพล สมณา [25] ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งผลิตต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ นำเถ้าถ่านหินแต่ละแห่งมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลมตันผิวเรียบ สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แต่ถ้าเถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระมีเหลี่ยมมุม และมีรูพรุน ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

สมิตร ส่งพิริยะกิจ [26] ได้ศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ก่อตัวภายใต้แรงดันปกติและก่อตัวภายใต้แรงดันสูง คอนกรีตที่ใช่จะถูกออกแบบโดยวิธีที่แนะนำโดย ACI และใช้ค่า w/c เท่ากับ 0.5 หล่อเป็นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ภายหลังจากที่เทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว คอนกรีตจะถูกนำไปกดทับทันทีด้วยน้ำหนักที่เทียบเท่ากับน้ำหนัก

คอนกรีตที่สูง 50 และ 80 m กล่าวคือที่แรงดันกดทับ 120 และ 192 T/m² ตามลำดับ ในระหว่างการทดสอบเครื่องมือจะยอมให้ซีเมนต์เพสต์ไหลออกจากแบบหล่อได้ทิศทางเดียวคือไหลย้อนขึ้นสวนทางกับน้ำหนักกดทับ น้ำหนักกดทับจะถูกคงที่ไว้จนถึงวันที่ทดสอบ คือที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อมีแรงดันกดทับ 120 และ 192 T/m² กระทำส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยร้อยละ 21.08 และ 39.86 ตามลำดับ ของคอนกรีตมาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ก่อตัวภายใต้แรงดันสูงมีแนวโน้มที่จะมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตในสภาวะปกติ

สหลาก หอมวุฒิวงศ์ [27] ได้เสนอวิธีการวัดค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตโดยอาศัยหลักการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law) ซึ่งสามารถวัดค่าการไหลของน้ำผ่านคอนกรีตได้โดยตรง โดยปกติค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 10^{-12} ถึง 10^{-14} m/s ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้แก่ กำลังของคอนกรีต ปริมาณน้ำในส่วนผสม ปริมาณซีเมนต์เพสต์ ขนาดและสัดส่วนคละของมวลรวม สารผสมเพิ่ม วัสดุปอซโซลานและกรรมวิธีผลิตคอนกรีต

กิริติกร เจริญพร้อม และวิเชียร ชาลี [28] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต (k) และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Dc) ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปีโดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 (เป็นส่วนผสมเดียวกับกลุ่มที่แช่ในน้ำทะเล) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm สำหรับทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ตลอดจนทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปีเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วันมีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ส่วนสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วันเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ นอกจากนี้พบว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลงโดยส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

รัฐพล สมณา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล [29] ได้ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นของที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม

หยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 350 kg/cm^2 ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าแทนหินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าและใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความทนน้ำและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูงคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจนโดยความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

สุวัฒน์ รามจันทร์ และคณะ [30] ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่อกำลังอัด การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.4 และ 0.5 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 5 - 10 cm ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์ม จังหวัดชุมพร บดให้มีน้ำหนักกึ่งบนตะแกรง 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 จนถึงอายุ 90 วัน ผลการศึกษา พบว่า การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง ค่าการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตไม่แตกต่างกันมากนักและยังพบอีกว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดผสมในคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้นและมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมยังมีการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นการแทรกซึมของคลอไรด์ยังมีค่าลดลง

จตุพล ตั้งปกาศิต และคณะ [31] ได้ศึกษาผลกระทบของการอัดตัวอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดซึ่งมีความเป็นผลึกสูงและไม่เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้แม่น้ำบดละเอียดที่มีความละเอียด 3 ขนาด คือมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 2 , 13.5 ± 2 (ปริมาณข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 13.5) และ 34 ± 2 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำที่มีความละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง โดยอัตราการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่ากับร้อยละ 87, 81, 72 และ 57 ของมอร์ตาร์ควบคุมสำหรับกำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด หากทรายแม่น้ำบดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวสูงขึ้นในทางตรงกันข้ามการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัด เนื่องจากการอัดตัวต่ำลง การใช้ทรายแม่น้ำบด ซึ่งมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 และร้อยละ 5.8 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า กำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคแตกต่างกัน ร้อยละ 6 และมีแนวโน้มของความแตกต่างของกำลังเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความละเอียดของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า ข้อกำหนดของ ASTM C 618 ที่กำหนดให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 ต้องมีดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน อาจไม่เหมาะสมเพราะทรายแม่น้ำบดละเอียดซึ่งไม่ได้เป็นวัสดุปอซโซลาน แต่เมื่อมีความละเอียดสูงจะผ่านข้อกำหนดได้ โดยเฉพาะการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 33.8 มีดัชนีกำลังที่สูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล [32] วิธีการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐานส่วนผสมของมอร์ตาร์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนักใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485 (สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกประเภท โดยการใช้ทรายออกตาจะมีค่าอัตราการไหลอยู่ในช่วง 105 - 115 แต่ถ้าใช้ทรายอื่นๆ ค่าอัตราการไหลที่ได้จะต่ำกว่า 105 - 115 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ทรายที่ไม่ได้เป็นไปตามมาตรฐานมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำและค่าการไหลของมอร์ตาร์

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาทั้งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485 และกำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหล 110 ± 5

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึงขั้นตอนในการศึกษาแต่ละขั้นตอน โดยแสดงถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนในการทดสอบ ซึ่งแยกเป็นรายละเอียด ดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2532

3.1.2 เถ้าแกลบ ใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัท เอ.ที. ไซโอพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร มี 2 ขนาด คือ เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH)

3.1.3 สารลดน้ำพิเศษ

3.1.4 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.1.5 หิน ใช้หินที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 mm

3.1.6 น้ำ ใช้น้ำประปา

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 แบบหล่ออัดความดัน ขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 10x10x11 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) โดยการหล่อคอนกรีตใส่ปริมาณคอนกรีตให้มีความสูงเท่ากับ 11 cm เมื่อปิดฝาจะทำการอัดให้คอนกรีตเหลือความสูง 10 cm และแบบหล่อคอนกรีตธรรมดา ขนาด 10x10x10 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)



(ก) แบบหล่ออัดความดัน



(ข) แบบหล่อพลาสติกแข็ง

รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

3.2.2 ชุดเครื่องมือทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

3.3 ขั้นตอนวิธีการศึกษา

3.3.1 การเตรียมวัสดุ

3.3.1.1 การบดและคัดแยกวัสดุนำเข้าแกลบไม่บด และเข้าแกลบบดละเอียดร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อหาน้ำหนักค้างบนตะแกรง เบอร์ 325 และ นำทรายแม่น้ำมาทำการบดให้มีขนาดต่างกัน 2 ขนาด คือ มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ขนาดของอนุภาคของเข้าแกลบไม่บดและเข้าแกลบบดละเอียด

3.3.1.2 ทราย นำมาทำความสะอาดโดยเอาสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนสะอาดแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.3.1.3 หิน นำมาทำความสะอาดโดยเอาสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจนสะอาดแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง

3.3.2 การทดสอบหาสมบัติจำเพาะของปูนซีเมนต์ แกลบ และทรายบด

3.3.2.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ แกลบไม่บด แกลบบดละเอียด และทรายบด โดยใช้ขวด Le Chatelier ตาม ASTM C 188 [33] ซึ่งเป็นการหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยการหาอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรที่แทนที่ด้วยน้ำในน้ำมันก๊าด

3.3.2.2 การทดสอบน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของตัวอย่างเข้าแกลบไม่บด แกลบบดละเอียด และ ทรายบด ทำการทดสอบโดยวิธี Wet Sieve Analysis [34] ซึ่งทำโดยการเอาตัวอย่างมาทำการร่อนผ่านตะแกรงโดยการใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือบนตะแกรง ซึ่งจะเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325

3.3.3 การทดสอบซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์เมื่อใช้เข้าแกลบและใช้ทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3.3.3.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ โดยวิธีเข็มไวแคต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 [35] และ มาตรฐาน ASTM C 191 [36] เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์,ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเข้าแกลบ และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมทรายบด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเข้าแกลบหรือทรายบดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3.3.3.2 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 [37] โดยมาตรฐานกำหนดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุกประเภท (โดยทั่วไปมีค่าการไหลประมาณ 105-115 สำหรับทรายออกดวามาแต่มีค่าการไหลต่ำกว่า 105-115 ถ้าใช้ทรายชนิดอื่น) และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลเท่ากับ 110 ± 5 สำหรับปูนซีเมนต์ชนิดอื่นที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [32] งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ทั้ง 2 กรณี เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความแตกต่างระหว่างการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่และกำหนดให้ค่าการไหลคงที่

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม เพื่อหา กำลังอัดของมอร์ต้าร์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและทรายบด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดย น้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ ปูนซีเมนต์ สัญลักษณ์ที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะบอกถึงชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ ปูนซีเมนต์ ส่วนหลังจะบอกชนิดของมอร์ต้าร์ โดยจะแบ่งมอร์ต้าร์ออกเป็น 2 ชนิดคือ มอร์ต้าร์ที่มี อัตราส่วนผสมที่กำหนดให้ค่าการไหลคงที่ โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย FF (Fixed Flow) ต่อท้าย อีกชนิดหนึ่งจะเป็นส่วนผสมที่กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย FW (Fixed Water) ทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วันแต่ละอายุการทดสอบจะมี ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ จำนวน 6 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

Sample	Mix Proportion (by weight , kg)					W/(C+RH) or W/(C+GS)
	Cement (C)	Rice husk Ash (RH)	Ground Sand (GS)	Sand (S)	Water (W)	
CONFF	100	-	-	275	76.46	0.765
URHFF10	90	10	-	275	87.93	0.879
URHFF20	80	20	-	275	99.40	0.994
GRHFF10	90	10	-	275	76.46	0.765
GRHFF20	80	20	-	275	78.38	0.738

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

Sample	Mix Proportion (by weight , kg)					W/(C+RH)
	Cement (C)	Rice husk Ash (RH)	Ground Sand (GS)	Sand (S)	Water (W)	or W/(C+GS)
CL1FF10	90	-	10	275	74.55	0.745
CL1FF 20	80	-	20	275	74.55	0.745
CL2FF10	90	-	10	275	74.55	0.745
CL2FF20	80	-	20	275	72.64	0.726
CONFW	100	-	-	275	48.50	0.485
URHFW10	90	10	-	275	48.50	0.485
URHFW20	80	20	-	275	48.50	0.485
GRHFW10	90	10	-	275	48.50	0.485
GRHFW20	80	20	-	275	48.50	0.485
CL1FW10	90	-	10	275	48.50	0.485
CL1FW20	80	-	20	275	48.50	0.485
CL2FW10	90	-	10	275	48.50	0.485
CL2FW20	80	-	20	275	48.50	0.485

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ในการทำวิจัย

URH	หมายถึง	ผ้าเคลือบไม่บด
GRH	หมายถึง	ผ้าเคลือบบดละเอียด
CL1	หมายถึง	ทรายบด ที่แยกขนาดมีความละเอียดอนุภาค เท่ากับ URH
CL2	หมายถึง	ทรายบด ที่แยกขนาดมีความละเอียดอนุภาค เท่ากับ GRH
CON	หมายถึง	ตัวอย่างมอร์ต้าร์มาตรฐาน
FF	หมายถึง	มอร์ต้าร์ที่กำหนดค่าการไหลของมอร์ต้าร์คงที่ระหว่าง 105 ถึง 115
FW	หมายถึง	มอร์ต้าร์ที่กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.485

- 10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์
- CONFF หมายถึง มอร์ต้าร์มาตรฐานที่กำหนดค่าการไหลคงที่
- URHFF20 หมายถึง มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้ากลบไม่บด (URH) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่กำหนดค่าการไหลของมอร์ต้าร์คงที่ระหว่าง 105 ถึง 115

3.3.4 การทดสอบคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3.3.4.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตตัวอย่างและจำนวนตัวอย่าง

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ทำการคำนวณปฏิกิริยาส่วนผสมโดยใช้วิธีการของสถาบันอเมริกัน (ACI) [38] โดยออกแบบให้คอนกรีตมีกำลังแรงอัดเท่ากับ 240 kg/cm^2 อัตราส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการหล่อคอนกรีตใช้เถ้ากลบไม่บดและเถ้ากลบบดละเอียด มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ มีรายละเอียดส่วนผสมดังตารางที่ 3.2 และการหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะใช้แบบหล่อธรรมดาและแบบหล่ออัดความดัน โดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตจะถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดของอายุคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน และทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยการไหลแบบคงที่ของอายุคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด อายุละ 3 ตัวอย่าง และทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยการไหลแบบคงที่ อายุละ 2 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

Sample	Mix Proportion (by weight , kg)					
	Cement	Rice husk	Sand	Rock	Water	Superplasticizer*
	(C)	Ash (RH)	(S)	(R)	(W)	(SP)
CON-N	316	-	739	1,090	211.42	-
CON-P	316	-	739	1,090	211.42	-
URH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09
URH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20
URH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09
URH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20
GRH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09
GRH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20
GRH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09
GRH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20

หมายเหตุ : * ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมสำหรับตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษจะคิดน้ำที่ผสมอยู่ในสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 50 โดยปริมาณการใส่สารลดน้ำพิเศษใช้ค่า Slump เท่ากับ 10 ± 2.5 cm เป็นเกณฑ์ควบคุม

สัญลักษณ์

- CON หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน
- URH หมายถึง ถังกลบไม้บด
- GRH หมายถึง ถังกลบบดละเอียด
- SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ
- N หมายถึง ตัวอย่างแบบหล่อธรรมดา (Normal)
- P หมายถึง ตัวอย่างแบบหล่ออัดความดัน (Pressure)
- 10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

URH10-SP-P หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยเติมสารลดน้ำพิเศษ (SP) เพื่อปรับค่ายุบตัวและการหล่อตัวอย่างแบบอัดความดัน, CON-N หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา, CON-P หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบอัดความดัน

3.3.4.2 การทดสอบค่ายุบตัว

ทำการทดสอบค่าการยุบตัว ทันทีหลังการผสม วิธีการทำตามมาตรฐาน ASTM C143 [39]

3.3.4.3 การบรรจุเข้าแบบและการบ่ม

1) การหล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่อธรรมดา ขนาด 10 x 10 x 10 cm ใส่คอนกรีตลงในแบบแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้เวลาเขย่าด้วยโต๊ะเขย่าชั้นละ 1 นาที แต่งผิวหน้าให้เรียบ เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำแท่งคอนกรีตออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบ

2) การหล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่ออัดความดัน ขนาด 10x10x11 cm ใส่ปริมาณคอนกรีตให้มีความสูงเท่ากับ 11 cm เมื่อปิดฝาจะทำการอัดให้คอนกรีตเหลือความสูง 10 cm เพื่อเป็นการควบคุมปริมาตรของคอนกรีตให้เท่ากันทุกตัวอย่าง การใส่คอนกรีตลงในแบบแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้เวลาเขย่าด้วยโต๊ะเขย่าชั้นละ 1 นาที แต่งผิวหน้าให้เรียบ ปิดฝาให้สนิท เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำแท่งคอนกรีตออกจากแบบหล่อ นำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบ

3.3.4.4 การทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

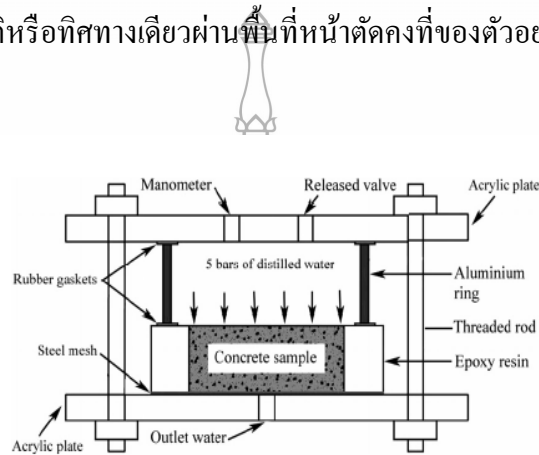
1) วัดพื้นที่หน้าตัดด้านรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตลูกบาศก์ (กว้างxยาว)

2) นำแท่งคอนกรีตลูกบาศก์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Hydraulic Testing Machine) จนแตกจะได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต คือ น้ำหนักที่กดแท่งคอนกรีตจนแตกหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัด

3.3.4.5 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยการไหลแบบคงที่

1) หลักการ[27]

การทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยวิธีการไหลแบบคงที่ดัง
ในรูปที่ 3.3 ถูกเสนอโดย Khatri และ Sirivivatnanon ในปี 1997 ซึ่งอาศัยหลักการตามทฤษฎีของ
ดาร์ซี (Darcy's Law) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) โดยการทดสอบเป็นการจำลอง
การไหลของน้ำในหนึ่งมิติหรือทิศทางเดียวผ่านพื้นที่หน้าตัดคงที่ของตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.3 โดอะแกรมแสดงการทดสอบหาค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต [27]

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสามารถทำการคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1
ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำ ความยาวและขนาดหน้าตัด
ของตัวอย่างคอนกรีต อัตราการไหลของน้ำผ่านคอนกรีตหน่วยของการวัดที่ได้จากการคำนวณจะเป็น
อัตราความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำในคอนกรีตคือเมตรต่อวินาที สำหรับการเลือกใช้ระดับของ
แรงดันน้ำนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอนกรีตโดยที่สมาคมคอนกรีตของอเมริกันได้แนะนำให้ใช้
ความดันที่ระดับ 5 บาร์ เนื่องจากถ้าใช้แรงดันสูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตเกิดความ
เสียหายและถ้าใช้แรงดันต่ำเกินไปก็จะทำให้การทดสอบดังกล่าวใช้เวลานานมากขึ้น

$$K = (\rho L g Q) / (P A) \quad (3.1)$$

เมื่อ

K = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m/s)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

Q = อัตราการไหลแบบคงที่ (m^3/s)

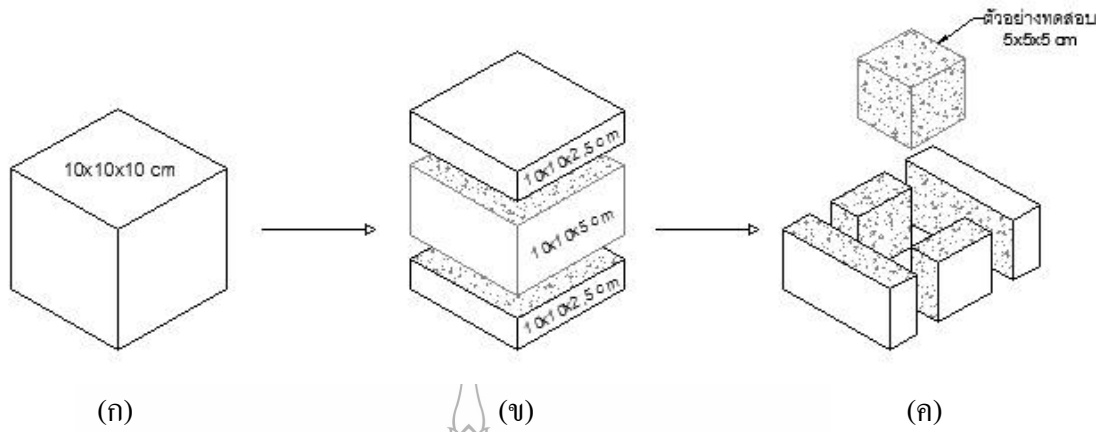
L = ความหนาหรือความสูงของแท่งตัวอย่างคอนกรีต (m)

P = แรงดันน้ำที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีต ($\text{kg}\cdot\text{m/s}^2/\text{m}^2$)

A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (m^2)

2) วิธีการทดสอบ

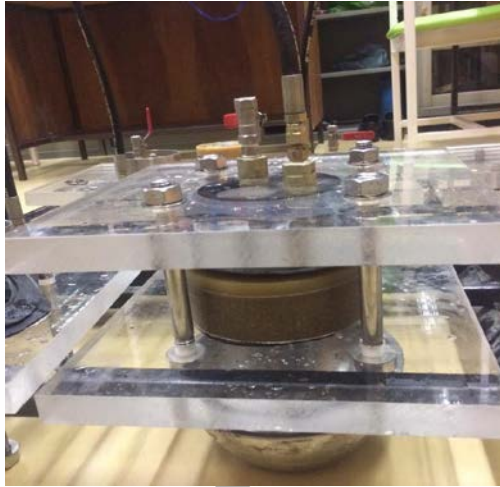
นำตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 10 x10 x10 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) มาตัดบริเวณกึ่งกลางของความสูงให้ได้ความหนาประมาณ 4-5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) จากนั้นนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการตัดในชิ้นส่วนตรงกลางไปตัดรอบข้างออกด้านละประมาณ 2.5 cm ให้เหลือก้อนตัวอย่างคอนกรีตชิ้นส่วนภายในตรงกลางขนาด กว้างxยาวxสูง ประมาณ 5x5x5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ค) โดยผิวทั้งสองด้านที่ทำการตัดต้องมีความเรียบสม่ำเสมอและตั้งฉากกับแนวทรงลูกบาศก์ทำความสะอาดผิวของแท่งตัวอย่างด้วยการขัดด้วยแปรงลวด ให้ผิวของตัวอย่างสะอาดปราศจากคราบน้ำปูน นำตัวอย่างดังกล่าวไปทำให้ผิวแห้งโดยการนำไปตากแดดหรือเข้าตู้อบเป็นเวลา 20-30 นาที เมื่อผิวตัวอย่างแห้งสนิทแล้ว ให้ทำการหล่ออิพอกซีด้านข้างหนา 2.5 cm และความสูงเท่ากับก้อนตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยก่อนเทอิพอกซีให้นำเทปกาวหรือแผ่นพลาสติกติดไว้ด้านล่างของคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้อิพอกซีที่ได้นำไปหล่อบริเวณรอบๆ ผิวด้านข้างของคอนกรีตแทรกซึมเข้าไปปิดผิวด้านหน้าคอนกรีตถ้าหากไม่ทำเช่นนั้นจะทำให้ อิพอกซีไปปิดผิวหน้าของคอนกรีตทำให้ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการทดสอบ และอิพอกซีที่ใช้นั้น เมื่อแข็งตัวแล้วสามารถ รับน้ำหนักได้สูงและไม่หดตัว เชื่อมประสานกับผิวคอนกรีตได้อย่างดี เมื่อหล่ออิพอกซีครบ 24 ชั่วโมงหรืออิพอกซีแข็งตัวเต็มที่แล้ว นำตัวอย่างมาทำความสะอาดผิวหน้าทั้งสองด้านอีกครั้งแล้วประกอบเข้ากับชุดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และนำชุดทดสอบติดตั้งกับเครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นทำการเติมน้ำให้กับระบบและทำการไล่อากาศภายในออกให้หมด แล้วเริ่มให้ความดันที่ประมาณ 5 บาร์ เพื่อดันน้ำให้ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ทำการวัดระดับน้ำที่ลดลงที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 3.5 การหล่ออีพอกซี



รูปที่ 3.6 การประกอบตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับชุดทดสอบ



รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดทดสอบกับเครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ในครั้งนี้ได้พิจารณาและการวิเคราะห์ในหัวข้อดังต่อไปนี้ คือ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) และการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธี เข้มไวแควต ซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.18 เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีค่าเท่ากับ 1.99 เท่ากัน เห็นได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ส่วนทรายชนิด CL1 และ CL2 มีค่าเท่ากับ 2.71 และ 2.72 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายชนิดแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากทรายมีลักษณะเป็นวัสดุเนื้อแน่นเมื่อค้ำให้แตกตัวค่าความถ่วงจำเพาะจึงไม่แตกต่างกัน

ความละเอียดโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐาน 325 ร้อยละ 13.5, 86 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่า เถ้าแกลบไม่บดมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบดละเอียดมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ โดยที่เถ้าแกลบไม่บดมีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 สูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [8] กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 จึงไม่เหมาะที่นำมาเป็นวัสดุปอชโซลานเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาได้ช้า

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และทรายบด

ตัวอย่าง	ร้อยละข้างบนตะแกรง เบอร์ 325	
	(%)	ค่าความถ่วงจำเพาะ
Cement	13.5	3.18
URH	86	1.99
GRH	7	1.99
CL1	86	2.71
CL2	11	2.72

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ ดังตารางที่ 4.2 พบว่า SiO_2 ของเถ้าแกลบมีปริมาณค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 90.62 เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 20.40 ในขณะที่องค์ประกอบอื่นของเถ้าแกลบมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ฤทธิ์ของ Al_2O_3 ของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 0.25 และ 5.40 ตามลำดับ ส่วนฤทธิ์ Fe_2O_3 ของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 0.20 และ 3.10 ตามลำดับ และ ฤทธิ์ CaO ของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 0.85 และ 63.71 ตามลำดับ

ในส่วนของออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่ MgO , K_2O , SO_3 และ Na_2O นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้ว พบว่า ของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบมีค่าไม่แตกต่างกัน

กรณีที่มีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบไม่ได้แยกชนิดเป็นเถ้าแกลบไม่บด และเถ้าแกลบบดละเอียด เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การปรับปรุงคุณภาพเถ้าปาล์ม น้ำมัน โดยการบดไม่มีผลทำให้องค์ประกอบเคมีเปลี่ยนแปลง [40] และเถ้าแกลบบดละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบอนุภาคขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน [17]

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบ
SiO ₂	20.40	90.62
Al ₂ O ₃	5.40	0.25
Fe ₂ O ₃	3.10	0.20
CaO	63.71	0.85
MgO	1.04	0.35
K ₂ O	0.54	2.17
SO ₃	2.90	0.13
Na ₂ O	0.08	0.04
LOI	2.83	5.39

4.1.3 ระยะเวลาการก่อตัว

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์ ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบและทรายบด พบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีค่าความชื้นเหลือปกติมากกว่าปูนซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้สามารถดูดซับน้ำได้เพิ่มขึ้น ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมทรายบดจะมีค่าความชื้นเหลือเท่ากับปูนซีเมนต์เพสต์ สำหรับผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว พบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมทรายบดจะมีค่าเวลาก่อตัวระยะต้นและเวลาก่อตัวระยะปลายใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์เพสต์

ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบไม่บด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเวลาก่อตัวระยะต้นและเวลาก่อตัวระยะปลายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 42-90 นาที โดยที่การแทนที่เถ้าแกลบไม่บดในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวปลายลดลง ส่วนซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเวลาก่อตัวระยะต้นและเวลาก่อตัวระยะปลายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วนประมาณ 23-45 นาที โดยที่การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการก่อตัวระยะต้นลดลง อย่างไรก็ตาม ASTM C 150 [41] กำหนดไว้ว่าไม่ควรน้อยกว่า 45 นาที และไม่ควรเกินกว่า 375 นาที ซึ่งซีเมนต์เพสต์ทั้งหมด ยังมีระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลาย เป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และทรายบด

ชนิดของเพสต์	ปริมาณน้ำที่ ความชื้นเหลือปกติ (%)	เวลาก่อตัวระยะต้น (นาที)	เวลาก่อตัวระยะปลาย (นาที)
Cement	25	103	180
URH10	41	61	105
URH20	37	45	90
GRH10	40	80	135
GRH20	41	67	135
CL,10	25	104	195
CL,20	25	100	180
CL,10	25	101	165
CL,20	25	101	165

4.2 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ

การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบในครั้งนี้ประกอบด้วยค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ ค่าดัชนีกำลังและร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของกำลังอัดมอร์ตาร์ ซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

4.2.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน (CONFF) มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และทรายบด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลของมอร์ตาร์เท่ากับ 105 ถึง 115 พบว่า มอร์ตาร์มาตรฐาน (CONFF) มีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 110, 173, 214, 244 และ 299 kg/cm² ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) ตัวอย่างมอร์ตาร์ URHFF10 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 82, 138, 192, 212 และ 223 kg/cm² และมอร์ตาร์ URHFF20 มีค่ากำลังอัด 63, 118, 165, 192 และ 264 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ URHFF20 ในช่วงอายุ 3 ถึง 60 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าตัวอย่าง URHFF10 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 90 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ URHFF20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ URHFF10 แสดงว่า ในช่วงอายุ 3 ถึง 60 วัน ค่ากำลังอัดเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลักในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นยังไม่มาก เนื่องจากเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคขนาดใหญ่ การแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้ปูนซีเมนต์ลดลง ค่ากำลังอัดจึงต่ำลง ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นสูงกว่ากำลังอัดที่สามารถ

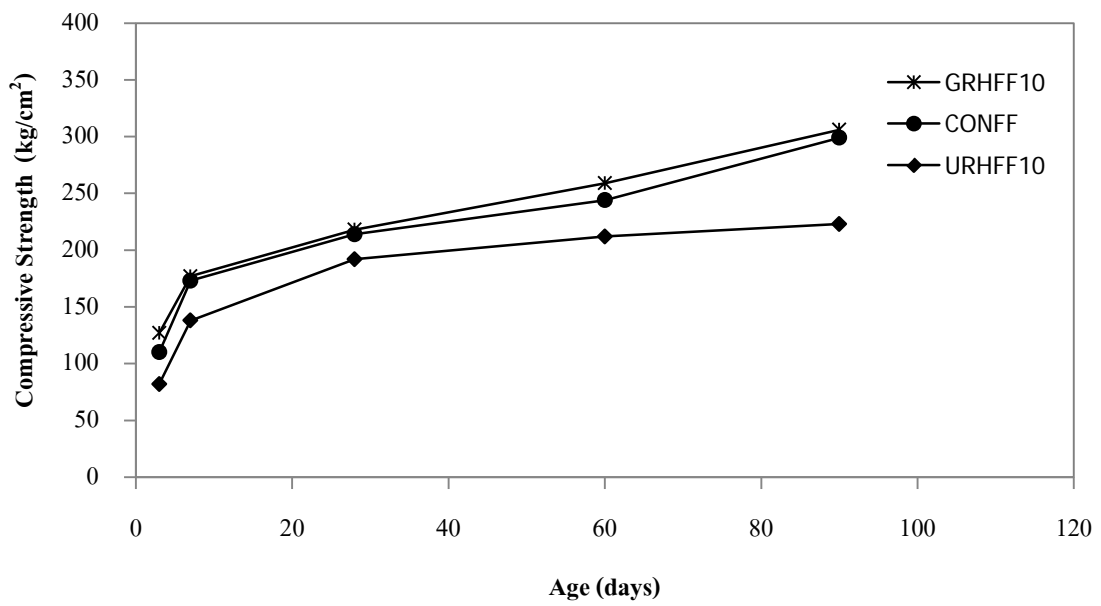
ชดเชยจากการลดลงของปูนซีเมนต์ได้จึงทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 สูงกว่ามอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

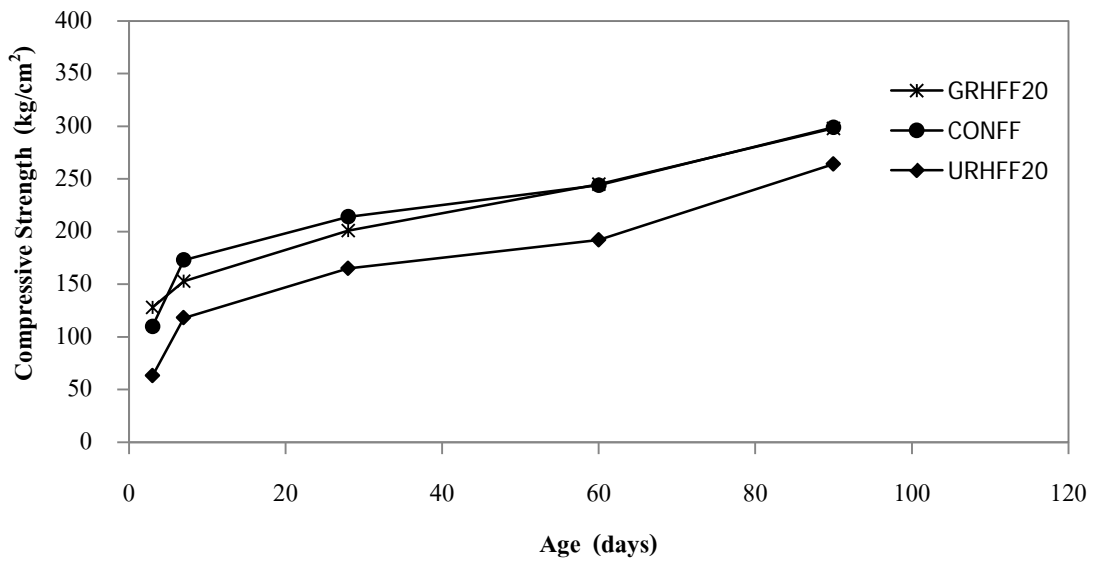
ตัวอย่างมอร์ต้าร์	กำลังอัด (kg/cm ²)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CONFF	110	173	214	244	299
URHFF10	82	138	192	212	223
URHFF20	63	118	165	192	264
GRHFF10	127	177	218	259	306
GRHFF20	128	153	201	245	298
CL1FF10	123	150	200	217	271
CL1FF20	96	136	158	208	217
CL2FF10	122	162	199	227	261
CL2FF20	103	131	161	194	214

ส่วนมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า ตัวอย่างมอร์ต้าร์ GRHFF10 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 127, 177, 218, 259 และ 306 kg/cm² และมอร์ต้าร์ GRHFF20 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 128, 153, 201, 245 และ 298 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อเถ้าแกลบมีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้และมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมอร์ต้าร์มีอายุเพิ่มขึ้นค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าร์เป็นผลมาจากความละเอียดของเถ้าแกลบที่สูงขึ้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคความละเอียดที่สูงขึ้น ทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้มอร์ต้าร์เนื้อแน่นขึ้นกำลังอัดจึงสูงขึ้น

รูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (ตัวอย่าง URHFF10) มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดทุกอายุการทดสอบ ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (ตัวอย่าง GRHFF10) มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานทุกอายุการทดสอบ



รูปที่ 4.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกบลร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

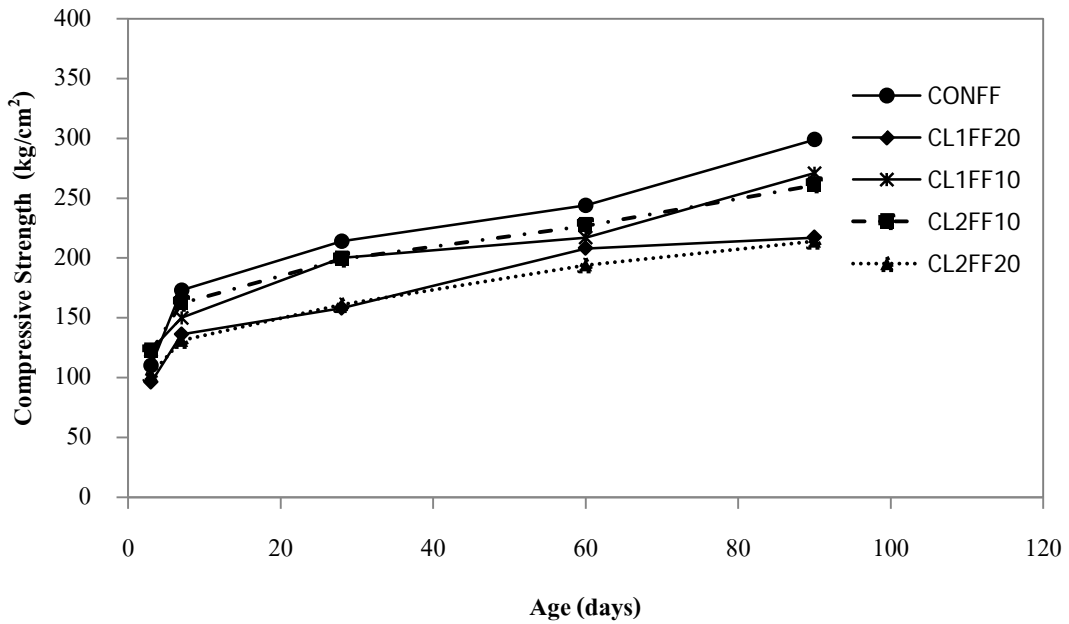


รูปที่ 4.2 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกบลร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

รูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ ร้อยละ 20 พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (ตัวอย่าง URHFF20) มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์ มาตรฐานและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดทุกอายุการทดสอบ ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ บดละเอียด (ตัวอย่าง GRHFF20) ในช่วงอายุก่อน 60 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน เล็กน้อยและหลังจากอายุ 60 วันมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน

ผลของค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคเล็กลงสามารถพัฒนากำลังอัด ของมอร์ต้าร์สูงกว่าเถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า เนื่องจากอนุภาคที่เล็กลงจะมีผลต่อพื้นที่ผิวที่ มากขึ้นเป็นผลทำให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้นด้วย จึงมีผลทำให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งให้ผลการทดสอบเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุ ปอซโซลานที่ละเอียดกว่าจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า [2] และกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าถ่านหินผสม อยู่จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าถ่านหิน โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินละเอียดที่สุดให้กำลังอัดสูง ที่สุด ส่วนมอร์ต้าร์เถ้าถ่านหินขนาดหยาบที่สุดให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุด [7]

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมทรายบด จากรูปที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่ของ มอร์ต้าร์ผสมทรายบดชนิดเดียวกัน จะเห็นว่า ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบดมีค่าลดลง เมื่อ อัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบด CL1 และ CL2 ทุกอัตรา การแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีแนวโน้มต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน เนื่องจากการแทนที่ที่ทรายบดซึ่ง เป็นวัสดุเฉื่อยที่มีความเป็นผลึกสูงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้กำลังอัด ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง กำลังอัดมอร์ต้าร์จึงลดต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [31] กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์จะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ที่ เพิ่มขึ้นของทรายแม่น้ำบด



รูปที่ 4.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน, มอร์ต้าร์ผสมทรายบดร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

4.2.2 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

ตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุพอซโซลานของเถ้าแกลบสามารถวัดได้โดยการทดสอบค่าดัชนีกำลัง โดยใช้การทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าดัชนีกำลัง คือ ค่ากำลังที่ทดสอบได้เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของ มอร์ต้าร์ URHFF20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 68 และ 77 ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน แต่ที่อายุ 28 วัน มีค่าร้อยละมากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน จะเห็นว่า ค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] กำหนดไว้คือ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน

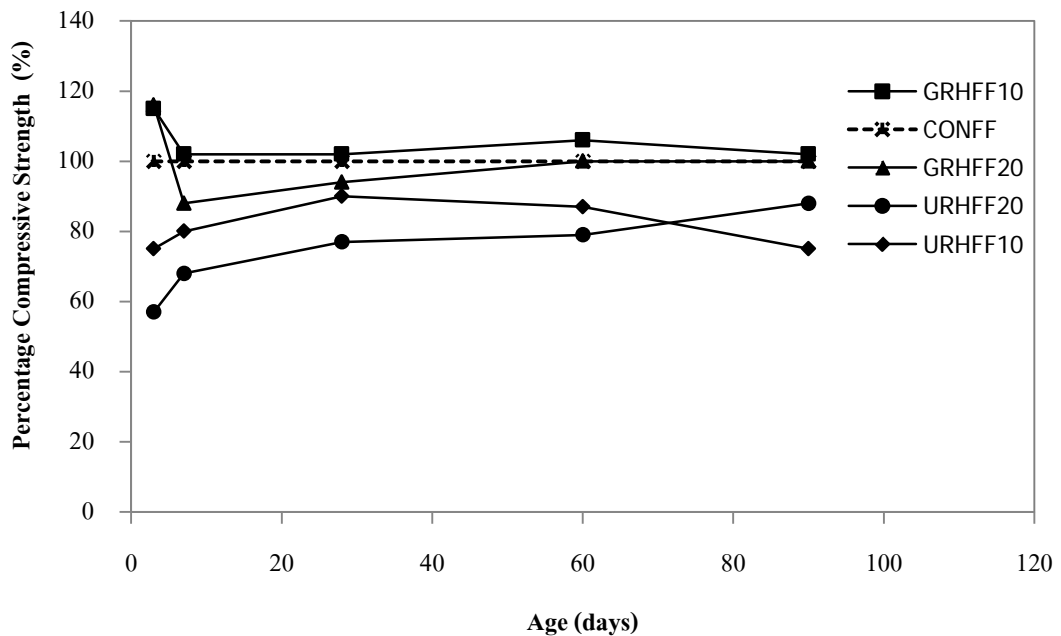
ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ GRHFF20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าร้อยละ 88 และ 94 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [8] กำหนดไว้คือ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน แสดงว่าเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลานที่ดี

ตารางที่ 4.5 ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	ร้อยละของกำลังอัด (%)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CONFF	100	100	100	100	100
URHFF10	75	80	90	87	75
URHFF20	57	68	77	79	88
GRHFF10	115	102	102	106	102
GRHFF20	116	88	94	100	100
CL1FF10	112	87	93	89	91
CL1FF20	87	79	74	85	73
CL2FF10	122	94	93	93	87
CL2FF20	94	76	75	80	72

4.2.3 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

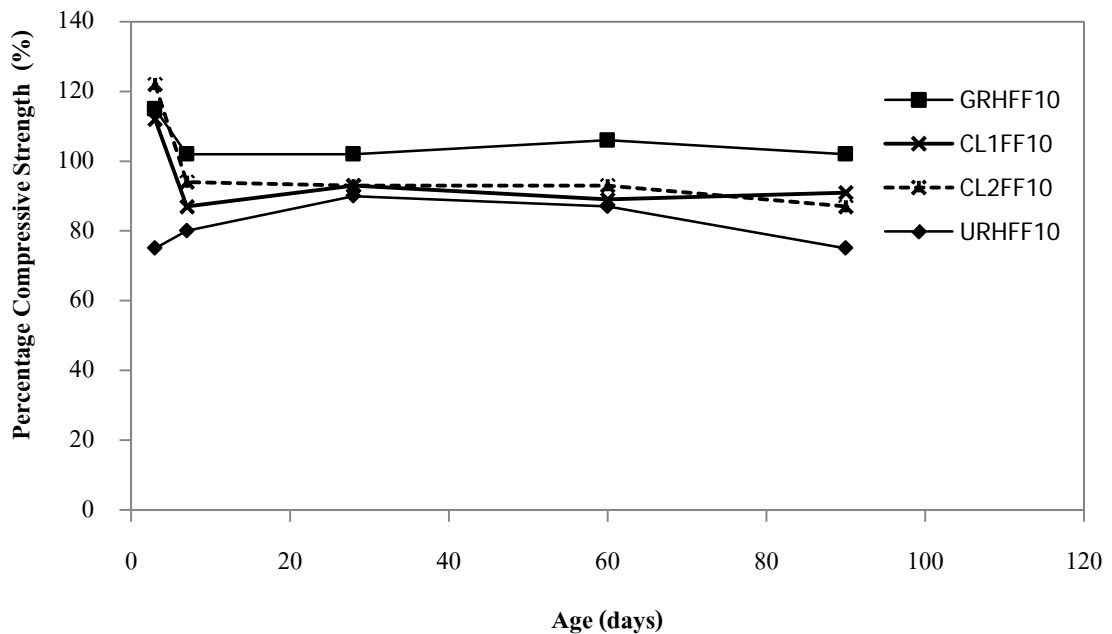
รูปที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด และ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 กับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่ จะเห็นว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด ตัวอย่าง URHFF10 และ ตัวอย่าง URHFF20 มีค่าต่ำกว่า ร้อยละร้อยละ ทุกอายุการทดสอบ ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด ตัวอย่าง GRHFF10 ทุกอายุการทดสอบ และตัวอย่าง GRHFF20 หลังจากอายุ 60 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละร้อยละขึ้นไป แสดงว่าค่าร้อยละที่สูงของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงเถ้าแกลบบดละเอียด มีปฏิกิริยาปอซโซลานที่สูง



รูปที่ 4.4 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด
เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

รูปที่ 4.5 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ พบว่า ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 และ CL2 ซึ่งเป็นวัสดุไม่ละลายในกรดและด่างทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันเพราะการแทนที่ทรายบดใน ปริมาณน้อย ร้อยละ 10 ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเล็กน้อย จึงทำให้ร้อยละของกำลังอัดของ มอร์ตาร์ผสมทรายบดทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบดที่มีขนาดอนุภาค เท่ากัน พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดมีค่าร้อยละของกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 เล็กน้อย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีค่าร้อยละของกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 แสดงว่า เถ้าแกลบไม่บดการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับ เถ้าแกลบบดละเอียดที่มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูง

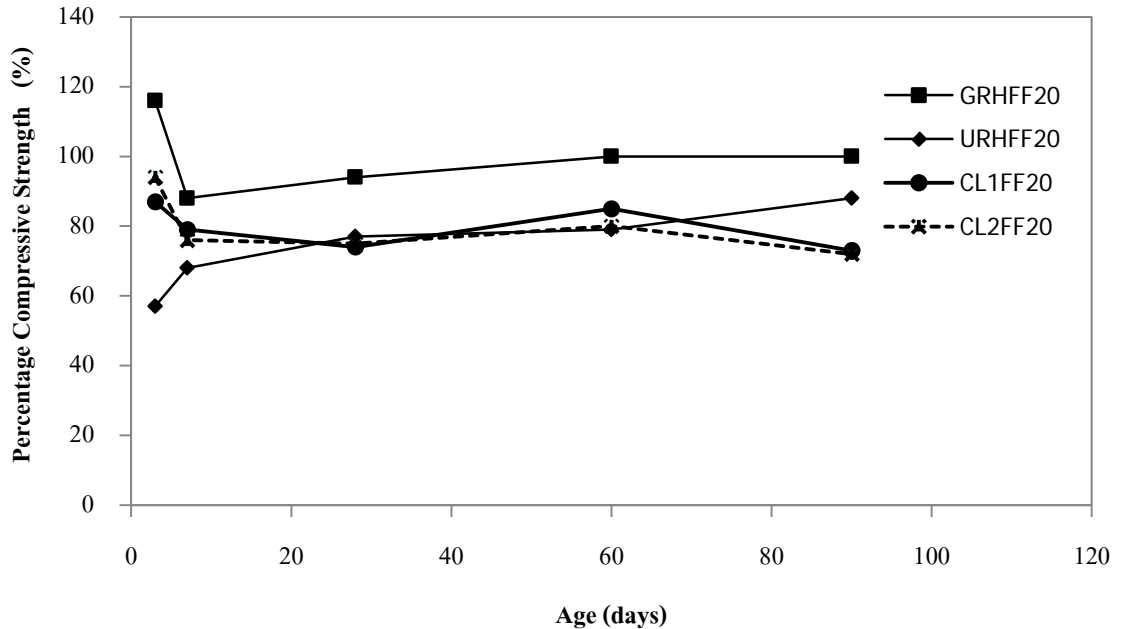


รูปที่ 4.5 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ และมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

รูปที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ พบว่า ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมทรายบด CL1 และ CL2 ซึ่งเป็นวัสดุไม่ละลายในกรดและด่างทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์ที่แทนที่ทรายบดร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างร้อยละของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบกับมอร์ต้าร์ผสมทรายบด ที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด ในช่วงอายุก่อน 90 วัน ค่าร้อยละของกำลังอัดมีแนวโน้มต่ำกว่ามอร์ต้าร์ผสมทรายบด CL1 เล็กน้อย และที่อายุ 90 วัน ค่าร้อยละของกำลังอัดมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ผสมทรายบด CL1 แสดงว่า เถ้าแกลบไม่บดในช่วงอายุก่อน 90 วัน การพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อย โดยที่อายุ 90 วัน จะมีกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีค่าร้อยละของกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ผสมทรายบด CL2 เห็นได้ว่า เถ้าแกลบไม่บดมีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้ช้าและน้อยมาก

เมื่อเทียบกับเจ้าแกลบบดละเอียดที่มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เจ้าแกลบในปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10



รูปที่ 4.6 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเจ้าแกลบ และมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

4.2.4 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของกำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

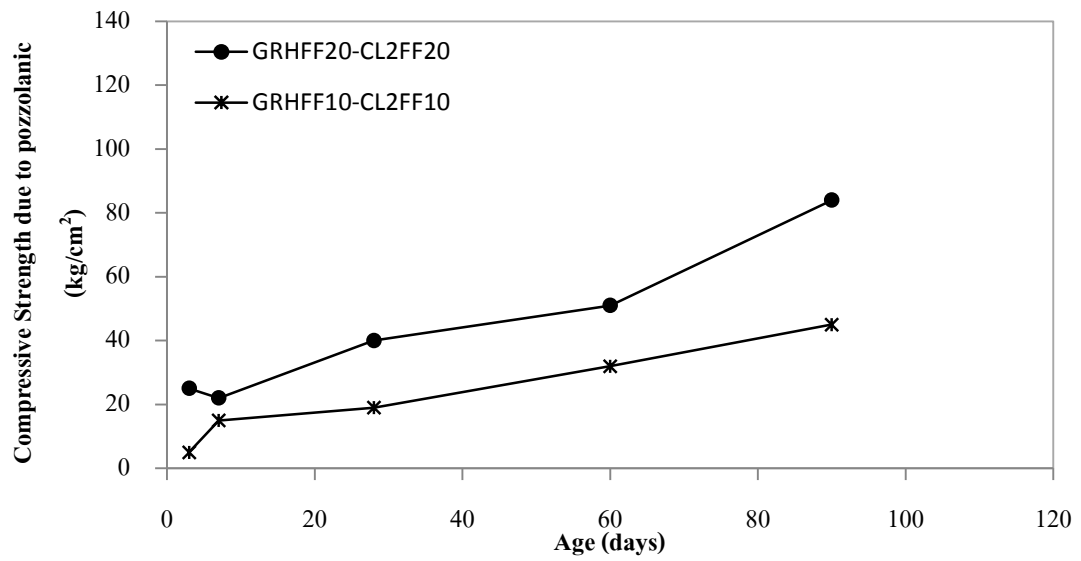
การวิเคราะห์ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานจะพิจารณาเฉพาะมอร์ตาร์ที่ผสมเจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เท่านั้น เนื่องจากเจ้าแกลบ GRH มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [8] ซึ่งแสดงว่า เจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี โดยการนำค่ากำลังของมอร์ตาร์ผสมเจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เป็นวัสดุปอซโซลานเทียบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 เป็นวัสดุไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากความเป็นผลึกสูง ผลต่างของกำลังอัดที่เกิดขึ้น คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงอย่างเดียว จากตารางที่ 4.4 มอร์ตาร์ผสมเจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ตัวอย่าง GRHFF10 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 127, 177, 218, 259 และ 306 kg/cm² ตามลำดับ เทียบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบด (CL2) ตัวอย่างมอร์ตาร์ CL2FF10 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 122, 162, 199, 227 และ 261 kg/cm²

ตามลำดับ ผลต่างของ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ GRHFF10 หักออกจากมอร์ต้าร์ CL2FF10 (GRHFF10 – CL2FF10) คือ ค่ากำลังอัดของปฏิกิริยาปอซโซลาน มีค่าเท่ากับ 5, 15, 19, 32 และ 45 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และตัวอย่างมอร์ต้าร์ GRHFF20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 128, 153, 201, 245 และ 298 kg/cm² ตามลำดับ เทียบกับมอร์ต้าร์ผสมทรายบด (CL2) ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CL2FF20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 103, 131, 161, 194 และ 214 kg/cm² ตามลำดับ ผลต่างของ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ GRHFF20 หักออกจากมอร์ต้าร์ CL2FF20 (GRHFF20 – CL2FF20) คือ ค่ากำลังอัดของปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเท่ากับ 25, 22, 40, 51 และ 84 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ
เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (kg/cm ²)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
GRHFF10 – CL2FF10	5	15	19	32	45
GRHFF20 – CL2FF20	25	22	40	51	84

จากรูปที่ 4.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ ที่ห้กค่าการอัดตัวอนุภาคและปฏิกิริยาไฮเดรชันออก จะเห็นได้ว่าเมื่อมอร์ต้าร์มีอายุ 7 วันขึ้นไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น โดยที่การแทนที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่าการใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ซึ่งกำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน
เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่



4.2.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

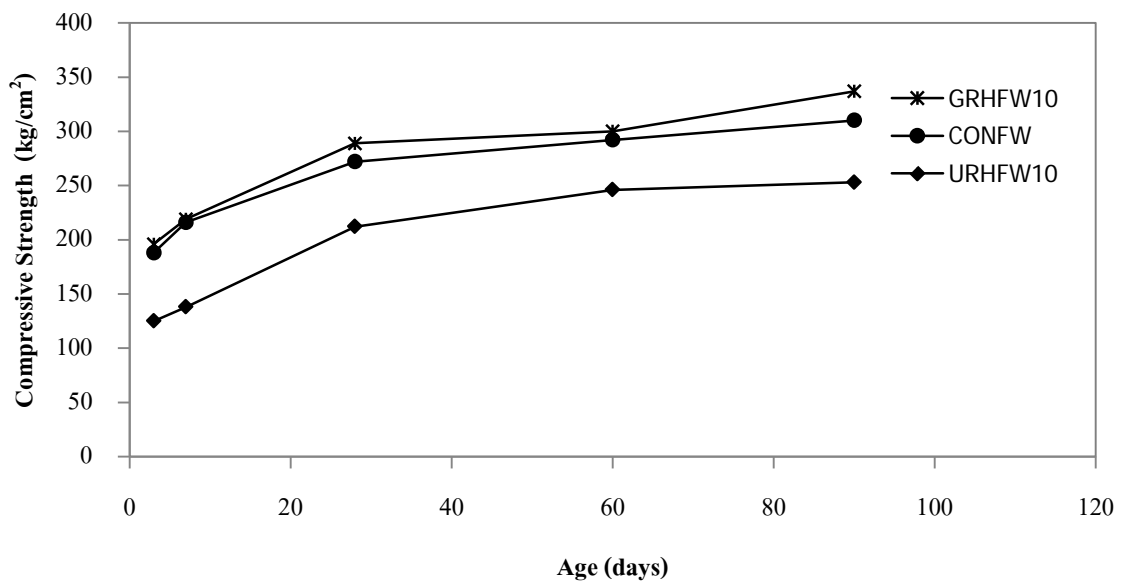
ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน (CONFW) มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และทรายบด ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ พบว่า มอร์ตาร์มาตรฐาน (CONFW) มีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 188, 216, 272, 292 และ 310 kg/cm² ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) ตัวอย่างมอร์ตาร์ URHFW10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ เท่ากับ 125, 138, 212, 246 และ 253 kg/cm² และมอร์ตาร์ URHFW20 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 80, 105, 129, 130 และ 133 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น ซึ่งให้ผลแตกต่างกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ เหตุ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้ว่า มอร์ตาร์เมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ มีค่าอัตราส่วน w/c ต่ำกว่า มอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ ประกอบกับเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงมาก ทำให้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบไม่บดมีการดูดน้ำมาก ส่งผลให้การทำให้ แน่นใน การหล่อมอร์ตาร์ทำได้ยาก อีกทั้งจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงจากการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด จึงทำให้กำลังอัดลดลง ส่วนของกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยไม่สามารถ ชดเชยกำลังอัดที่ลดลงได้ จึงทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 ทุกอายุการทดสอบ

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

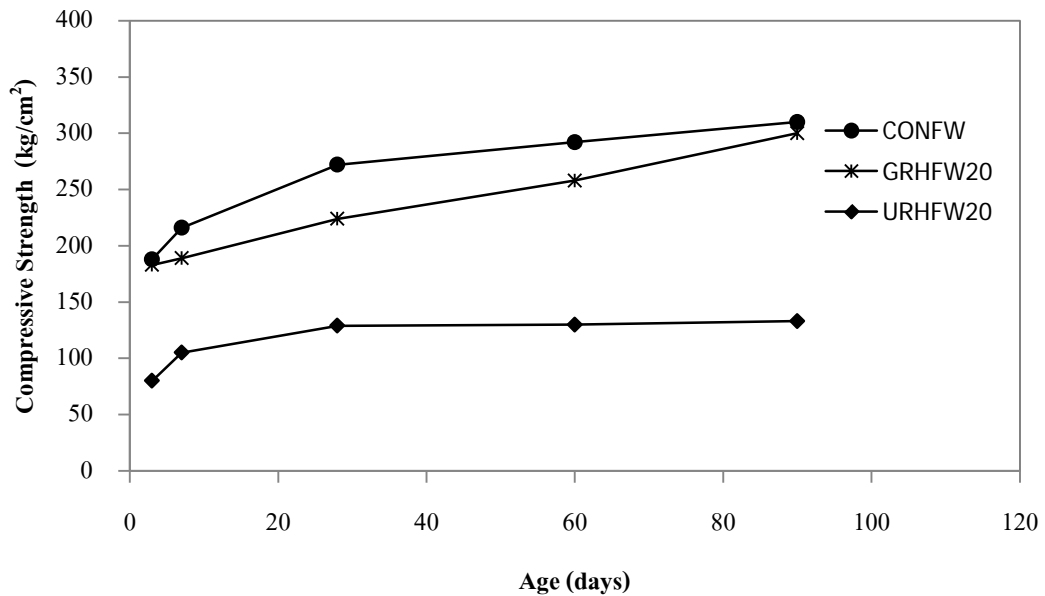
ตัวอย่างมอร์ตาร์	กำลังอัด (kg/cm ²)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CONFW	188	216	272	292	310
URHFW10	125	138	212	246	253
URHFW20	80	105	129	130	133
GRHFW10	196	219	289	300	337
GRHFW20	183	189	224	258	300
CL1FW10	172	233	272	291	302
CL1FW20	152	169	212	229	269
CL2FW10	193	213	277	280	307
CL2FW20	181	187	221	250	290

ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ GRHFW10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 196, 219, 289, 300 และ 337 kg/cm² และมอร์ตาร์ GRHFW20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 183, 189, 224, 258 และ 300 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อเถ้าแกลบมีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้ และมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์เป็นผลมาจากความละเอียดของเถ้าแกลบที่สูงขึ้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคความละเอียดที่สูงขึ้น ทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้มอร์ตาร์เนื้อแน่นขึ้นกำลังอัดจึงสูงขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

รูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (ตัวอย่าง GRHFW10) มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดและมอร์ตาร์มาตรฐานทุกอายุการทดสอบ ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (ตัวอย่าง URHFW10) มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอายุการทดสอบ



รูปที่ 4.8 กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่



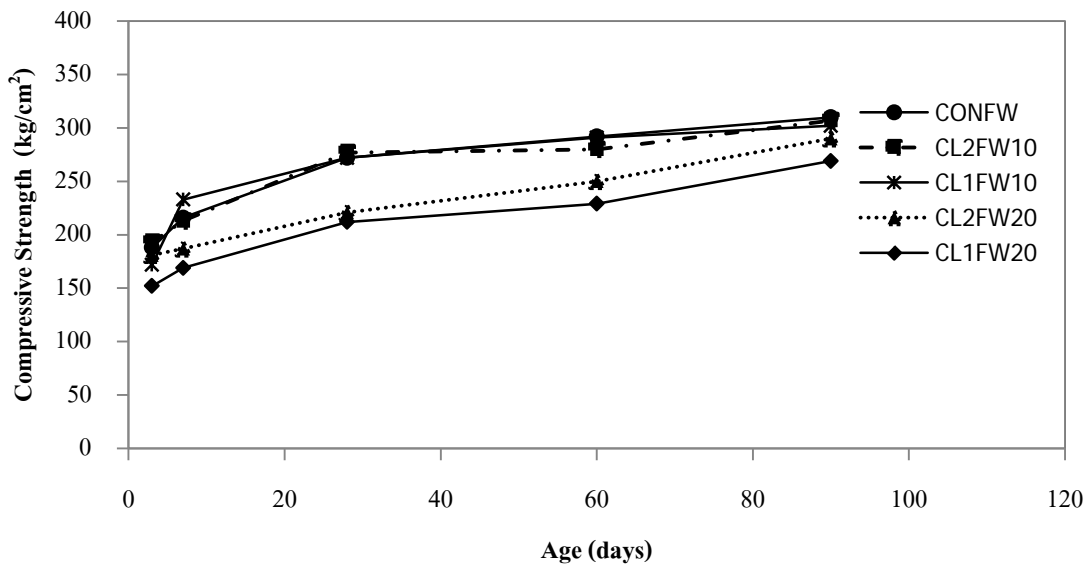
รูปที่ 4.9 กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

รูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 พบว่า มอร์ตาร์มาตรฐาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (ตัวอย่าง URHFW20) และมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดทุกอายุการทดสอบ โดยที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (ตัวอย่าง GRHFW20) มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (ตัวอย่าง URHFW20) ทุกอายุการทดสอบ

ผลของค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคเล็กลงสามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่าเถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า เนื่องจากอนุภาคที่เล็กลงจะมีผลต่อพื้นที่ผิวที่มากขึ้นเป็นผลทำให้มีพื้นที่ในกรทำปฏิกิริยามากขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

ส่วนมอร์ตาร์ผสมทรายบด จากรูปที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่ของมอร์ตาร์ผสมทรายบดชนิดเดียวกัน จะเห็นว่า ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดลดลง เมื่ออัตรา การแทนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 และ CL2 ในอัตราการแทนที่ ร้อยละ 20 ทุกอายุการทดสอบมีแนวโน้มต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อ กำหนดค่าการไหลคงที่ สำหรับในส่วน of ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 และ CL2 ใน

อัตราทดแทนที่ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งให้ผลแตกต่างกับมอร์ต้าร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ เหตุเป็นเช่นนี้อาจเป็นไปได้ว่า เนื่องจากมอร์ต้าร์เมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ มีค่าอัตราส่วน w/c ต่ำกว่ามอร์ต้าร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่และจากการอัตราทดแทนที่ทรายบดในปูนซีเมนต์ปริมาณน้อยร้อยละ 10 จึงส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดเพียงเล็กน้อยจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ที่ทำให้กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน มอร์ต้าร์ผสมทรายบดร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

4.2.6 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

ตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุพอโซลานของเถ้าแกลบสามารถวัดได้โดยการทดสอบค่าดัชนีกำลัง โดยใช้การทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าดัชนีกำลัง คือ ค่ากำลังอัดที่ทดสอบได้เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ URHFW20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 49 และ 47 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C618 [8] กำหนดไว้ คือ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) พบว่า เมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ GRHFF20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าร้อยละ 88 และ 82 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [8] กำหนดไว้คือ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน แสดงว่าเถ้าแกลบ

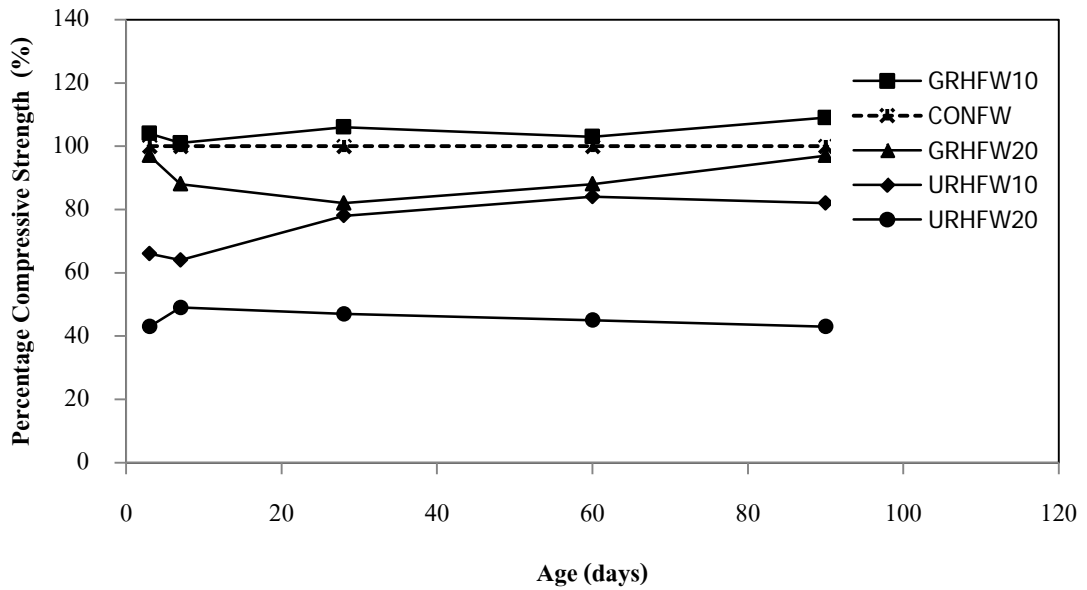
บดละเอียด (GRH) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอชโซลานที่ดี จะเห็นว่าค่าดัชนีกำลังของเก้าแถบ บดละเอียดให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานครั้งที่

ตัวอย่างมอร์ตาร์	ร้อยละของกำลังอัด (%)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CONFW	100	100	100	100	100
URHFW10	66	64	78	84	82
URHFW20	43	49	47	45	43
GRHFW10	104	101	106	103	109
GRHFW20	97	88	82	88	97
CL1FW10	91	108	100	100	97
CL1FW20	81	78	78	78	87
CL2FW10	103	99	102	96	99
CL2FW20	96	87	81	86	94

4.2.7 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานครั้งที่

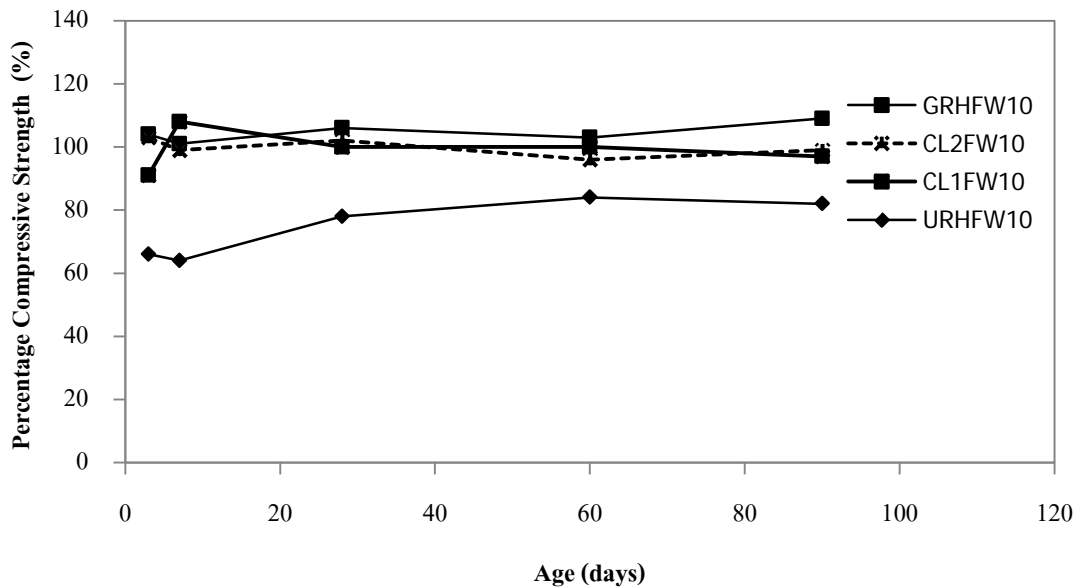
รูปที่ 4.11 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเก้าแถบไม่บด และ มอร์ตาร์ผสมเก้าแถบบดละเอียดกับอายุของมอร์ตาร์ ร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานครั้งที่ จะเห็นว่า ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเก้าแถบไม่บด ตัวอย่าง URHFW10, ตัวอย่าง URHFW 20 และมอร์ตาร์ผสมเก้าแถบบดละเอียด ตัวอย่าง GRHFW20 ทุกอายุการทดสอบ มีค่าต่ำกว่าร้อยละร้อย ส่วนมอร์ตาร์ผสมเก้าแถบบดละเอียด ตัวอย่าง GRHFW10 มีค่าเกินกว่าร้อยละร้อยทุกอายุการทดสอบซึ่งค่าร้อยละที่สูงเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงเก้าแถบบดละเอียดมีปฏิกิริยาพอชโซลานที่สูง



รูปที่ 4.11 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด
เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

รูปที่ 4.12 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ พบว่า ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสม ทรายบด CL1 และ CL2 ซึ่งเป็นวัสดุไม่ละลายในกรดและด่างทั้ง 2 ชนิด ที่อายุหลังจาก 28 วัน มีค่า ใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่

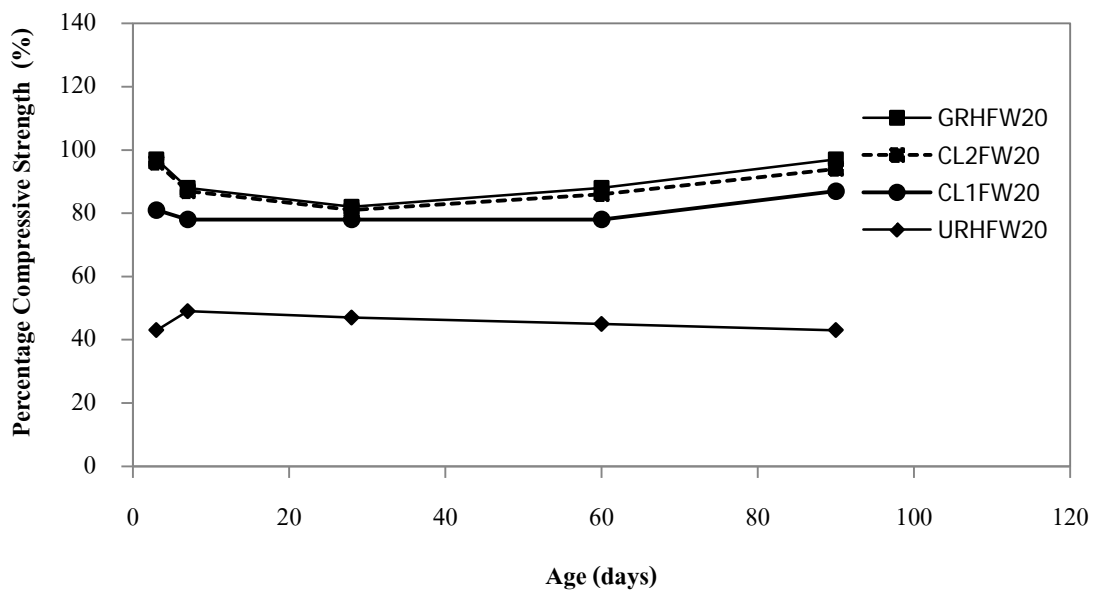
เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ โดยเปรียบเทียบค่าความ แตกต่างร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบดที่มีขนาดอนุภาค เท่ากัน พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบไม่บดมีค่าร้อยละของกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 และมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีค่าร้อยละของกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 แสดงว่า เถ้าแกลบไม่บดการพัฒนา กำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับ เถ้าแกลบบดละเอียดที่มีการพัฒนา กำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่



รูปที่ 4.12 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 10 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

รูปที่ 4.13 แสดงค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ พบว่า ค่าร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 สูงกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 เล็กน้อย เพราะ ขนาดอนุภาคของทรายบด CL2 มีขนาดเล็กกว่าทรายบด CL1 จึงสามารถอุดช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์ได้ดีกว่า ส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าแกลบ โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ ไม่พบมีค่าร้อยละของกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL1 และมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีค่าร้อยละของกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 แสดงว่า เถ้าแกลบ ไม่เกิดการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับเถ้าแกลบบดละเอียดที่มีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมอร์ตาร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่



รูปที่ 4.13 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ และมอร์ตาร์ผสมทรายบด ร้อยละ 20

เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

4.2.8 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของกำลังอัดมอร์ตาร์ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

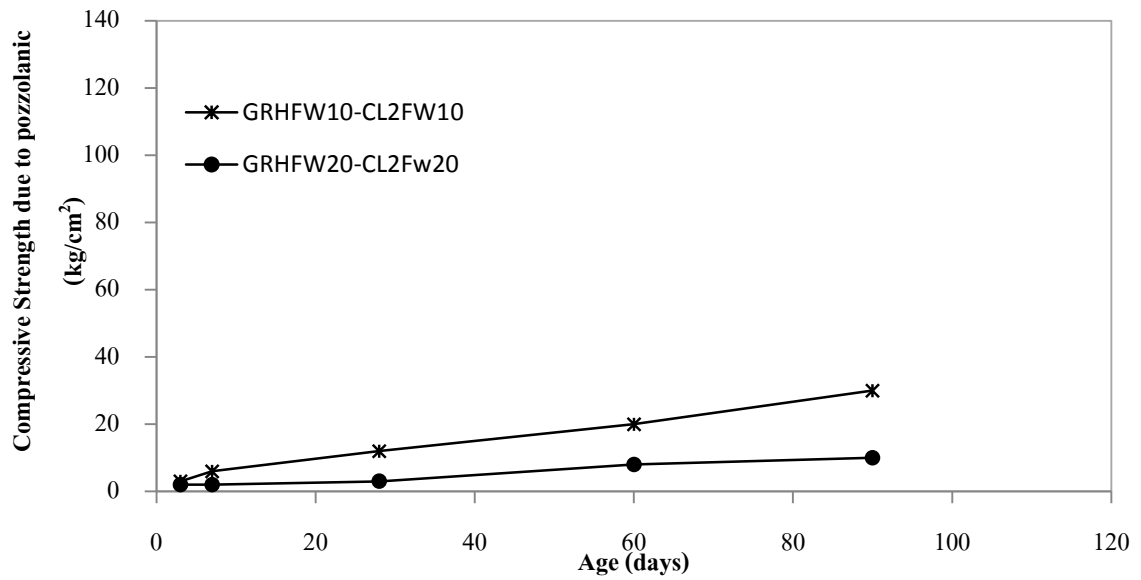
การวิเคราะห์ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานจะพิจารณาเฉพาะมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เท่านั้น เนื่องจากเถ้าแกลบ GRH มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [3] ซึ่งแสดงว่า เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี โดยการนำกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เป็นวัสดุปอซโซลานเทียบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบด CL2 เป็นวัสดุไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากความเป็นผลึกสูง ผลต่างของกำลังอัดที่เกิดขึ้น คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงอย่างเดียว จากตารางที่ 4.7 มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ตัวอย่าง GRHFW10 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 196, 219, 289, 300 และ 337 kg/cm² ตามลำดับ เทียบกับมอร์ตาร์ผสมทรายบด (CL2) ตัวอย่างมอร์ตาร์ CL2FW10 มี ค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 193, 213, 277, 280 และ 307 kg/cm² ตามลำดับ ผลต่างของค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ GRHFW10 หักออกจากมอร์ตาร์ CL2FW10 (GRHFW10-CL2FW10) คือ ค่ากำลังอัดของปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเท่ากับ 3, 6, 12, 20 และ 30 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และตัวอย่างมอร์ตาร์ GRHFW20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ

3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 183, 189, 224, 258 และ 300 kg/cm² ตามลำดับ เทียบกับมอร์ต้าร์ผสมทรายบด (CL2) ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CL2FW20 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 181, 187, 221, 250 และ 290 kg/cm² ตามลำดับ ผลต่างของ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ GRHFW20 หักออก จากมอร์ต้าร์ CL2FW20 (GRHFW20-CL2FW20) คือ ค่ากำลังอัดของปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเท่ากับ 2, 2, 3, 8 และ 10 kg/cm² ที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบ
เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (kg/cm ²)				
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
GRHFW10 – CL2FW10	3	6	12	20	30
GRHFW20 – CL2FW20	2	2	3	8	10

จากรูปที่ 4.14 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ที่หักค่าการอัดตัวอนุภาคและปฏิกิริยาไฮเดรชันออก จะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น โดยที่การแทนที่ร้อยละ 10 จะให้ค่าปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 ซึ่งให้ผลแตกต่างกับมอร์ต้าร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ เนื่องจากอัตราส่วน w/c ของมอร์ต้าร์เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ ประกอบกับเถ้าแกลบมีการดูดน้ำสูงและมีความแข็งแรงน้อยกว่าทรายบด การแทนที่เถ้าแกลบมากขึ้นจึงมีผลทำให้มอร์ต้าร์มีความพรุนเพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ ผลต่างของค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดกับมอร์ต้าร์ผสมทรายบดมีค่าลดลงจากการแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่



4.3 คุณสมบัติคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบในครั้งนี้ประกอบด้วย ความหนาแน่น (Density) กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (Permeability of Concrete) ซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

4.3.1 ผลกระทบเนื่องจากความหนาแน่น

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 kg/cm^2 พบว่า คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา (CON-N) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ $2,377 \text{ kg/m}^3$ แต่เมื่อทำการหล่อแบบอัดความดัน (CON-P) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ $2,484 \text{ kg/m}^3$ จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน เท่ากับ 107 kg/m^3 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.50 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต (URH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น จากการหล่อแบบอัดความดัน (URH10-SP-P) เท่ากับ 111 kg/m^3 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.71 และตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (URH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (URH20-SP-P) เท่ากับ 169 kg/m^3 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.20 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต (GRH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH10-SP-P) เท่ากับ 166 kg/m^3 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.05 และตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (GRH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH20-SP-P) เท่ากับ 146 kg/m^3 หรือเพิ่มขึ้น ร้อยละ 6.16 จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 kg/cm^2 ของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON) ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตรา ร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการหล่อแบบอัดความดันมีผลทำให้มวลรวม อยู่ชิดกันมากขึ้นช่องว่างระหว่างมวลรวมนี้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 26] พบว่า เมื่อมวลรวม อยู่ชิดกันมากๆ ความหนาแน่นก็ย่อมเพิ่มสูงขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบเทียบกับความแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน จะเห็นว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ GRH ร้อยละ 10 เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ GRH มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ การแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นต่ำลง ส่วนคอนกรีตที่มี

การแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ URH ร้อยละ 10 เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ URH มีค่า Slump น้อย การหล่อคอนกรีตให้แน่นด้วยแบบหล่อธรรมดาทำได้ค่อนข้างยาก การแทนที่เถ้าแกลบ URH ในปริมาณมากขึ้นความหนาแน่นจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าผลต่างของความหนาแน่นของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดากับการหล่อแบบอัดความดันมีค่าสูงขึ้นจากการแทนที่เถ้าแกลบ URH เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าการยุบตัวและการเปรียบเทียบน้ำหนักของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	ค่าการยุบตัว (cm)	หน่วยน้ำหนักเฉลี่ย (kg/m ³)	ผลต่าง (kg/m ³)	เพิ่มขึ้น (%)
CON-N	10.30	2,377	107	4.50
CON-P		2,484		
URH10-SP-N	11.70	2,358	111	4.71
URH10-SP-P		2,469		
URH20-SP-N	7.50	2,348	169	7.20
URH20-SP-P		2,517		
GRH10-SP-N	12.10	2,356	166	7.05
GRH10-SP-P		2,522		
GRH20-SP-N	8.90	2,369	146	6.16
GRH20-SP-P		2,515		

4.3.2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตารางที่ 4.11 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) มี กำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 264 และ 356 kg/cm² ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตมาตรฐานภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน (CON-P) มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 371 และ 526 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 141 และ 148 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต (CON-P) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N)

ตารางที่ 4.11 กำลังอัดประลัยและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีต	กำลังอัด (kg/cm ² – (%))							
	7 วัน		28 วัน		60 วัน		90 วัน	
CON-N	264	(100)	290	(100)	329	(100)	356	(100)
CON-P	371	(141)	413	(142)	465	(141)	526	(148)
URH10-SP-N	264	(100)	287	(99)	329	(100)	360	(101)
URH10-SP-P	366	(139)	431	(149)	460	(140)	521	(146)
URH20-SP-N	258	(98)	286	(99)	327	(99)	352	(99)
URH20-SP-P	360	(136)	411	(142)	464	(141)	521	(146)
GRH10-SP-N	269	(102)	328	(113)	341	(104)	363	(102)
GRH10-SP-P	376	(142)	461	(159)	490	(149)	534	(150)
GRH20-SP-N	271	(103)	336	(116)	346	(105)	368	(103)
GRH20-SP-P	380	(144)	470	(162)	491	(149)	545	(153)

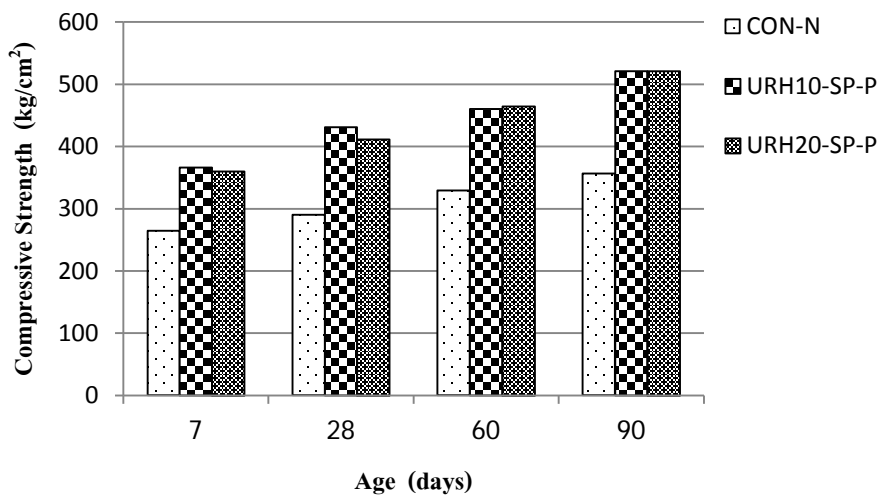
หมายเหตุ : การเทียบร้อยละของกำลังอัดเทียบจากกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N

ส่วนคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N และ URH20-SP-N มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 258 และ 360, 352 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 98 และ 101, 99 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-N และ GRH20-SP-N มีกำลังอัด ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 269, 271 และ 363, 368 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 102, 103 และ 102, 103 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ จะเห็นว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับ CON-N เนื่องจากการควบคุมค่า Slump ของการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใช้สารลดน้ำพิเศษ เพื่อควบคุมอัตราส่วน w/c ให้เท่าเดิม และจากอัตราการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่น้อยไม่เกินร้อยละ 10 จึงส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดเพียงเล็กน้อยจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดซึ่งเป็นวัสดุเนื้อมีความเป็นผลึกสูงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีแทนที่ในปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยจะทำให้กำลังอัดลดลงเล็กน้อย [31] และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลง [30] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH20-SP-N กับตัวอย่างคอนกรีต CON-N พบว่า ค่ากำลังอัดของ URH20-SP-N ทุกอายุการทดสอบมีทิศทางต่ำกว่าตัวอย่าง CON-N จะเห็นได้ว่า การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากขึ้นจากการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงมาก ส่วนของกำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่มากพอที่จะสามารถชดเชยกำลังอัดในส่วนที่หายไป ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พบว่า มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น [40] และคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละที่มากขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง [30]

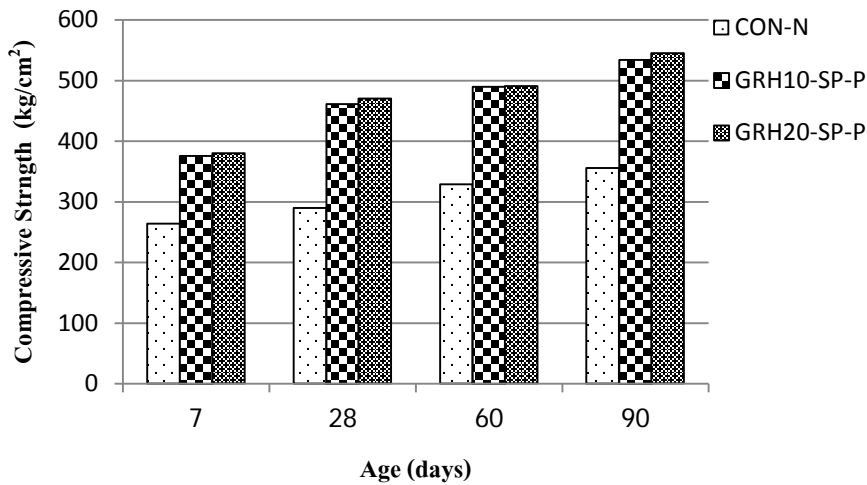
เมื่อทำการหล่อคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 366, 360 และ 521, 521 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 139, 136 และ 146, 146 ของคอนกรีตมาตรฐาน(CON-N) ตามลำดับ และค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 376, 380 และ 534, 545 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 142, 144 และ 150, 153 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N)

ตามลำดับ แสดงว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบชนิดเดียวกันในอัตราการแทนที่เท่ากันของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N, URH20-SP-N, GRH10-SP-N, GRH20-SP-N ซึ่งเป็นไปทิศทางเดียวกับตัวอย่างคอนกรีต CON-P

ผลกำลังอัดคอนกรีตข้างต้น แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาเพราะเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้ความดัน มีผลทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 26] พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้การหล่อที่มีแรงดันบีบอัด เพราะทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้น



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (URH)

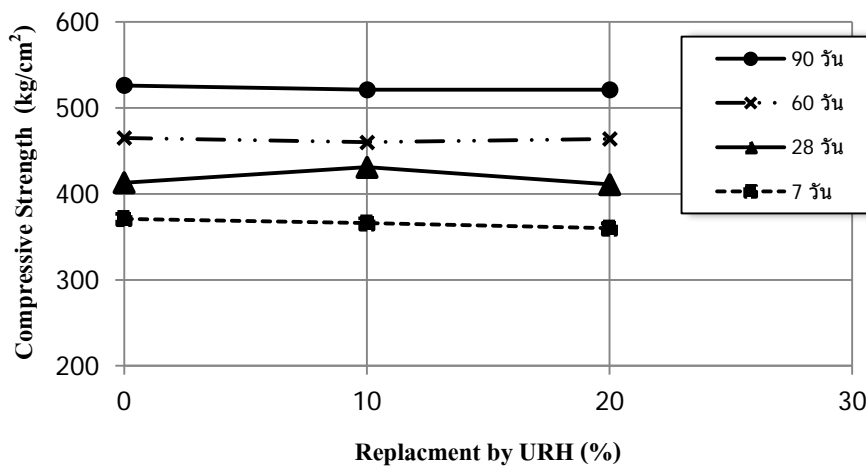


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (GRH)

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา กับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ที่หล่อแบบอัดความดัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐาน โดยกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 366, 360 และ 356, 521, 521 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 139, 136 และ 100, 146, 146 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา กับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ที่หล่อแบบอัดความดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตมาตรฐาน โดยกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 376, 380 และ 356, 534, 545 kg/cm² หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 142, 144 และ 100, 150, 153 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ URH และ GRH ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณร้อยละ 10 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานแบบหล่อธรรมดา จากผลที่ได้เห็นได้ว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงโดยเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 40 ซึ่งมีแนวโน้มสามารถพัฒนาให้คอนกรีตใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ได้เพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงและลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมโดยที่กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่าเดิม สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า การหล่อคอนกรีตภายใต้แรงดัน

จะสามารถลดปูนซีเมนต์ลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัด เท่ากับ 400 kg/cm^2 ใช้แบบหล่อธรรมดาจะมีค่ากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดเท่ากับ 300 kg/cm^2 ใช้แบบหล่ออัดความดัน ผลที่ได้สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น โดยไม่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่ม

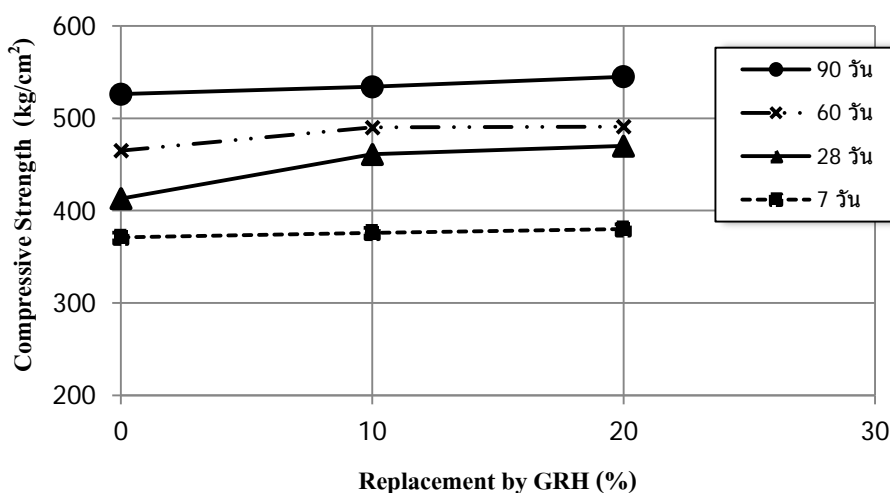
4.3.3 ผลกระทบร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

จากรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P และ URH20-SP-P มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง CON-P ถึงแม้ว่าเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงมาก [3] จากการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ทำให้กำลังอัดลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไป แต่กำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นและการหล่อแบบอัดความดันสามารถชดเชยกำลังอัดได้เพียงพอทำให้มีค่าไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P กับ URH20-SP-P พบว่า ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน กำลังอัดของ URH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P อยู่เล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ในปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด

มากนักและยังมีกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้น จึงเป็นผลทำให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่ที่อายุ 60 วันขึ้นไป กำลังอัดของ URH10-SP-P และ URH20-SP-P มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน เป็นผลได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นยังไม่มาก เนื่องจากเถ้าแกลบไม่บดมีอนุภาคใหญ่ การแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้ปูนซีเมนต์ลดลง ค่ากำลังอัดจึงต่ำลงและเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วันขึ้นไป กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้ การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 จึงสามารถพัฒนากำลังอัดได้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2] การพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีการพัฒนาช้า แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะพัฒนากำลังมากขึ้นและยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุปอซโซลานด้วย คือวัสดุละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

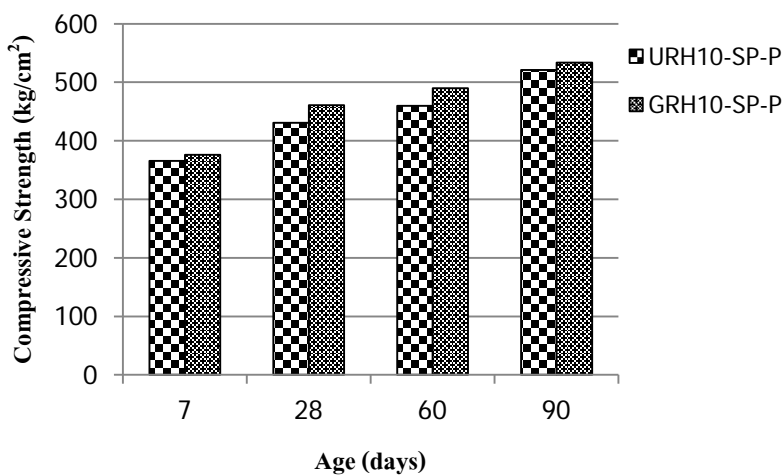


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

จากรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P และ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า CON-P เนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบทำให้

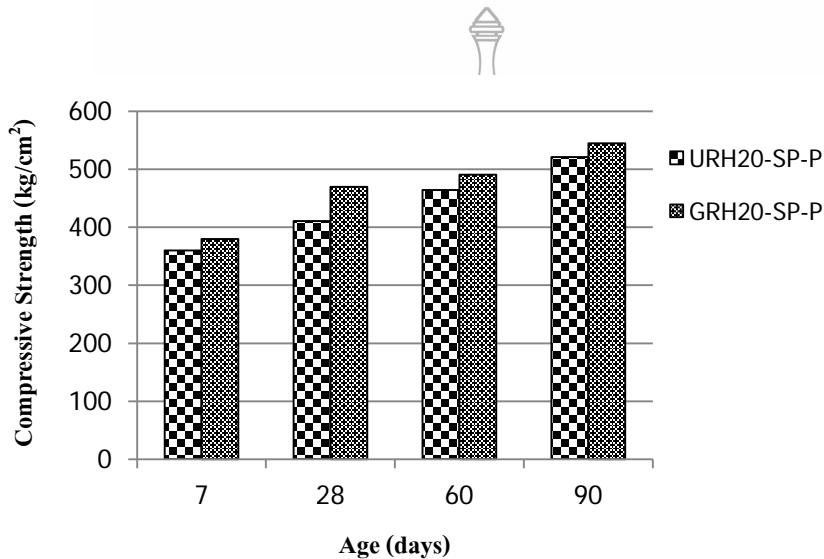
สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้นและเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบละเอียด (GRH) ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P กับ GRH20-SP-P พบว่า ค่ากำลังอัดของ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า GRH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ แสดงว่า การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบละเอียด (GRH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 มีกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นสูงกว่ากำลังอัดที่สามารถชดเชยจากการลดลงของปูนซีเมนต์ได้จึงทำให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่า การใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ซึ่งกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ

4.3.4 ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

จากรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสม
 ใ้แก่ลบร้อยละ 10 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยใ้แก่ลบไม่บด
 (URH10-SP-P) และใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH10-SP-P) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 พบว่า กำลังอัด
 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจาก
 ใ้แก่ลบบดละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและสามารถอุดช่องว่างภายใน
 เนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ใ้แก่ลบร้อยละ 20

และจากรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสม
 ใ้แก่ลบร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยใ้แก่ลบไม่บด
 (URH20-SP-P) และใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH20-SP-P) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 20 พบว่า กำลังอัด
 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P ทุกอายุการทดสอบซึ่งเป็นไปในทิศทาง
 เดียวกันกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมใ้แก่ลบร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ทำการหล่อ
 แบบอัดความดัน ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH) สามารถพัฒนากำลังอัดได้
 สูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่ใ้แก่ลบไม่บด (URH) เนื่องจากความละเอียดของใ้แก่ลบทำให้สามารถ
 ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์
 เพสต์ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ใ้แก่ลบบดละเอียด
 มีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ที่ส่วนผสมเดียวกันคอนกรีตผสมใ้แก่ลบบดละเอียดมีกำลังอัดที่อายุ
 ตั้งแต่ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา [17] และกำลังของมอร์ตาร์ที่มีใ้แก่ลบนหินผสมอยู่จะ

ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเก้าอี้กันดิน โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันดินละเอียดที่สุดให้กำลังอัดสูงสุด ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าอี้กันดินขนาดหยาบที่สุดจะให้กำลังอัดต่ำสุด [7]

4.3.5 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและร้อยละของคอนกรีต ซึ่งสามารถนำกำลังอัด ความละเอียดของเก้าอี้กันดินและร้อยละการแทนที่ เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ

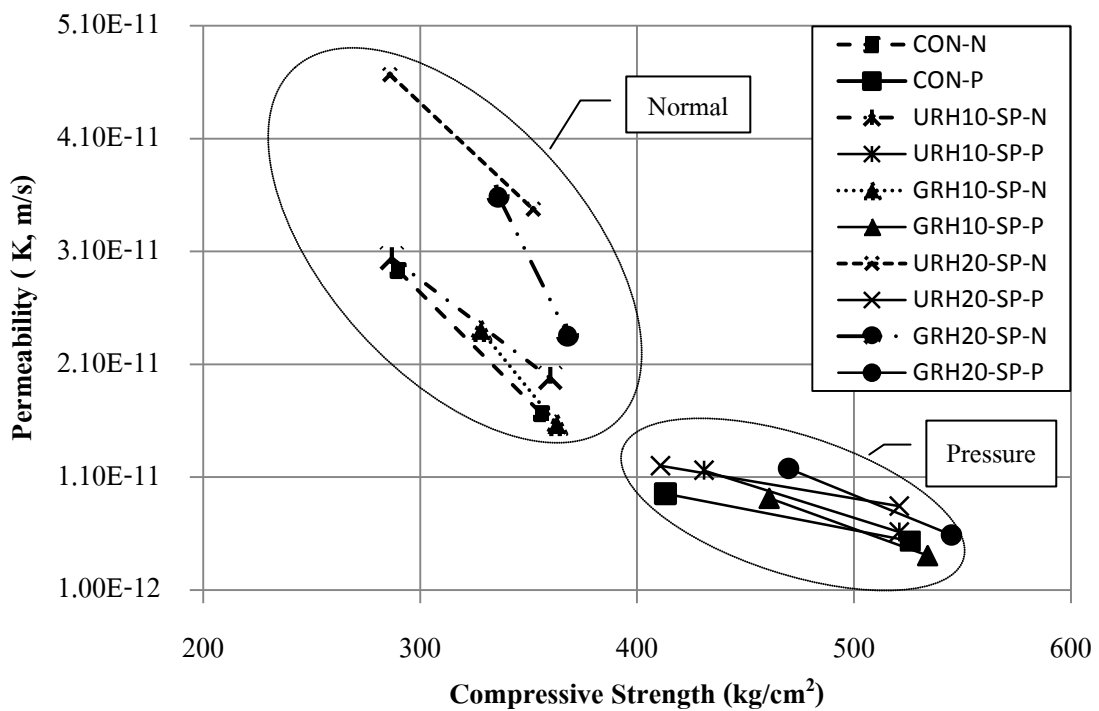
Sample	Coefficient of Permeability (K, m/s)	
	(Percentage of Coefficient Permeability, %)	
	28 วัน	90 วัน
CON-N	2.927215E-11 (100)	1.66067E-11 (100)
CON-P	9.53135E-12 (33)	5.33536E-12 (32)
URH10-SP-N	3.039E-11 (104)	1.9777E-11 (119)
URH10-SP-P	1.15722E-11 (40)	6.11037E-12 (37)
URH20-SP-N	4.66896E-11 (160)	3.47567E-11 (209)
URH20-SP-P	1.19882E-11 (41)	8.41879E-12 (51)
GRH10-SP-N	2.40179E-11 (82)	1.56725E-11 (94)
GRH10-SP-P	9.12617E-12 (31)	4.04696E-12 (24)
GRH20-SP-N	3.58945E-11 (123)	2.35793E-11 (142)
GRH20-SP-P	1.17529E-11 (40)	5.85859E-12 (35)

4.3.6 ผลกระทบของกำลังอัดต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าอี้กันดินร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานกับค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาของตัวอย่าง CON-N, URH10-SP-N, URH20-SP-N, GRH10-SP-N, GRH20-SP-N และคอนกรีตที่หล่อแบบอัดความดัน

ของตัวอย่าง CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลง

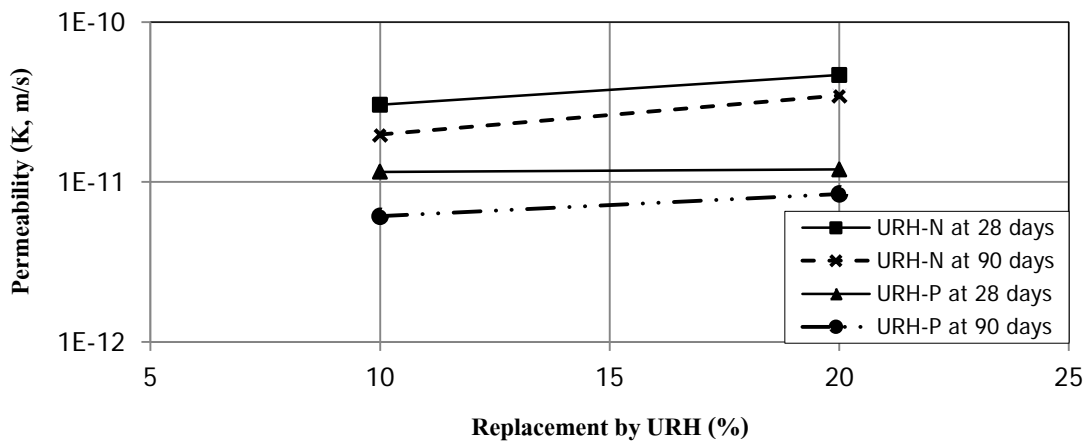
เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่หล่อแบบอัดความดัน พบว่า คอนกรีตมาตรฐาน คอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เมื่อทำการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันสามารถพัฒนาค่ากำลังอัดได้เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตชนิดเดียวกันมีค่าลดลงต่ำกว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา เนื่องจากคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดันมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ยึดมวลรวมได้แน่นมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีแนวโน้มของค่าการซึมผ่านน้ำลดลงเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น [18] และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเมื่อมีกำลังอัดสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดต่ำลง [42]



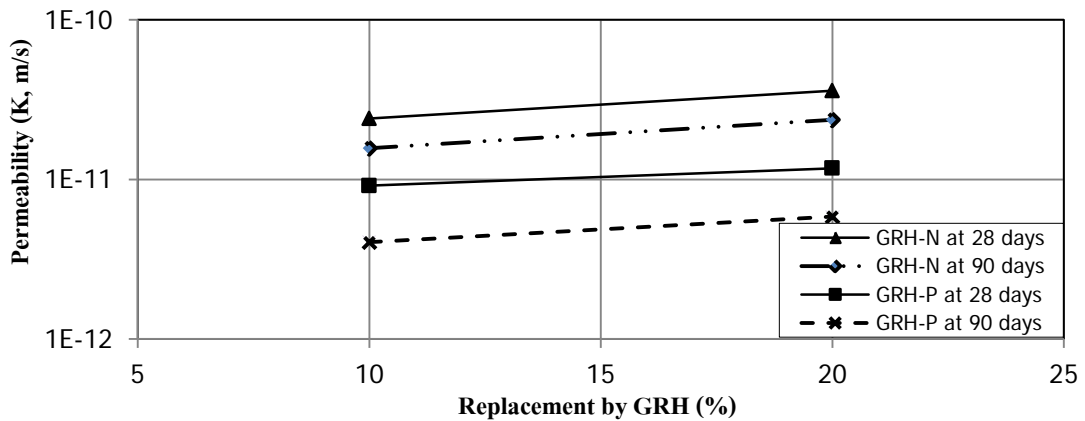
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

4.3.7 ผลกระทบของความละเอียดและร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย
 ใ้แก่ลบต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยใ้แก่ลบต่อ
 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาและการหล่อแบบอัดความดัน
 จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยใ้แก่ลบกับ
 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมใ้แก่ลบไม่บด (URH) และ จากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์
 ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยใ้แก่ลบกับค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสม
 ใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมใ้แก่ลบไม่บด
 (URH) และ ใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH) มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อคอนกรีตแทนที่
 ด้วยใ้แก่ลบในปูนซีเมนต์ปริมาณมากขึ้นจากการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ส่งผลให้คอนกรีต
 มีค่าการซึมผ่านน้ำสูงขึ้น เนื่องจากใ้แก่ลบเป็นวัสดุที่มีความพรุนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปริมาณ
 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตผสมใ้แก่ลบมีความพรุนสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า
 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้แก่ลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 มีค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต
 มากกว่าคอนกรีตควบคุม แต่คอนกรีตที่มีปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 ให้ค่าการซึมผ่านใกล้เคียงกับ
 คอนกรีตควบคุมสภาวะปกติ [18] และการแทนที่ใ้แก่ลบนหินซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานในปริมาณสูงขึ้น
 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้น [42]

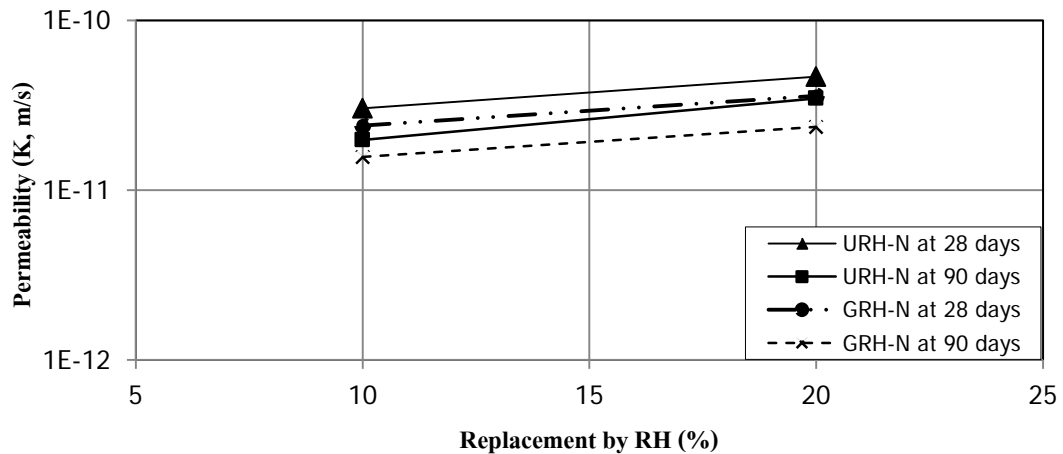


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้แก่ลบ (URH)
 กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

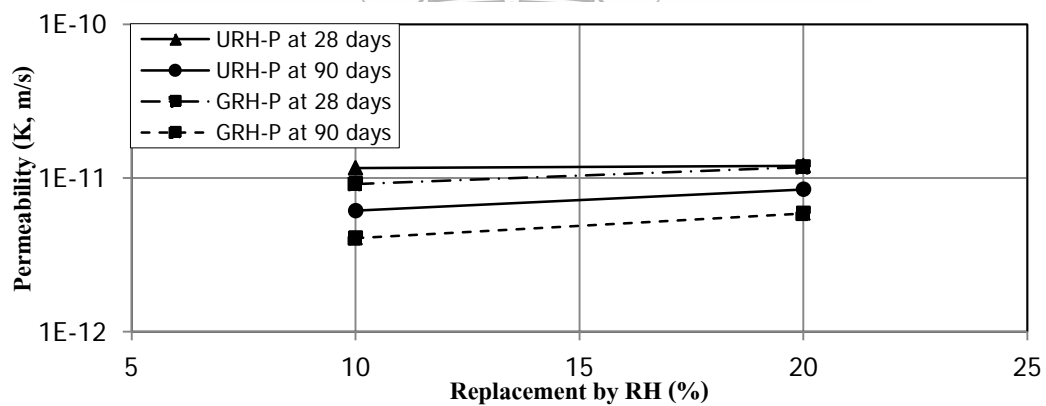


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (GRH) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าแกลบที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาและการหล่อแบบอัดความดัน จากรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ URH และ GRH พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียด (GRH) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ทุกอัตราทดแทนที่และทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากการที่เถ้าแกลบละเอียดมีอนุภาคขนาดเล็กจึงสามารถเข้าไปแทรกตามช่องว่างของคอนกรีตได้ดีกว่าทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [42] การปรับปรุงขนาดของอนุภาคเถ้าถ่านหินให้เล็กลงมีผลทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดลง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้แบบหล่อธรรมดา

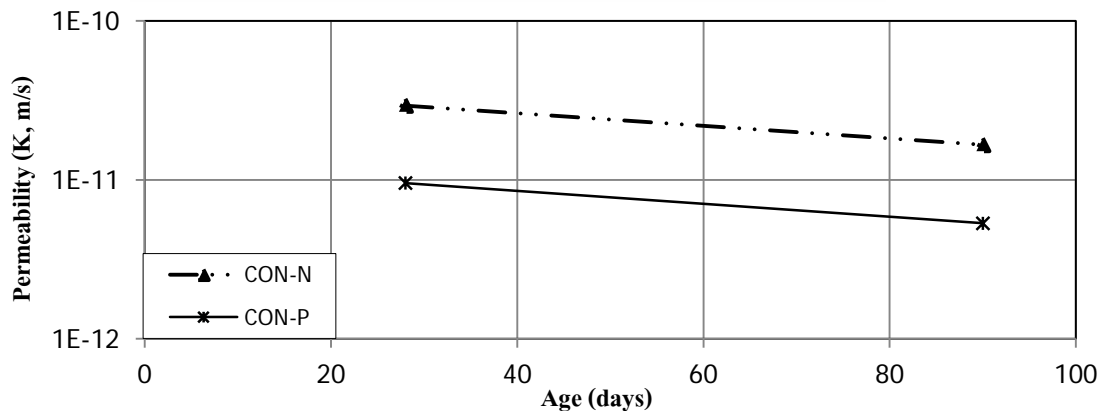


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

4.3.8 ผลกระทบของอายุการบ่มต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐานพบว่า คอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 2.927215×10^{-11} และ 1.66067×10^{-11} m/s ส่วนคอนกรีตมาตรฐานภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน (CON-P) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ลดต่ำลงที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 9.53135×10^{-12} และ 5.33536×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 33 และ 32 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (CON-P) มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ทุกอายุการทดสอบ

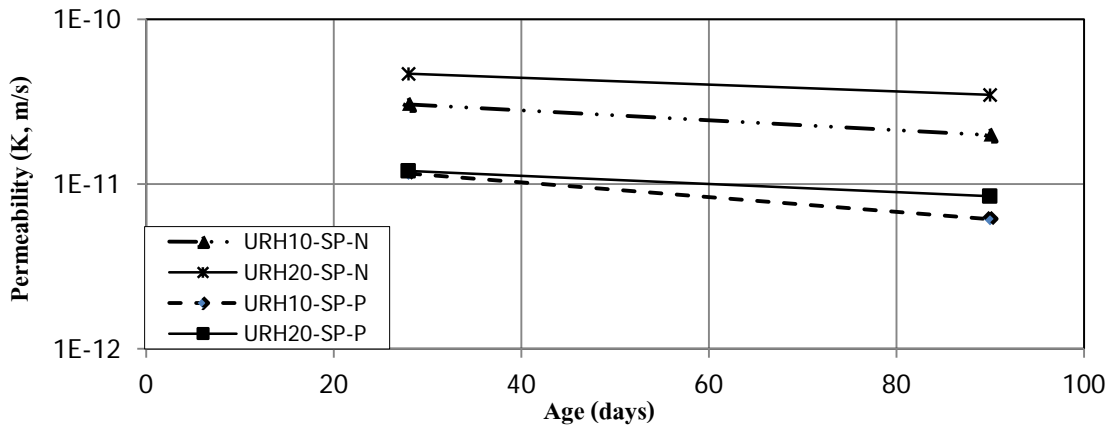


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐาน

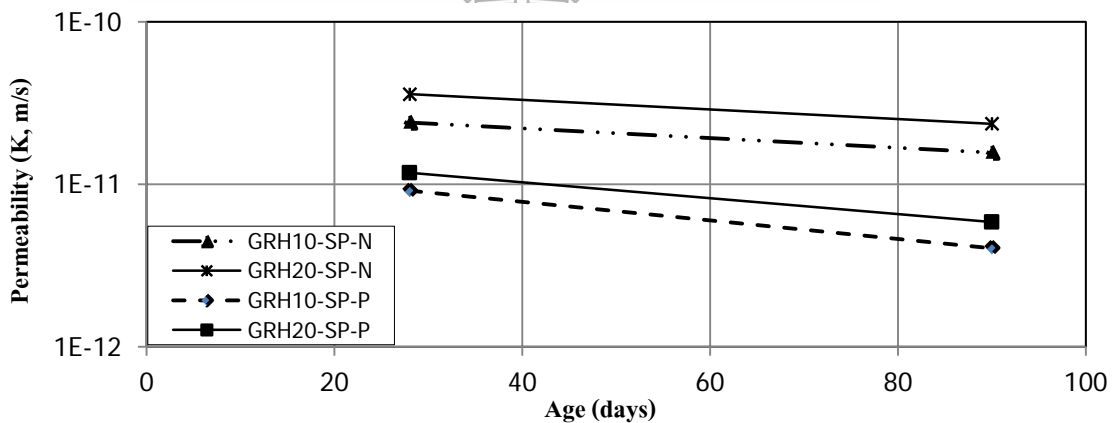
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) พบว่า คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N, URH20-SP-N มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 3.039×10^{-11} , 4.66896×10^{-11} m/s และ 1.9777×10^{-11} , 3.47567×10^{-11} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 104, 160 และ 119, 209 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ เมื่อทำการหล่อคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P มีค่าลดต่ำลง ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 1.15722×10^{-11} , 1.19882×10^{-11} และ 6.11037×10^{-12} , 8.41879×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 40, 41 และ 37, 51 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ GRH พบว่า คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-N, GRH20-SP-N มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 2.40179×10^{-11} , 3.58945×10^{-11} และ 1.56725×10^{-11} , 2.35793×10^{-11} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 82, 123 และ 94, 142 ของคอนกรีตมาตรฐาน

(CON) ตามลำดับ เมื่อทำการหล่อคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าลดต่ำลง ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 9.12617×10^{-12} , 1.17529×10^{-11} และ 4.04696×10^{-12} , 5.85859×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 31, 40 และ 24, 35 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON) ตามลำดับ แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าลดลงตามอายุ การบ่มที่เพิ่มขึ้นโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ ชนิดเดียวกันในอัตราการแทนที่เท่ากันของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N, URH20-SP-N, GRH10-SP-N, GRH20-SP-N ทุกอายุการทดสอบซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างคอนกรีต CON-P

ผลของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำข้างต้น แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมีค่าลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยที่ตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดลงต่ำกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาเพราะเมื่อคอนกรีต อยู่ภายใต้ความดันทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์ในการ ยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนลดลงมีความทึบน้ำสูงขึ้นและมีกำลังอัด เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัย คอนกรีตที่ผสม เถ้าถ่านหินเมื่อมีกำลังอัดสูงขึ้นและอายุบ่มมากขึ้นค่าการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดต่ำลง [42] และ เมื่อบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนลดลง [30]



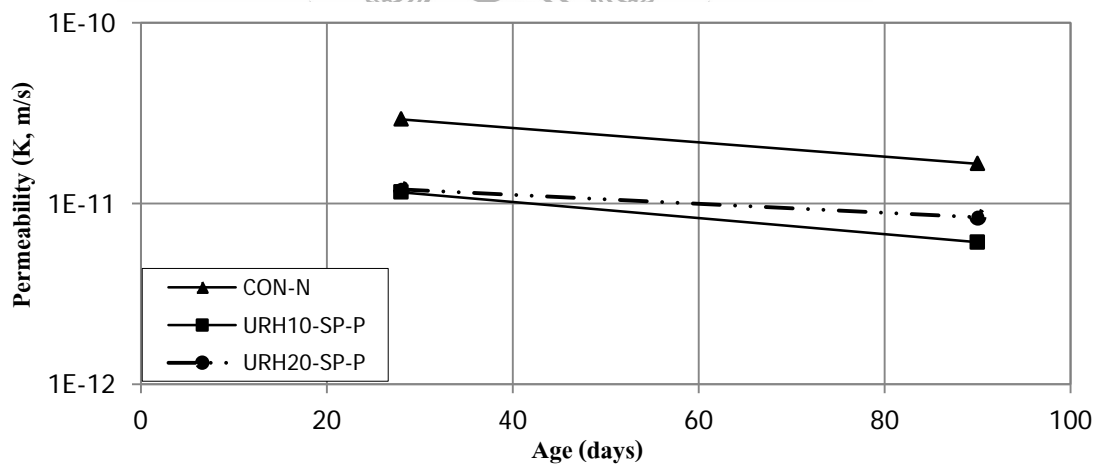
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH)



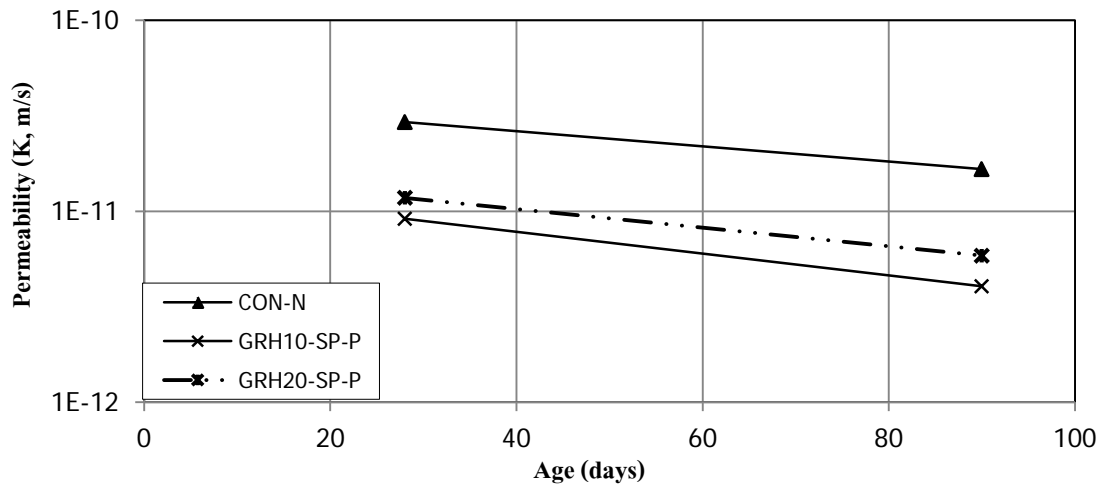
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (GRH)

ผลของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดันเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่หล่อแบบหล่อธรรมดา จากรูปที่ 4.29 เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้แบบหล่อธรรมดาของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) กับการหล่อแบบอัดความดันของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P , URH20-SP-P พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 28 และ 90 วัน

เท่ากับ 2.927215×10^{-11} , 1.15722×10^{-11} , 1.19882×10^{-11} และ 1.66067×10^{-11} , 6.11037×10^{-12} , 8.41879×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 40, 41 และ 100, 37, 51 ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.30 เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้แบบหล่อธรรมดาของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) กับการหล่อแบบอัดความดันของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P, GRH20-SP-P พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบละเอียด (GRH) ทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 2.927215×10^{-11} , 9.12617×10^{-12} , 1.17529×10^{-11} และ 1.66067×10^{-11} , 4.04696×10^{-12} , 5.858585×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 31, 40 และ 100, 24, 35 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ URH และ GRH ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณร้อยละ 10 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันคอนกรีตจะมีความทึบน้ำมากขึ้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานแบบหล่อธรรมดาโดยเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ต่ำลงเป็นกรณีหนึ่งซึ่งถึงแนวโน้มนั้นที่จะสามารถพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบให้มีความทนทานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นเพราะคอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะสามารถทนต่อการเสื่อมสภาพต่างๆ ได้ดี



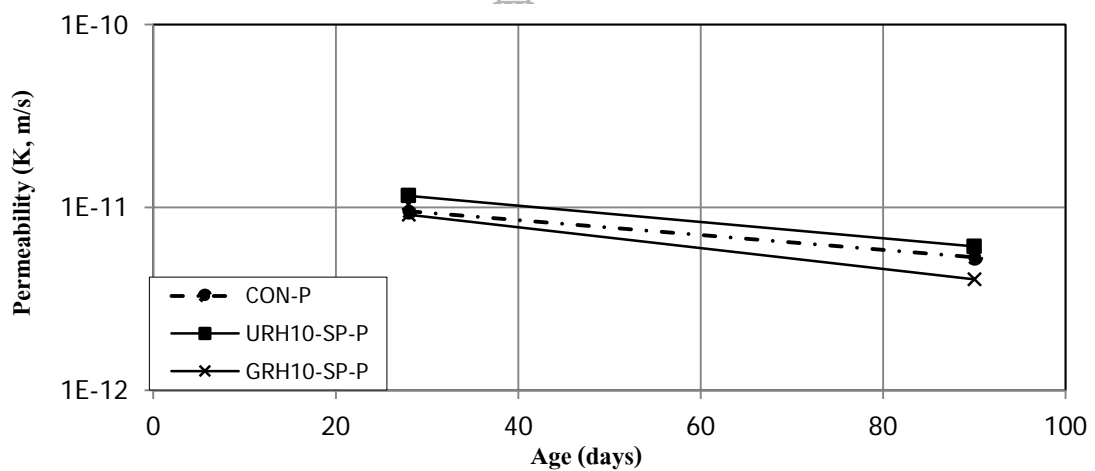
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH)



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (GRH)

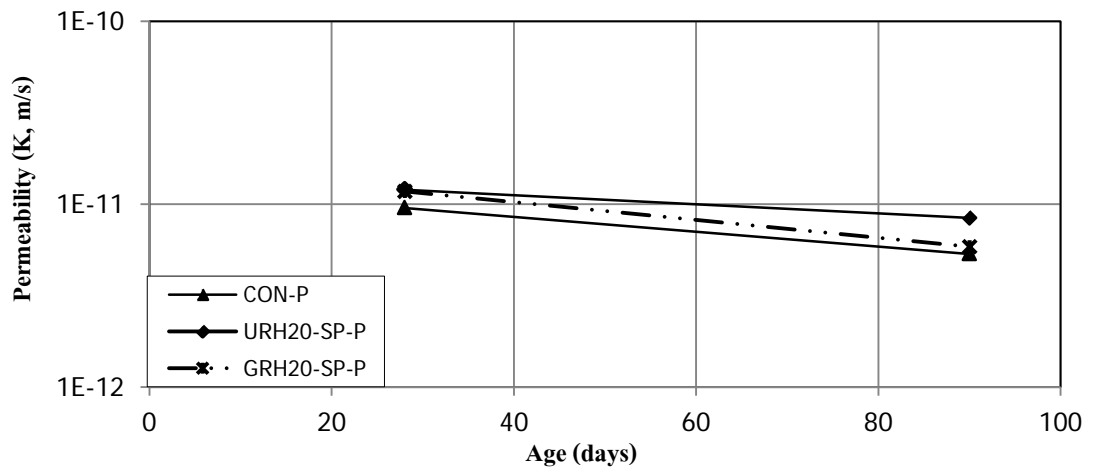
ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดัน จากรูปที่ 4.31 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) กับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, GRH10-SP-P พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P มีค่าต่ำกว่า CON-P, URH10-P ทุกอายุการทดสอบ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P มีค่าสูงกว่า CON-P, GRH10-P ทุกอายุการทดสอบ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, GRH10-SP-P ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 9.53135×10^{-12} , 1.15722×10^{-11} , 9.12617×10^{-12} และ 5.33536×10^{-12} , 6.11037×10^{-12} , 4.04696×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 33, 40, 31 และ 32, 37, 24 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.32 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) กับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราร้อยละ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH20-SP-P, GRH20-SP-P พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต URH20-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า CON-P ทุกอายุการทดสอบ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH20-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 9.53135×10^{-12} , 1.19882×10^{-11} , 1.17529×10^{-11} และ 5.33536×10^{-12} , 8.41879×10^{-12} , 5.85859×10^{-12} m/s หรือคิดเป็นร้อยละ 33, 41, 40 และ 32, 51, 35 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่ทำการหล่อ

แบบอัดความดันการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงสุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH20-SP-P ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากเถ้าแกลบบดละเอียดสามารถเข้าไปแทนที่ในช่องว่างซีเมนต์เพสต์ จนเกิดความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นการแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมจึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำต่ำสุด สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [42] การปรับปรุงขนาดของอนุภาคเถ้าถ่านหินให้เล็กลงมีผลทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดลง



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) ในอัตราร้อยละ 10





รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (URH) และ (GRH) ในอัตราร้อยละ 20



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

สำหรับการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในครั้งนี้ มีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ส่วนเถ้าแกลบไม่บด (URH) ไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน มาตรฐาน ASTM C 618 ได้

5.1.2 เถ้าแกลบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงขึ้น โดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน

5.1.3 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่ การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 20 มีกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่าในอัตราการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

5.1.4 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงที่ การแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 มีกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่าในอัตราการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20

5.1.5 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) โดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10

5.1.6 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P)

5.1.7 คอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการซึมผ่านน้ำลดต่ำลง

5.1.8 คอนกรีตผสมเถ้าแกลบเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH)

5.1.9 คอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดัน การใช้เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ URH10-SP-P, URH20-SP-P, และ GRH20-SP-P

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบกำหนดอัตราแทนที่โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของวัสดุที่นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำวิจัยต่อไปควรพิจารณาถึงค่าความถ่วงจำเพาะและปริมาตรของวัสดุที่นำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันด้วย

5.2.2 ในงานวิจัยนี้การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ใช้ทรายแม่น้ำซึ่งมีเหลี่ยมมุมในส่วนผสมของมอร์ตาร์และกำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 2 กรณี คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ เท่ากับ 0.485 และกำหนดค่าการไหลคงที่ เท่ากับ 110 ± 5 ซึ่งเมื่อทำการทดสอบจะมีค่าสัดส่วน w/c แตกต่างกันมาก เพราะตามมาตรฐานเป็นการใช้ทรายออกดิวาซึ่งกรณีใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ เท่ากับ 0.485 จะมีค่าอัตราการไหลอยู่ในช่วง 105-115 แต่ถ้าใช้ทรายอื่นๆ ค่าอัตราการไหลที่ได้จะต่ำกว่า 105-115 ในการวิจัยต่อไปหากมีการใช้ทรายแม่น้ำเป็นส่วนผสมมอร์ตาร์ควรศึกษาโดยใช้อัตราส่วน w/c ทั้ง 2 กรณี ที่มีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานซึ่งเป็นสัดส่วนที่ได้จากการทดสอบมอร์ตาร์มาตรฐานเมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ เท่ากับ 110 ± 5 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมด้วย

5.2.3 ในงานวิจัยนี้เป็นแนวทางเริ่มต้นในการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน โดยการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันจะใส่ปริมาณคอนกรีตให้มีความสูง 11 cm แล้วทำการอัดให้เหลือความสูง 10 cm เพื่อเป็นการควบคุมปริมาตรคอนกรีตให้เท่ากันทุกตัวอย่าง ในการทำวิจัยต่อไปควรศึกษาแรงดันที่ใช้อัดความดันด้วย

บรรณานุกรม

- [1] เดชขจร เจริญรัตนภิรมย์, “GREENCON CRETE คอนกรีตสีเขียวเพื่อสิ่งแวดล้อม,”
วารสารคอนกรีต TCA e-magazine ฉบับที่ 16 ประจำเดือน สิงหาคม 2548.
- [2] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จตุรพิทักษ์กุล, และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล,
“การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวอนุภาค
และปฏิกิริยาปอซโซลานของ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปลาล์มน้ำมัน, ” วารสารวิจัย
และพัฒนา มจร. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2548, หน้า 465 ถึง 475.
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต.
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.) พิมพ์ครั้งที่ 7. 2555.
- [4] V. Sata, J. Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt., 2012, “Effect of W/B ratios on
pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland” Cement & Concrete Composites,
Vol.34, No.1, pp.94-100.
- [5] สุกฤษ มณีรัตน์, ชำนาญกิจ ศิริยานนท์, พิเชษฐ์ สร้อยสำโรง, สมคิด กุลสุวรรณ, นพรัตน์ วิจารณ์
และจตุพล ตั้งปกาศิต, “กำลังอัดของคอนกรีตภายใต้แบบหล่อแบบอัดความดัน,”
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10.
- [6] บริษัท ณรงค์ไมโครสปิน จำกัด. เสาเข็ม Spun Micropile. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก
: www.narongmicrospin.com (วันที่ 29 เมษายน 2559)
- [7] จตุพล ตั้งปกาศิต, “การศึกษาค่าดัชนีกำลังและผลของขนาดเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผสมกับ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,
ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
พ.ศ.2541.
- [8] American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 618 : Standard Specification for
Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in
Portland Cement Concrete,” Annual Book of ASTM Standard., Vol.04.02, Philadelphia,
ASTM, pp. 310-313.
- [9] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 311-00, Standard Test Method for
Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in
Portland-Cement Concrete,” Annual Book of ASTM Standard., Vol.04.02, p. 191-199.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] American Society for Testing and Materials, 2001, "ASTM C 494/C494M-99a : Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete," Annual Book of ASTM Standards., 2001, Vol.04.02, Philadelphia, 261-269.
- [11] Neville, A.M., 1995, Properties of concrete Neville, 4th ed., Malasia, Addison Wesley Longman Limited, p. 657.
- [12] Larrard, F. and Sedran, T., 1994, "Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by The Use of a Packing Model," Cement and Concrete Research, Vol. 24 No. 6, pp.997, 1002, 1006-1007.
- [13] ปานเทพ พัวพงษ์พันธ์, สมพงษ์ บุญศิริ และ วณิช การุณยวนิช, "ผลกระทบของกากที่ไม่ละลายในกรดและต่างต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ไฮโดรลิก," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2535.
- [14] ไมตรี สกฤตติมศักดิ์, ชาญศักดิ์ ลีสัมประสงค์ และ จตุพล ตั้งปกาศิต, 2536, "ผลกระทบของกากทรายที่ไม่ละลายในกรดและต่างต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2536.
- [15] Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. Concrete 2nd ed. New Jersey : Pearson Education, Inc., c2002.
- [16] วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร : ดร.วินิต ช่อวิเชียร, 2544.
- [17] นุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรกร วงศ์คำจันทร์, "พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสม เถ้าแกลบละเอียด," วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2544 .
- [18] ญัฐพงษ์ ลาตบัตร์, มณีรัตน์ องค์กรวรรณี และ สหลาก หอมวุฒิวงศ์. "กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ผ่านการเผา," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การประชุมวิชาการ มหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 10 ,หน้า 1 ถึง 8.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Zhang, M.H., Lastra, R. and Malhotra, V.M., 1996, "Rice-Husk Ash Paste" cement and concrete : Some Aspects of Hydration and Microstructure of the Interfacial Zone between, Vol.26, No.6, PP.963-977.
- [20] Isaia, G.C., Gastadimi, A.L.G. and Morases, R., 2003, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Assitions on the Mechanical Strength of High Performance concrete", cement & conment composer, Vol.25, PP.69-76.
- [21] Glodman, A., and Bentur, A., 1993, "The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 4, pp. 962-972.
- [22] เรืองรุชดี ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 295-310.
- [23] Cheerarot, R., Tangpagasit, J., and Jaturapitakkul, C., 2004, "Compressive Strength of Mortars Due to Pozzolanic Reaction of Fly Ash", Fly Ash, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete", Proceedings of The Eighth International Conference, Las Vegas, pp. 411-425.
- [24] Detwiler, R.J. and Mehta., 1989, "Chemical and Physical Effect of Silica Fume on the Mechanical Behavior of concrete", ACI Materials Journal, Vol.86, No.6, PP.609-614.
- [25] นายรัฐพล สมณา. "การศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งผลิตต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์" วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2546.
- [26] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, ชัยรัตน์ วีระวัฒนสุข, กันตพงศ์ พิวิเหลียง, อธิวัฒน์ ผกผ่า และ รัฐพล เจียวิริยะบุญมา, "กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อหล่อตัวภายใต้แรงดันสูง," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, วันที่ 20-22 เมษายน 2549 ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช จังหวัดภูเก็ต. บทความที่ MAT 58.
- [27] สหลาภหอมวุฒิวงศ์, "ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต," วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2551-พฤษภาคม 2552, หน้า 46 ถึง 51.
- [28] กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ซาลี, "ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 ม.ค. - เม.ย. 2556, หน้า 29 ถึง 41.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล “การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อย เศษคอนกรีตเก่า” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม 2554, หน้า 369 ถึง 381.
- [30] สุวัฒน์ งามจันทร์, วชิกรณ์ เสนาวัง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึม ของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 20, วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 ณ จังหวัดชลบุรี, หน้า 1 ถึง 6.
- [31] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล “การศึกษา ผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30, ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2550, หน้า 141 ถึง 151.
- [32] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556. คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และคอนกรีต. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในบรมราชูปถัมภ์. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- [33] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188-95 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol.04.01, Philadelphia, 179-180.
- [34] American Society for Testing and Materials, 1995, “ASTM C430-94 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45 Micrometer (No.325) Sieve,” In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp.212-214.
- [35] American Society for Testing and Materials, ASTM C 187-98 : Standard Test Method for Normal Consistens of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol.04.01, Philadelphia, 177-178.
- [36] American Society for Testing and Materials, ASTM C 191-99 : Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol.04.01, Philadelphia, 181-183.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [37] American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 109M-99 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol.04.01, Philadelphia, 83-88.
- [38] American concrete Institute. ACI 211. 1-91 : Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass concrete and ACI 201. 2R-92 : Guide to Durable concrete, ACI Manual of concrete Practice, Part1, Michigan, 2000.
- [39] American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 143-00 : Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol.04.02, Philadelphia, pp.89-91.
- [40] วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวกคุ้ม, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปลัสม์น้ำมัน,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 26 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2546, หน้า 459 ถึง 473.
- [41] American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 150-00 : Standard Specification for Portland Cement,” Annual Book of ASTM Standards., Vol.04.01, Philadelphia, pp. 149-155.
- [42] ดิลก ลูร์ตนะเวช, “ผลกระทบของเถ้าผ่านหินจาก 5 แหล่ง ที่มีต่อค่าการซึมผ่านน้ำ ของคอนกรีต,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของมอร์ตาร์

ภาคผนวก ค คุณสมบัติของคอนกรีต

ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา



ตารางที่ ก.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ตามมาตรฐาน ASTM C188 [33]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. จีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mL	0.5	0.5
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, °C	26	26
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก, g	331.7	332.1
4. จีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mL	20.8	22.3
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °C	26	26
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, g	396	401.8
7. น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้, g	64.3	69.7
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกลบแทนที่, mL	20.3	21.8
9. ความถ่วงจำเพาะ	3.17	3.19
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	3.18	



ตารางที่ ก.2 การหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบไม่บด (URH) ตามมาตรฐาน ASTM C188 [33]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ชีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mL	1	1
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, °C	27	28
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก, g	328.9	329
4. ชีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mL	19.8	20.2
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °C	28	27
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, g	366.3	367.2
7. น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้, g	37.4	38.2
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกลบแทนที่, mL	18.80	19.2
9. ความถ่วงจำเพาะ	1.99	1.99
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	1.99	



ตารางที่ ก.3 การหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบบดละเอียด(GRH)ตามมาตรฐาน ASTM C188 [33]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ชีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก , mL	0.2	0.9
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก , °C	25	25
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก, g	320.7	329.4
4. ชีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง , mL	21.4	19.7
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °C	25	25
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, g	363.2	366.6
7. น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้, g	42.5	37.2
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่, mL	21.2	18.8
9. ความถ่วงจำเพาะ	2.00	1.98
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	1.99	



ตารางที่ ก.4 การหาความถ่วงจำเพาะของทรายชนิด CL1 ตามมาตรฐาน ASTM C188 [33]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ชีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mL	0.7	0.7
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, °C	25	25
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก, g	319	320.3
4. ชีคปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mL	16.9	16.4
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °C	25	25
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, g	363	362.7
7. น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้, g	44	42.4
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกลบแทนที่, mL	16.2	15.7
9. ความถ่วงจำเพาะ	2.72	2.70
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.71	



ตารางที่ ก.5 การหาความถ่วงจำเพาะของทรายชนิด CL2 ตามมาตรฐาน ASTM C188 [33]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ชีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, mL	0.7	0.7
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก, °C	25	25
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก, g	319.7	316
4. ชีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, mL	18.7	19.6
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, °C	25	25
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง, g	368.9	367.2
7. น้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้, g	49.2	51.2
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกลบแทนที่, mL	18	18.9
9. ความถ่วงจำเพาะ	2.73	2.71
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	2.72	



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของมอร์ตาร์ทาร์



ตารางที่ ข.1 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่

ตัวอย่าง มอร์ต้าร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
CONFF	3	159	88	131	72	76	134	110
	7	168	173	180	167	174	176	173
	28	181	211	219	220	220	233	214
	60	224	252	215	210	324	239	244
	90	325	393	298	235	266	277	299
URHFF 10	3	73	87	79	77	91	85	82
	7	137	137	134	134	141	145	138
	28	207	196	178	194	188	189	192
	60	226	221	195	209	204	217	212
	90	226	229	211	204	246	222	223
URHFF 20	3	65	61	60	63	59	70	63
	7	86	125	113	138	124	122	118
	28	187	137	144	198	134	190	165
	60	194	191	192	191	194	190	192
	90	231	268	269	196	309	311	264
GRHFF 10	3	132	127	128	122	129	124	127
	7	178	185	177	176	166	180	177
	28	214	221	219	229	220	205	218
	60	248	278	203	274	273	278	259
	90	310	321	296	299	298	312	306

ตารางที่ ข.1 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลลงที่ (ต่อ)

ตัวอย่าง มอร์ต้าร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
GRHFF 20	3	126	130	130	126	127	129	128
	7	151	149	156	154	155	153	153
	28	174	214	202	218	217	181	201
	60	247	218	242	270	244	249	245
	90	284	292	364	247	294	307	298
CL1FF 10	3	134	125	112	113	127	127	123
	7	136	153	131	168	156	156	150
	28	202	202	187	210	199	200	200
	60	200	225	243	199	254	181	217
	90	277	271	274	267	268	269	271
CL1FF 20	3	103	89	104	91	97	92	96
	7	139	114	146	141	149	127	136
	28	155	153	150	191	140	159	158
	60	214	207	212	226	174	215	208
	90	219	223	194	229	244	193	217
CL2FF 10	3	119	121	125	123	118	126	122
	7	174	169	162	148	169	150	162
	28	196	197	203	200	194	204	199
	60	216	233	227	230	234	222	227
	90	261	253	258	275	264	255	261

ตารางที่ ข.1 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าการไหลคงที่ (ต่อ)

ตัวอย่าง มอร์ตาร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
CL2FF 20	3	102	107	103	102	104	100	103
	7	122	135	136	130	129	134	131
	28	166	164	165	142	157	172	161
	60	196	182	198	194	204	190	194
	90	228	215	198	234	207	202	214



ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่

ตัวอย่าง มอร์ต้าร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
CONFW	3	188	172	210	194	183	181	188
	7	223	221	216	212	205	219	216
	28	279	266	274	281	267	265	272
	60	282	253	326	307	300	284	292
	90	326	333	268	303	318	312	310
URHFW 10	3	124	125	126	129	124	122	125
	7	140	145	137	135	132	139	138
	28	205	223	206	173	232	233	212
	60	265	248	237	253	243	230	246
	90	253	268	219	271	268	239	253
URHFW 20	3	70	81	78	84	84	83	80
	7	110	105	97	109	114	95	105
	28	181	120	101	147	107	118	129
	60	162	145	121	119	102	131	130
	90	124	132	146	140	123	133	133
GRHFW 10	3	222	198	191	175	196	194	196
	7	195	226	207	243	211	232	219
	28	289	341	307	254	257	286	289
	60	315	303	306	297	290	289	300
	90	342	332	376	346	321	305	337

ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ (ต่อ)

ตัวอย่าง มอร์ต้าร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
GRHFW 20	3	188	172	214	152	178	194	183
	7	183	179	205	194	186	187	189
	28	255	216	238	206	207	222	224
	60	245	232	244	247	322	258	258
	90	297	292	304	308	292	307	300
CL1FW 10	3	204	188	180	198	131	131	172
	7	229	234	232	242	230	231	233
	28	265	196	294	320	285	272	272
	60	239	313	302	291	337	264	291
	90	302	323	279	311	323	274	302
CL1FW 20	3	139	136	154	158	175	150	152
	7	162	204	172	176	137	163	169
	28	250	214	211	167	218	212	212
	60	231	249	231	271	162	230	229
	90	289	256	259	268	255	287	269
CL2FF 10	3	226	205	169	138	220	200	193
	7	218	199	212	223	222	204	213
	28	279	275	290	261	281	276	277
	60	236	323	280	276	242	323	280
	90	360	276	250	307	314	335	307

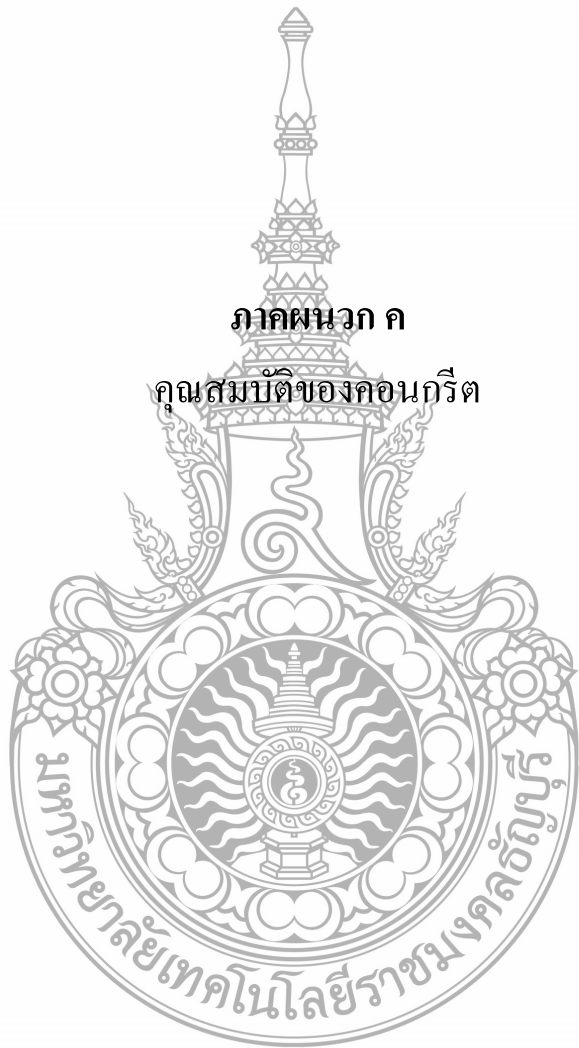
ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ เมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ (ต่อ)

ตัวอย่าง มอร์ตาร์	อายุ (วัน)	กำลังอัด (kg/cm ²)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
CL2FF 20	3	197	173	204	189	162	161	181
	7	196	183	179	187	200	177	187
	28	219	200	233	214	234	226	221
	60	263	248	247	253	249	240	250
	90	293	284	292	290	286	295	290



ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของคอนกรีต



ตารางที่ ค.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ
คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

ตัวอย่างคอนกรีต	ความหนาแน่น (kg/m ³)				ค่าเฉลี่ย
	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
CON-N	2,414	2,384	2,343	2,367	2,377
CON-P	2,485	2,504	2,462	2,485	2,484
URH10-SP-N	2,335	2,359	2,350	2,388	2,358
URH10-SP-P	2,459	2,461	2,472	2,484	2,469
URH20-SP-N	2,349	2,350	2,346	2,347	2,348
URH20-SP-P	2,506	2,539	2,535	2,488	2,517
GRH10-SP-N	2,359	2,353	2,341	2,371	2,356
GRH10-SP-P	2,514	2,524	2,522	2,528	2,522
GRH20-SP-N	2,361	2,360	2,378	2,377	2,369
GRH20-SP-P	2,509	2,517	2,517	2,517	2,515

ตารางที่ ค.2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีต
ผสมเถ้าแกลบ

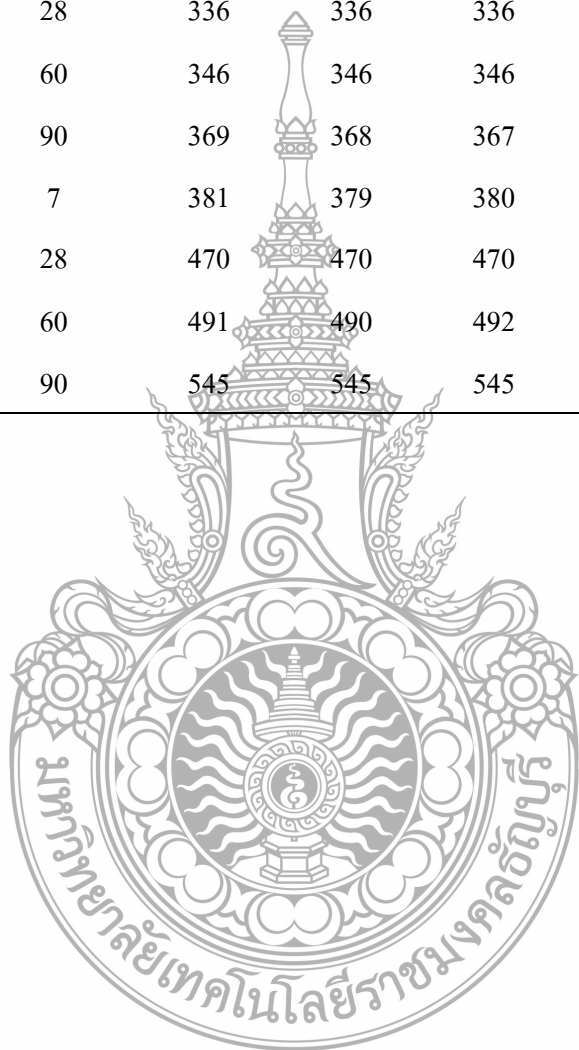
ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ	กำลังอัด (kg/cm ²)			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
CON-N	7	265	264	263	264
	28	292	288	290	290
	60	329	329	329	329
	90	356	356	356	356
CON-P	7	370	372	371	371
	28	413	413	413	413
	60	464	466	465	465
	90	527	527	524	526

ตารางที่ ค.2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนและคอนกรีตผสมเต็มแก่ลบ (ต่อ)

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ	กำลังอัด (kg/cm ²)			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
URH10-SP-N	7	263	264	265	264
	28	287	287	287	287
	60	329	329	329	329
	90	359	361	360	360
URH10-SP-P	7	367	366	365	366
	28	431	431	431	431
	60	459	460	461	460
	90	522	521	520	521
URH20-SP-N	7	257	259	258	258
	28	287	285	286	286
	60	326	328	327	327
	90	352	353	351	352
URH20-SP-P	7	362	360	358	360
	28	410	412	411	411
	60	462	465	465	464
	90	520	522	521	521
GRH10-SP-N	7	268	271	268	269
	28	332	320	332	328
	60	343	340	340	341
	90	362	363	364	363
GRH10-SP-P	7	377	376	375	376
	28	460	462	461	461
	60	492	489	489	490
	90	534	534	534	534

ตารางที่ ค.2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (ต่อ)

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุ	กำลังอัด (kg/cm ²)			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
GRH20-SP-N	7	272	271	270	271
	28	336	336	336	336
	60	346	346	346	346
	90	369	368	367	368
GRH20-SP-P	7	381	379	380	380
	28	470	470	470	470
	60	491	490	492	491
	90	545	545	545	545



ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตารางที่ ค.3 ตัวอย่างที่ 2 ที่ตำแหน่งระดับน้ำ = 44.9 - 44.1 = 0.8 cm ใช้เวลา 16320 s

$$Q = [(3.14 \times 0.0153^2) (0.008 \text{ m} / 4 \text{ m}^2)] / (1,6320 \text{ s}) = 9.01 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

$$K = [(1,000 \text{ kg/m}^3) (0.05 \text{ m}) (9.81 \text{ m/s}^2) (9.01 \times 10^{-11} \text{ m/s})] / [(500000) (0.0025 \text{ m}^2)] = 3.536 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-N ที่อายุ 28 วัน

Specimen : CON-N

Age : 28 days

Average K(m/s) = 2.927215×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
20/11/2015	18:20:00	8.2	5.4	-	-
20/11/2015	18:40:00	8.5	5.8	17.995	23.995
20/11/2015	19:00:00	8.9	6.2	24.054	24.054
20/11/2015	19:20:00	9.5	6.7	36.054	30.046
20/11/2015	19:40:00	10	7.2	30.046	30.046
20/11/2015	20:00:00	10.6	7.7	36.054	30.046
20/11/2015	21:00:00	11.4	8.6	16.026	18.027
20/11/2015	22:00:00	12	9.1	12.019	10.014
20/11/2015	23:00:00	12.7	9.7	14.02	12.019
21/11/2015	0:00:00	13.4	10.2	14.02	10.014
21/11/2015	1:00:00	14	11.3	12.019	22.033
21/11/2015	9:00:00	20.5	16.9	16.273	14.02
21/11/2015	10:00:00	21.1	17.4	12.019	10.014
21/11/2015	11:06:00	21.8	18.3	12.745	16.387
21/11/2015	15:30:00	23.4	19.9	7.283	7.283

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-N ที่อายุ 28 วัน(ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
21/11/2015	20:04:00	25.4	22.6	8.774	11.843
21/11/2015	23:45:00	26.9	24.1	8.158	8.158
22/11/2015	7:56:00	30.8	27.9	9.547	9.3
22/11/2015	11:33:00	32.2	29.5	7.754	8.86
22/11/2015	15:05:00	33.5	30.8	7.369	7.369
22/11/2015	18:54:00	35.1	32.4	8.397	8.397
22/11/2015	22:06:00	37.7	34.4	16.273	12.518
23/11/2015	0:15:00	39.3	35.3	14.907	8.386
23/11/2015	8:30:00	42.1	38.6	6.796	8.013
23/11/2015	11:45:00	43.2	39.8	6.781	7.397
23/11/2015	13:17:00	43.7	40.5	6.53	9.143
23/11/2015	16:07:00	44.1	40.8	2.829	2.119
23/11/2015	19:25:00	44.6	41.5	3.033	4.25
23/11/2015	23:45:00	45.3	42.6	3.237	5.086
24/11/2015	7:36:00	46.1	43.2	2.04	1.53
24/11/2015	8:50:00	46.3	43.5	3.249	4.874
24/11/2015	12:34:00	-	44.1	-	3.218
24/11/2015	17:06:00	-	44.9	-	3.536
24/11/2015	22:30:00	-	45.7	-	2.967
25/11/2015	0:15:00	-	46.1	-	4.579
25/11/2015	9:33:00	-	46.5	-	0.863
26/11/2015	9:32:00	-	47.7	-	1.001
26/11/2015	16:36:00	-	48.3	-	1.699
Average				2.8776	2.97683

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-N ที่อายุ 90 วัน

Specimen : CON-N

Age : 90 days

Average K (m/s) = 1.66067×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
20/11/2015	18:20:00	2.2	4.7	-	-
20/11/2015	18:40:00	2.4	4.9	12.00	12.00
20/11/2015	19:00:00	3.1	5.7	42.097	48.112
20/11/2015	19:20:00	3.7	6.2	36.054	30.046
20/11/2015	19:40:00	4.4	6.9	42.061	42.061
20/11/2015	20:00:00	5	7.3	36.054	24.035
20/11/2015	21:00:00	5.6	8	12.019	14.02
20/11/2015	22:00:00	6.2	8.7	12.019	14.02
20/11/2015	23:00:00	6.7	9.1	10.014	8.013
21/11/2015	0:00:00	7.1	9.8	8.013	14.02
21/11/2015	1:00:00	7.6	10.1	10.014	6.008
21/11/2015	9:00:00	11	13.6	8.511	8.762
21/11/2015	10:00:00	11.5	14	10.014	8.013
21/11/2015	11:06:00	13.2	15	30.956	18.207
21/11/2015	15:30:00	14.1	16.6	4.097	7.283
21/11/2015	20:04:00	15.9	18.3	7.895	7.456
21/11/2015	23:45:00	16.1	18.7	1.087	2.174
22/11/2015	7:56:00	17.8	20.6	4.159	4.65
22/11/2015	11:33:00	18.2	20.7	2.217	0.553
22/11/2015	15:05:00	18.7	21	2.833	1.699

ตารางที่ ๓.๔ ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-N ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
22/11/2015	18:54:00	19.3	21.6	3.147	3.147
22/11/2015	22:06:00	19.9	21.9	3.755	1.88
23/11/2015	0:15:00	20.8	22.1	8.386	1.864
23/11/2015	8:30:00	22.4	24.8	3.885	6.557
23/11/2015	11:45:00	23.2	25.3	4.929	3.08
23/11/2015	13:17:00	25.1	25.9	24.819	7.836
23/11/2015	16:07:00	25.9	26.3	5.654	2.829
23/11/2015	23:45:00	-	27.3	-	2.625
24/11/2015	7:36:00	27	29.5	1.424	5.615
24/11/2015	8:50:00	27.3	29.9	4.874	6.498
24/11/2015	12:34:00	28	30.7	3.755	4.293
24/11/2015	17:06:00	28.6	31.2	2.653	2.209
24/11/2015	22:30:00	29.7	31.9	4.081	2.598
25/11/2015	0:15:00	30.1	32.4	4.579	5.721
25/11/2015	9:33:00	33.3	35.9	6.891	7.538
25/11/2015	13:04:00	33.6	36	1.707	0.569
25/11/2015	19:33:00	34.1	36.2	1.546	0.616
26/11/2015	10:21:00	35.7	38.1	2.166	2.57
26/11/2015	13:12:00	35.9	38.4	1.405	2.107
26/11/2015	20:56:00	36.2	38.7	0.777	0.777
26/11/2015	22:17:00	36.4	38.9	2.967	2.967
27/11/2015	8:47:00	38.1	39.9	3.241	1.907
27/11/2015	12:58:00	38.3	40.1	0.957	0.957
27/11/2015	17:05:00	38.5	40.5	0.973	1.946
27/11/2015	21:33:00	38.6	40.7	0.447	0.899

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-N ที่อายุ 90วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
28/11/2015	9:15:00	40	42.1	2.398	2.398
28/11/2015	16:00:00	40.4	42.9	1.185	2.374
Average				1.64742	1.67392

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ



ตารางที่ ๕.5 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-P ที่อายุ 28 วัน

Specimen : CON-P Age : 28 days Average K (m/s) = 9.53135×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
20/11/2015	18:20:00	12.3	8.1	-	-
20/11/2015	18:40:00	12.8	8.5	29.995	23.995
20/11/2015	19:00:00	13.7	9.3	54.128	48.112
20/11/2015	19:20:00	14.6	10.4	54.081	66.10
20/11/2015	19:40:00	15.6	11.2	60.088	48.073
20/11/2015	20:00:00	16.4	12.1	48.073	54.081
20/11/2015	21:00:00	17.2	13.1	16.026	20.028
20/11/2015	22:00:00	17.9	13.7	14.02	12.019
20/11/2015	23:00:00	18.6	14.5	14.02	16.026
21/11/2015	0:00:00	19.1	15	10.014	10.014
21/11/2015	1:00:00	19.5	15.6	8.013	12.019
21/11/2015	9:00:00	21	17.2	3.755	4.006
21/11/2015	10:00:00	21.6	17.4	12.019	4.006
21/11/2015	11:06:00	22.2	18	10.924	10.924
21/11/2015	15:30:00	25.1	20.8	13.2	12.745
21/11/2015	20:04:00	25.9	21.4	3.508	2.633
21/11/2015	23:45:00	26.2	22.1	1.632	3.806
22/11/2015	7:56:00	27.5	23.2	3.182	2.692
22/11/2015	11:33:00	28.2	23.9	3.877	3.877
22/11/2015	15:05:00	28.9	24.4	3.967	2.833
22/11/2015	18:54:00	29.8	26	4.724	8.397
22/11/2015	22:06:00	30.9	26.6	6.887	3.755
23/11/2015	0:15:00	31.6	27.3	6.522	6.522

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-P ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/11/2015	8:30:00	33.9	29.8	5.584	6.07
23/11/2015	11:45:00	34.1	30.1	1.232	1.848
23/11/2015	13:17:00	34.4	30.3	3.92	2.613
23/11/2015	16:07:00	34.7	30.4	2.119	0.706
23/11/2015	23:45:00	35.1	30.6	1.048	0.526
24/11/2015	7:36:00	35.6	31	1.275	1.02
24/11/2015	8:50:00	35.8	31.4	3.249	6.498
24/11/2015	12:34:00	36.5	31.5	3.755	0.538
24/11/2015	17:06:00	37.6	32.4	4.862	3.975
24/11/2015	22:30:00	37.9	33.5	1.114	4.081
25/11/2015	0:15:00	38.1	33.8	2.288	3.434
25/11/2015	9:33:00	38.9	34.1	1.723	0.647
25/11/2015	13:04:00	39.4	34.7	2.849	3.418
25/11/2015	19:33:00	39.8	35.2	1.236	1.546
26/11/2015	10:21:00	40.3	35.5	0.675	0.404
26/11/2015	13:12:00	40.4	36	0.702	3.516
26/11/2015	20:56:00	40.6	36.2	0.518	0.518
26/11/2015	22:17:00	40.7	36.3	1.483	1.483
27/11/2015	8:47:00	41.2	36.4	0.954	0.192
27/11/2015	12:58:00	41.4	37.1	0.957	3.351
27/11/2015	17:05:00	41.5	37.2	0.232	0.487
28/11/2015	21:33:00	41.7	37.3	0.341	0.447
28/11/2015	17:05:00	41.8	37.4	0.298	0.102
Average				0.7396	1.16667

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-P ที่อายุ 90 วัน

Specimen : CON-P

Age : 90 days

Average K (m/s) = 5.33536×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
20/11/2015	18:20:00	6.4	5.1	-	-
20/11/2015	18:40:00	6.6	5.3	12.00	12.00
20/11/2015	19:00:00	7.3	6	42.097	42.097
20/11/2015	19:20:00	7.8	6.4	30.046	24.035
20/11/2015	19:40:00	8.5	7	42.061	36.054
20/11/2015	20:00:00	9.4	8.1	54.081	66.1
20/11/2015	21:00:00	10.8	9.5	28.041	28.041
20/11/2015	22:00:00	11.7	10.2	18.027	14.02
20/11/2015	23:00:00	12.4	11.3	14.02	22.033
21/11/2015	0:00:00	12.7	11.5	6.008	4.006
21/11/2015	1:00:00	12.9	11.8	4.006	6.008
21/11/2015	9:00:00	13.5	12.4	1.503	1.503
21/11/2015	10:00:00	13.8	13	6.008	12.019
21/11/2015	11:06:00	14	13.5	3.641	9.104
21/11/2015	15:30:00	14.4	13.8	1.821	1.366
21/11/2015	20:04:00	15	14	2.633	0.879
21/11/2015	23:45:00	15.2	14.1	1.087	0.545
22/11/2015	7:56:00	16.2	15.2	2.449	2.692
22/11/2015	11:33:00	16.5	15.4	1.66	1.107
22/11/2015	15:05:00	16.9	15.7	2.268	1.699
22/11/2015	18:54:00	17.2	15.8	1.574	0.526
22/11/2015	22:06:00	17.6	16.3	2.504	3.131
23/11/2015	0:15:00	18	16.6	3.728	2.794
23/11/2015	8:30:00	19.8	18.2	4.371	3.885

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต CON-P ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/11/2015	11:45:00	20.2	18.5	2.464	1.848
23/11/2015	13:17:00	20.4	18.7	2.613	2.613
23/11/2015	16:07:00	20.7	18.9	2.119	1.413
23/11/2015	23:45:00	20.9	19.4	0.526	1.311
24/11/2015	7:36:00	21.8	20.5	2.296	2.806
24/11/2015	8:50:00	21.9	20.7	1.625	3.249
24/11/2015	12:34:00	22.1	20.8	1.071	0.538
24/11/2015	17:06:00	22.2	20.9	0.443	0.443
24/11/2015	22:30:00	22.3	-	0.373	-
25/11/2015	0:15:00	22.5	21	2.288	0.279
25/11/2015	9:33:00	23	21.5	1.075	1.075
25/11/2015	13:04:00	23.1	21.7	0.569	1.138
25/11/2015	19:33:00	23.3	21.8	0.616	0.31
26/11/2015	10:21:00	23.9	22.5	0.812	0.946
26/11/2015	13:12:00	24	22.7	0.702	1.405
26/11/2015	20:56:00	24.1	22.8	0.259	0.259
27/11/2015	8:47:00	24.4	23.1	0.506	0.506
27/11/2015	12:58:00	24.5	23.2	0.479	0.479
27/11/2015	17:05:00	24.6	-	0.487	-
27/11/2015	21:33:00	24.7	23.3	0.447	0.232
28/11/2015	9:15:00	25	23.6	0.514	0.514
28/11/2015	16:00:00	25.1	23.7	0.298	0.298
Average				0.517182	0.549889

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-N ที่อายุ 28 วัน

Specimen : URH10-SP-N Age : 28 days Average K (m/s) = 3.03900×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
18/12/2015	18:11:00	3.2	5.5	-	-
18/12/2015	21:15:00	4.5	6.9	8.492	9.143
18/12/2015	23:27:00	5.7	8.3	10.924	12.745
19/12/2015	9:30:00	10.5	11.3	9.567	5.98
19/12/2015	13:24:00	11.9	12.4	7.189	5.651
19/12/2015	17:42:00	13.4	14.5	6.989	9.783
19/12/2015	20:52:00	14.5	16.8	6.957	14.546
19/12/2015	22:14:00	15	17.6	7.326	11.725
20/12/2015	8:52:00	18.9	21.7	7.346	7.722
20/12/2015	12:16:00	19.6	22.3	4.124	3.536
20/12/2015	15:49:00	20.4	23.1	4.513	4.513
20/12/2015	19:06:00	21	23.7	3.661	3.661
20/12/2015	23:15:00	21.7	24.5	3.379	3.861
21/12/2015	10:07:00	24	26.7	4.238	4.053
21/12/2015	13:42:00	24.8	27.5	4.473	4.473
21/12/2015	16:02:00	25.2	27.9	3.434	3.434
21/12/2015	20:11:00	26.2	28.7	4.827	3.861
21/12/2015	22:44:00	26.9	29.4	5.498	5.498
22/12/2015	7:55:00	28.9	31.5	4.363	4.579
22/12/2015	11:16:00	29.5	32.1	3.587	3.587
22/12/2015	14:40:00	29.8	32.8	1.766	4.124

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-N ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
22/12/2015	20:15:00	30.7	33.7	3.229	3.229
22/12/2015	22:07:00	31.1	34	4.293	3.218
23/12/2015	8:51:00	33.2	36.1	3.92	3.92
23/12/2015	10:46:00	33.7	36.5	5.227	4.179
23/12/2015	12:35:00	34.1	36.9	4.411	4.411
23/12/2015	16:55:00	34.9	37.6	3.696	3.237
23/12/2015	21:28:00	35.6	38.4	3.08	3.52
23/12/2015	22:40:00	-	38.6	-	3.339
24/12/2015	9:12:00	37.2	40.4	2.731	3.422
24/12/2015	11:48:00	37.6	40.9	3.08	3.853
24/12/2015	13:50:00	37.9	41.2	2.955	2.955
24/12/2015	16:05:00	38.2	41.5	2.672	2.672
24/12/2015	19:58:00	38.8	42.2	3.096	3.61
24/12/2015	22:13:00	39.2	42.5	3.559	2.672
25/12/2015	8:21:00	41	44.1	3.559	3.163
25/12/2015	10:44:00	41.4	44.4	3.363	2.523
25/12/2015	13:07:00	41.6	44.7	1.679	2.523
25/12/2015	15:55:00	42.1	45.2	3.579	3.579
25/12/2015	21:13:00	42.8	46	2.645	3.021
26/12/2015	9:33:00	44.6	47.4	2.923	2.272
26/12/2015	11:02:00	44.9	47.7	4.05	4.05
26/12/2015	13:06:00	45.2	48	2.908	2.908
Average				3.08233	2.99567

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-N ที่อายุ 90 วัน

Specimen : URH10-SP-N Age : 90 days Average K (m/s) = 1.97770×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
26/1/2016	13:52:00	1.4	2.2	-	-
26/1/2016	18:11:00	2.4	3.2	4.642	4.642
26/1/2016	20:04:00	2.9	3.8	5.317	6.38
26/1/2016	22:35:00	3.5	4.4	4.776	4.776
27/1/2016	8:50:00	5.8	6.7	4.493	4.493
27/1/2016	12:33:00	6.6	7.5	4.312	4.312
27/1/2016	16:42:00	7.4	8.3	3.861	3.861
27/1/2016	19:10:00	7.9	8.8	4.061	4.061
27/1/2016	21:07:00	8.3	9.2	4.108	4.108
28/1/2016	9:12:00	10.4	11.4	3.481	3.645
28/1/2016	11:55:00	10.9	11.9	3.685	3.685
28/1/2016	14:27:00	11.3	12.4	3.163	3.951
28/1/2016	18:10:00	11.8	12.9	2.696	2.696
28/1/2016	20:30:00	12.2	13.2	3.434	2.574
29/1/2016	8:55:00	13.8	14.9	2.582	2.743
29/1/2016	12:14:00	14.2	15.3	2.417	2.417
29/1/2016	17:52:00	14.9	16	2.488	2.488
29/1/2016	20:41:00	15.3	16.4	2.845	2.845
30/1/2016	9:40:00	16.9	18	2.531	2.586
30/1/2016	12:05:00	17.2	18.3	2.488	2.488
30/1/2016	15:12:00	17.6	18.7	2.57	2.57
30/1/2016	19:20:00	18	19.2	1.938	2.421
31/1/2016	10:07:00	19.3	20.7	2.139	2.299
31/1/2016	13:52:00	19.7	21.1	2.135	2.135

ตารางที่ ๘.๘ ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-N ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
31/1/2016	17:03:00	20.1	21.4	2.515	1.887
31/1/2016	21:13:00	20.6	21.8	2.405	1.923
1/2/2016	8:44:00	22	23	2.437	2.088
1/2/2016	11:37:00	22.3	23.3	2.084	2.084
1/2/2016	13:55:00	22.5	23.5	1.742	1.742
1/2/2016	18:20:00	22.9	24	1.813	2.268
1/2/2016	21:40:00	23.2	24.3	1.801	1.801
2/2/2016	8:30:00	24.2	25.4	1.848	2.033
2/2/2016	12:45:00	24.6	25.8	1.884	1.884
2/2/2016	16:00:00	24.9	26.1	1.848	1.848
2/2/2016	19:37:00	25.3	26.5	2.217	2.217
3/2/2016	9:11:00	26.6	27.8	1.919	1.919
3/2/2016	11:52:00	26.9	28.1	2.241	2.241
3/2/2016	15:55:00	27.3	28.5	1.978	1.978
3/2/2016	18:07:00	27.5	28.7	1.821	1.821
4/2/2016	9:11:00	29	30.2	1.993	1.993
4/2/2016	12:04:00	29.3	30.5	2.084	2.084
4/2/2016	15:53:00	29.7	30.9	2.099	2.099
Average				1.94914	2.00625

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-P ที่อายุ 28 วัน

Specimen : URH10-SP-P Age : 28 days Average K (m/s) = 1.15722×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
18/12/2015	18:11:00	2.7	4.1	-	-
18/12/2015	21:15:00	3.1	4.7	2.613	3.92
18/12/2015	23:27:00	3.5	5.4	3.641	6.373
19/12/2015	9:30:00	5.7	7.2	4.383	3.587
19/12/2015	13:24:00	6.2	8.9	2.566	8.731
19/12/2015	17:42:00	6.6	9.5	1.864	2.794
19/12/2015	20:52:00	7.1	10.3	3.163	5.062
19/12/2015	22:14:00	7.7	10.9	8.794	8.794
20/12/2015	8:52:00	9.2	12.4	2.825	2.825
20/12/2015	12:16:00	9.5	12.9	1.766	2.947
20/12/2015	15:49:00	9.9	13.1	2.256	1.13
20/12/2015	19:06:00	10.3	13.6	2.441	3.049
20/12/2015	23:15:00	10.8	14	2.413	1.931
21/12/2015	10:07:00	12.1	15.6	2.398	2.951
21/12/2015	13:42:00	12.5	15.9	2.237	1.676
21/12/2015	16:02:00	12.7	16.4	1.719	4.293
21/12/2015	20:11:00	13.2	16.7	2.413	1.448
21/12/2015	22:44:00	13.5	16.9	2.358	1.57
22/12/2015	7:55:00	14.4	17.7	1.962	1.746
22/12/2015	11:16:00	14.7	17.9	1.793	1.197
22/12/2015	14:40:00	15	18.1	1.766	1.177
22/12/2015	20:15:00	15.4	18.4	1.436	1.075
22/12/2015	22:07:00	15.6	-	2.146	-
23/12/2015	8:51:00	16.6	19.5	1.868	1.75

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-P ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/12/2015	10:46:00	18	20.9	14.629	14.629
23/12/2015	12:35:00	18.1	21.2	1.103	3.308
23/12/2015	16:55:00	18.4	21.4	1.385	0.926
23/12/2015	21:28:00	18.7	21.6	1.322	0.879
23/12/2015	22:40:00	18.8	-	1.668	-
24/12/2015	9:12:00	19.4	22.2	1.142	1.024
24/12/2015	11:48:00	19.5	22.4	0.769	1.542
24/12/2015	13:50:00	19.6	-	0.985	-
24/12/2015	16:05:00	19.8	22.5	1.781	0.467
24/12/2015	19:58:00	20	22.7	1.032	1.032
24/12/2015	22:13:00	20.2	23	1.781	2.672
25/12/2015	8:21:00	20.8	23.7	1.185	1.385
25/12/2015	10:44:00	20.9	23.9	0.84	1.679
25/12/2015	13:07:00	21	24.1	0.84	1.679
25/12/2015	15:55:00	21.2	24.3	1.432	1.432
25/12/2015	21:13:00	21.4	24.4	0.757	0.377
26/12/2015	9:33:00	22.1	25	1.138	0.973
26/12/2015	11:02:00	22.2	25.1	1.35	1.35
26/12/2015	13:06:00	22.3	-	0.969	-
Average				1.046570	1.26786

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-P ที่อายุ 90 วัน

Specimen : URH10-SP-P Age : 90 days Average K (m/s) = 6.11037×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
26/1/2016	13:52:00	2.1	0.8	-	-
26/1/2016	18:11:00	2.7	1.3	2.786	2.319
26/1/2016	20:04:00	2.9	1.6	2.127	3.19
26/1/2016	22:35:00	3.3	2	3.182	3.182
27/1/2016	8:50:00	4.6	3.3	2.539	2.539
27/1/2016	12:33:00	5	3.7	2.154	2.154
27/1/2016	16:42:00	5.5	4.2	2.413	2.413
27/1/2016	19:10:00	5.8	4.5	2.437	2.437
27/1/2016	21:07:00	6	4.8	2.056	3.08
28/1/2016	9:12:00	7.3	6	2.154	1.989
28/1/2016	11:55:00	7.6	6.4	2.213	2.951
28/1/2016	14:27:00	7.9	6.6	2.37	1.581
28/1/2016	18:10:00	8.2	7	1.617	2.154
28/1/2016	20:30:00	8.4	7.2	1.719	1.719
29/1/2016	8:55:00	9.5	8.5	1.774	2.095
29/1/2016	12:14:00	9.8	8.7	1.813	1.209
29/1/2016	17:52:00	10.3	9.2	1.778	1.778
29/1/2016	20:41:00	10.5	9.4	1.42	1.42
30/1/2016	9:40:00	11.4	10.4	1.617	1.723
30/1/2016	12:05:00	11.5	10.6	0.828	1.656
30/1/2016	15:12:00	11.7	10.8	1.287	1.287
30/1/2016	19:20:00	11.9	10.9	0.969	0.483
31/1/2016	10:07:00	12.5	11.6	1.071	1.177
31/1/2016	13:52:00	12.7	11.8	1.067	1.067

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH10-SP-P ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
31/1/2016	17:03:00	12.8	11.9	0.628	0.628
31/1/2016	21:13:00	12.9	12	0.483	0.483
1/2/2016	8:44:00	13.3	12.4	0.695	0.695
1/2/2016	11:37:00	13.4	12.5	0.695	0.695
1/2/2016	13:55:00	13.5	12.6	0.871	0.871
1/2/2016	18:20:00	13.6	12.7	0.455	0.455
1/2/2016	21:40:00	13.7	12.8	0.6	0.6
2/2/2016	8:30:00	14	13	0.553	0.369
2/2/2016	12:45:00	14.1	13.1	0.471	0.471
2/2/2016	16:00:00	14.2	13.2	0.616	0.616
2/2/2016	19:37:00	14.3	13.3	0.553	0.553
3/2/2016	9:11:00	14.7	13.7	0.593	0.593
3/2/2016	11:52:00	14.8	13.8	0.746	0.746
3/2/2016	15:55:00	14.9	13.9	0.494	0.494
3/2/2016	18:07:00	15	14	0.91	0.91
4/2/2016	9:11:00	15.4	14.4	0.534	0.534
4/2/2016	12:04:00	15.5	14.5	0.695	0.695
4/2/2016	15:53:00	15.6	14.6	0.526	0.526
Average				0.608273	0.613800

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-N ที่อายุ 28 วัน

Specimen : URH20-SP-N Age : 28 days Average K (m/s) = 4.66896×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
5/1/2016	16:44:00	2.8	1.3	-	-
5/1/2016	18:31:00	4	2.2	13.475	10.104
5/1/2016	22:15:00	5.6	3.9	8.586	9.123
6/1/2016	8:45:00	9.2	8.5	6.867	8.774
6/1/2016	12:35:00	10.3	10.1	5.749	8.362
6/1/2016	19:55:00	12.4	12.6	5.737	6.828
6/1/2016	23:10:00	13.3	13.6	5.549	6.165
7/1/2016	9:12:00	16.2	16.6	5.788	5.988
7/1/2016	14:35:00	17.7	18.3	5.58	6.325
7/1/2016	18:50:00	19.1	19.7	6.596	6.596
7/1/2016	21:21:00	19.8	20.5	5.572	6.369
8/1/2016	8:30:00	23.1	24	5.929	6.286
8/1/2016	12:15:00	24.2	25.4	5.874	7.479
8/1/2016	17:33:00	25.6	27.2	5.29	6.804
8/1/2016	19:21:00	26.1	28	5.564	8.904
8/1/2016	22:48:00	26.9	29.1	4.646	6.388
9/1/2016	7:55:00	29.3	31.9	5.274	6.153
9/1/2016	11:03:00	30.1	32.8	5.113	5.753
9/1/2016	15:20:00	31.2	34	5.144	5.611
9/1/2016	19:55:00	32.3	35.3	4.807	5.682
9/1/2016	21:12:00	32.6	35.6	4.681	4.681
10/1/2016	9:10:00	35.8	38.7	5.356	5.188
10/1/2016	13:56:00	37.2	40.1	5.882	5.882
10/1/2016	17:53:00	38	41	4.057	4.564

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-N ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
10/1/2016	20:05:00	38.6	41.7	5.462	6.373
10/1/2016	23:47:00	39.6	42.6	5.415	4.874
11/1/2016	10:21:00	42.3	45.1	5.117	4.74
11/1/2016	12:49:00	42.8	45.6	4.061	4.061
11/1/2016	17:52:00	44	46.7	4.76	4.363
11/1/2016	20:14:00	44.5	47.1	4.23	3.386
12/1/2016	9:12:00	47.7	50.1	4.944	4.634
12/1/2016	11:21:00	48.2	50.6	4.658	4.658
12/1/2016	15:52:00	49.3	51.6	4.878	4.434
12/1/2016	18:16:00	49.9	52.1	5.007	4.171
12/1/2016	21:22:00	50.7	52.8	5.168	4.524
12/1/2016	23:15:00	51.2	53.3	5.317	5.317
13/1/2016	9:08:00	53.7	55.8	5.066	5.066
13/1/2016	11:32:00	54.3	56.4	5.007	5.007
Average				4.82691	4.511

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-N ที่อายุ 90 วัน

Specimen : URH20-SP-N Age : 90 days Average K (m/s) = 3.47567×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
8/2/2016	16:37:00	0.6	1.2	-	-
8/2/2016	18:30:00	1.2	1.8	6.38	6.38
8/2/2016	20:11:00	1.7	2.4	5.949	7.138
9/2/2016	8:44:00	5.4	6.3	5.906	6.223
9/2/2016	11:52:00	6.3	7.1	5.753	5.113
9/2/2016	13:21:00	6.7	7.5	5.399	5.399
9/2/2016	18:55:00	8	8.9	4.677	5.038
9/2/2016	21:55:00	8.7	9.6	4.673	4.673
10/2/2016	10:02:00	11.4	12.3	4.462	4.462
10/2/2016	12:11:00	11.9	12.8	4.658	4.658
10/2/2016	16:50:00	12.9	13.9	4.309	4.74
10/2/2016	19:07:00	13.4	14.3	4.387	3.508
11/2/2016	9:10:00	16.3	17	4.136	3.849
11/2/2016	13:48:00	17.2	17.9	3.893	3.893
11/2/2016	17:14:00	17.9	18.6	4.085	4.085
11/2/2016	20:55:00	18.6	19.3	3.806	3.806
12/2/2016	9:40:00	21.1	21.8	3.928	3.928
12/2/2016	11:55:00	21.5	22.2	3.559	3.559
12/2/2016	14:21:00	21.9	22.7	3.834	3.916
12/2/2016	16:48:00	22.4	23.1	4.089	3.269
12/2/2016	20:31:00	23.1	23.8	3.771	3.771
13/2/2016	8:52:00	25.3	26	3.567	3.567
13/2/2016	11:07:00	25.7	26.4	3.626	3.626
13/2/2016	15:50:00	26.6	27.3	3.822	3.822

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-N ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
13/2/2016	18:47:00	27.1	27.8	3.394	3.394
13/2/2016	21:10:00	27.5	28.2	3.363	3.363
14/2/2016	9:05:00	29.6	30.3	3.532	3.532
14/2/2016	11:47:00	30.1	30.8	3.708	3.708
14/2/2016	14:04:00	30.5	31.2	3.508	3.508
14/2/2016	16:58:00	31	31.7	3.453	3.453
14/2/2016	19:01:00	31.3	32.1	2.931	3.908
14/2/2016	21:55:00	31.9	32.6	4.144	3.453
15/2/2016	8:12:00	33.6	34.3	3.312	3.312
15/2/2016	10:58:00	34.1	34.8	3.618	3.618
15/2/2016	12:47:00	34.5	35.1	4.411	3.308
15/2/2016	17:00:00	35.2	35.8	3.324	3.324
15/2/2016	20:04:00	35.7	36.3	3.265	3.265
16/2/2016	8:49:00	37.9	38.6	3.457	3.614
16/2/2016	12:06:00	38.5	39.1	3.661	3.049
16/2/2016	15:55:00	39.2	39.8	3.673	3.673
16/2/2016	17:07:00	39.4	40	3.339	3.339
Average				3.56222	3.38911

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-P ที่อายุ 28 วัน

Specimen : URH20-SP-P Age : 28 days Average K (m/s) = 1.19882×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
5/1/2016	16:44:00	1.2	0.7	-	-
5/1/2016	18:31:00	1.8	1.1	6.738	4.493
5/1/2016	22:15:00	2.9	1.9	5.902	4.293
6/1/2016	8:45:00	5.4	3.6	4.768	3.241
6/1/2016	12:35:00	5.8	4.1	2.091	2.613
6/1/2016	19:55:00	6.6	5	2.186	2.456
6/1/2016	23:10:00	6.9	5.4	1.848	2.464
7/1/2016	9:12:00	8.1	6.6	2.398	2.398
7/1/2016	14:35:00	8.6	7.1	1.86	1.86
7/1/2016	18:50:00	9	7.4	1.884	1.413
7/1/2016	21:21:00	9.2	7.6	1.593	1.593
8/1/2016	8:30:00	10.3	8.9	1.978	2.335
8/1/2016	12:15:00	10.6	9.2	1.601	1.601
8/1/2016	17:33:00	11	9.6	1.511	1.511
8/1/2016	19:21:00	11.2	9.7	2.225	1.114
8/1/2016	22:48:00	11.4	9.9	1.162	1.162
9/1/2016	7:55:00	12	10.4	1.318	1.099
9/1/2016	11:03:00	12.2	10.6	1.279	1.279
9/1/2016	15:20:00	12.5	11	1.405	1.872
9/1/2016	19:55:00	12.8	11.2	1.311	0.875
10/1/2016	9:10:00	13.6	11.3	1.209	1.562
10/1/2016	13:56:00	13.9	12.2	1.26	1.507
10/1/2016	17:53:00	14.1	12.6	1.012	1.679
10/1/2016	20:05:00	14.3	12.8	1.821	1.012

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-P ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
10/1/2016	23:47:00	14.6	12.9	1.625	0.91
11/1/2016	10:21:00	15.3	13.2	1.326	1.625
11/1/2016	12:49:00	15.4	13.8	0.812	1.138
11/1/2016	17:52:00	15.7	13.9	1.189	0.812
11/1/2016	20:14:00	15.8	14.2	0.848	1.189
12/1/2016	9:12:00	16.6	14.4	1.236	1.691
12/1/2016	11:21:00	16.7	15.3	0.93	1.389
12/1/2016	15:52:00	17	-	1.33	-
12/1/2016	18:16:00	17.2	-	1.668	-
12/1/2016	21:22:00	17.3	-	0.647	-
12/1/2016	23:15:00	17.4	-	1.063	-
13/1/2016	9:08:00	18	-	1.216	-
13/1/2016	11:32:00	18.1	-	0.836	-
13/1/2016	14:41:00	18.3	-	1.271	-
Average				1.17688	1.22075

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-P ที่อายุ 90 วัน

Specimen : URH20-SP-P

Age : 90 day

Average K (m/s) = 8.41879×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
8/2/2016	16:37:00	1.7	1.1	-	-
8/2/2016	18:30:00	2	1.5	3.19	4.254
8/2/2016	20:11:00	2.2	1.9	2.378	4.76
9/2/2016	8:44:00	3.8	3.5	2.555	2.555
9/2/2016	11:52:00	4.2	3.8	2.558	1.919
9/2/2016	13:21:00	4.3	4	1.35	2.7
9/2/2016	18:55:00	4.9	4.6	2.158	2.158
9/2/2016	21:55:00	5.1	4.8	1.334	1.334
10/2/2016	10:02:00	6.1	5.6	1.652	1.322
10/2/2016	12:11:00	6.3	5.8	1.864	1.864
10/2/2016	16:50:00	6.7	6.2	1.723	1.723
10/2/2016	19:07:00	6.8	6.3	0.879	0.879
11/2/2016	9:10:00	7.8	7.4	1.424	1.57
11/2/2016	13:48:00	8.1	7.7	1.299	1.299
11/2/2016	17:14:00	8.3	7.9	1.165	1.165
11/2/2016	20:55:00	8.5	8.1	1.087	1.087
12/2/2016	9:40:00	9.3	8.8	1.256	1.099
12/2/2016	11:55:00	9.4	8.9	0.891	0.891
12/2/2016	14:21:00	9.5	9	1.142	1.059
12/2/2016	16:48:00	9.7	9.1	1.636	0.816
12/2/2016	20:31:00	9.9	9.3	1.079	1.079
13/2/2016	8:52:00	10.5	9.8	0.973	0.812
13/2/2016	11:07:00	10.6	9.9	1.036	0.863
13/2/2016	15:50:00	10.8	10.1	0.848	0.848

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต URH20-SP-P ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
13/2/2016	18:47:00	11	10.2	1.358	0.679
13/2/2016	21:10:00	11.1	10.3	0.84	0.84
14/2/2016	9:05:00	11.6	10.9	0.84	1.008
14/2/2016	11:47:00	11.7	11	0.742	0.742
14/2/2016	14:04:00	11.8	11.1	0.879	0.879
14/2/2016	16:58:00	11.9	11.2	0.691	0.691
14/2/2016	19:01:00	12	11.3	0.977	0.977
14/2/2016	21:55:00	12.1	11.4	0.691	0.691
15/2/2016	8:12:00	12.5	11.8	0.781	0.781
15/2/2016	10:58:00	12.6	11.9	0.722	0.722
15/2/2016	12:47:00	12.7	12	1.103	1.103
15/2/2016	17:00:00	12.9	12.2	0.95	0.95
15/2/2016	20:04:00	13	12.3	0.651	0.651
16/2/2016	8:49:00	13.5	12.8	0.785	0.785
16/2/2016	12:06:00	13.6	13	0.608	1.22
16/2/2016	15:55:00	13.8	13.2	1.048	1.048
Average				0.819143	0.864615

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-N ที่อายุ 28 วัน

Specimen : GRH10-SP-N Age : 28 days Average K (m/s) = 2.40179×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
5/1/2016	16:44:00	2.2	4.5	-	-
5/1/2016	18:31:00	4.1	5.9	20.1335	10.572
5/1/2016	22:15:00	5.4	7.1	6.977	6.439
6/1/2016	8:45:00	7.6	9	4.199	3.626
6/1/2016	12:35:00	8.4	10.2	4.179	6.271
6/1/2016	19:55:00	9.7	11.5	3.551	3.551
6/1/2016	23:10:00	10.3	12.1	3.696	3.696
7/1/2016	9:12:00	12.2	14	3.795	3.795
7/1/2016	14:35:00	13	14.9	2.978	3.347
7/1/2016	18:50:00	14.2	15.8	5.654	4.242
7/1/2016	21:21:00	14.7	16.2	3.979	3.182
8/1/2016	8:30:00	16.9	18.2	3.951	3.594
8/1/2016	12:15:00	17.7	18.9	4.273	3.74
8/1/2016	17:33:00	18.5	19.8	3.021	3.402
8/1/2016	19:21:00	18.9	20.2	4.45	4.45
8/1/2016	22:48:00	19.4	20.7	2.904	2.904
9/1/2016	7:55:00	20.7	22.1	2.857	3.076
9/1/2016	11:03:00	21.1	22.7	2.558	3.834
9/1/2016	15:20:00	21.7	23.3	2.806	2.806
9/1/2016	19:55:00	22.4	24	3.061	3.061
9/1/2016	21:12:00	22.5	-	1.562	-
10/1/2016	9:10:00	24.4	25.8	3.178	2.719
10/1/2016	13:56:00	25.2	26.6	3.363	3.363
10/1/2016	17:53:00	25.8	27.1	3.041	2.535

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-N ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
10/1/2016	20:05:00	26.3	27.5	4.552	3.641
10/1/2016	23:47:00	26.9	28.1	3.249	3.249
11/1/2016	10:21:00	28.3	29.6	2.653	2.845
11/1/2016	12:49:00	28.7	29.9	3.249	2.437
11/1/2016	17:52:00	29.4	30.6	2.778	2.778
11/1/2016	20:14:00	29.7	31	2.539	3.386
12/1/2016	9:12:00	31.5	32.6	2.782	2.472
12/1/2016	11:21:00	31.7	32.9	1.864	2.794
12/1/2016	15:52:00	32.3	33.6	2.66	3.104
12/1/2016	18:16:00	32.6	33.9	2.504	2.504
12/1/2016	21:22:00	32.9	34.3	1.938	2.586
12/1/2016	23:15:00	33.2	34.6	3.19	3.19
13/1/2016	9:08:00	34.6	35.8	2.837	2.433
13/1/2016	11:32:00	34.8	36.1	1.668	2.504
13/1/2016	14:41:00	35.1	36.3	1.907	1.271
Average				2.3889	2.41467

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-N ที่อายุ 90 วัน

Specimen : GRH10-SP-N Age : 90 days Average K (m/s) = 1.56725×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
8/2/2016	16:37:00	0.9	1.5	-	-
8/2/2016	18:30:00	1.2	1.7	3.19	2.127
8/2/2016	20:11:00	1.5	1.9	3.571	2.378
9/2/2016	8:44:00	3.2	3.6	2.711	2.711
9/2/2016	11:52:00	3.6	4	2.558	2.558
9/2/2016	13:21:00	3.8	4.3	2.7	4.05
9/2/2016	18:55:00	4.5	5.1	2.519	2.88
9/2/2016	21:55:00	4.8	5.4	2.001	2.001
10/2/2016	10:02:00	6.1	6.8	2.15	2.315
10/2/2016	12:11:00	6.4	7	2.794	1.864
10/2/2016	16:50:00	7	7.5	2.586	2.154
10/2/2016	19:07:00	7.1	7.7	0.879	1.754
11/2/2016	9:10:00	8.4	9.2	1.852	2.139
11/2/2016	13:48:00	8.9	9.6	2.162	1.73
11/2/2016	17:14:00	9.2	10	1.75	2.335
11/2/2016	20:55:00	9.6	10.3	2.174	1.632
12/2/2016	9:40:00	10.8	11.5	1.884	1.884
12/2/2016	11:55:00	11	11.7	1.781	1.781
12/2/2016	14:21:00	11.2	11.9	1.876	1.876
12/2/2016	16:48:00	11.4	12.1	1.636	1.636
12/2/2016	20:31:00	11.8	12.4	2.154	1.617
13/2/2016	8:52:00	12.8	13.3	1.621	1.46
13/2/2016	11:07:00	13	13.5	1.727	1.554
13/2/2016	15:50:00	13.4	13.8	1.699	1.275

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-N ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
13/2/2016	18:47:00	13.6	14.1	1.358	2.037
13/2/2016	21:10:00	13.8	14.3	1.679	1.679
14/2/2016	9:05:00	14.8	15.2	1.679	1.515
14/2/2016	11:47:00	14.9	15.4	0.742	1.483
14/2/2016	14:04:00	15.1	15.6	1.754	1.754
14/2/2016	16:58:00	15.4	15.8	2.072	1.381
14/2/2016	19:01:00	15.5	16	0.977	1.954
14/2/2016	21:55:00	15.7	16.2	1.381	1.381
15/2/2016	8:12:00	16.5	17	1.558	1.558
15/2/2016	10:58:00	16.7	17.2	1.448	1.448
15/2/2016	12:47:00	16.9	17.4	2.205	2.205
15/2/2016	17:00:00	17.2	17.7	1.424	1.424
15/2/2016	20:04:00	17.5	17.9	1.958	1.307
16/2/2016	8:49:00	18.5	18.8	1.57	1.413
16/2/2016	12:06:00	18.8	19	1.829	1.22
16/2/2016	15:55:00	19.1	19.3	1.574	1.574
16/2/2016	17:07:00	19.2	19.4	1.668	1.668
Average				1.59927	1.53522

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-P ที่อายุ 28 วัน

Specimen : GRH10-SP-P

Age : 28 days

Average K (m/s) = 9.12617×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
14/1/2016	16:11:00	4.2	6.7	-	-
14/1/2016	19:39:00	4.6	7.5	2.311	4.622
14/1/2016	22:14:00	4.9	8	2.327	3.877
15/1/2016	8:33:00	6	9.3	2.135	2.523
15/1/2016	10:41:00	6.2	9.6	1.88	2.817
15/1/2016	12:51:00	6.3	9.8	0.926	1.848
15/1/2016	17:40:00	6.7	10.3	1.664	2.08
15/1/2016	21:05:00	7.1	10.6	2.347	1.758
16/1/2016	8:44:00	8.1	11.5	1.719	1.546
16/1/2016	11:55:00	8.3	11.6	1.26	0.628
16/1/2016	15:36:00	8.6	11.9	1.632	1.632
16/1/2016	19:57:00	8.9	12.2	1.381	1.381
16/1/2016	22:30:00	9	12.4	0.785	1.57
17/1/2016	8:50:00	9.9	13.1	1.746	1.358
17/1/2016	12:55:00	10.2	13.3	1.472	0.981
17/1/2016	16:12:00	10.4	13.4	1.22	0.608
17/1/2016	19:07:00	10.6	13.8	1.373	2.747
17/1/2016	23:11:00	10.9	14	1.479	0.985
18/1/2016	9:08:00	11.5	14.7	1.209	1.409
18/1/2016	11:44:00	11.8	14.9	2.311	1.542
18/1/2016	13:07:00	11.9	-	1.448	-
18/1/2016	17:18:00	12.2	15.2	1.436	1.079
18/1/2016	20:33:00	12.5	15.4	1.848	1.232
18/1/2016	22:50:00	12.6	15.5	0.879	0.879

ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-P ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
19/1/2016	10:24:00	13.3	16.1	1.213	1.04
19/1/2016	13:55:00	13.5	16.2	1.138	0.569
19/1/2016	17:49:00	13.7	16.5	1.028	1.542
19/1/2016	20:11:00	13.8	16.7	0.848	0.867
19/1/2016	23:15:00	13.9	16.8	0.651	2.453
20/1/2016	8:41:00	14.4	17.3	1.063	1.063
20/1/2016	10:52:00	14.5	-	0.918	-
20/1/2016	13:15:00	14.6	17.4	0.84	0.439
20/1/2016	18:56:00	15	17.7	1.409	1.056
20/1/2016	21:18:00	15.1	17.8	0.848	0.848
20/1/2016	22:50:00	15.2	-	1.307	-
21/1/2016	9:12:00	15.7	18.3	0.965	0.84
21/1/2016	11:45:00	15.8	18.5	0.785	1.57
21/1/2016	14:10:00	15.9	18.6	0.828	0.828
21/1/2016	17:53:00	-	18.7	-	0.538
Average				0.951091	0.874143

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-P ที่อายุ 90 วัน

Specimen : GRH10-SP-P

Age : 90 days

Average K (m/s) = 4.04696×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
18/2/2016	17:05:00	2.1	1.4	-	-
18/2/2016	19:32:00	2.4	1.7	2.453	2.453
18/2/2016	22:04:00	2.7	2	2.37	2.37
19/2/2016	8:52:00	3.9	3.2	2.225	2.225
19/2/2016	11:56:00	4.2	3.5	1.958	1.958
19/2/2016	15:07:00	4.5	3.8	1.887	1.887
19/2/2016	19:02:00	4.9	4.2	2.044	2.044
19/2/2016	20:52:00	5.1	4.4	2.186	2.186
20/2/2016	9:12:00	6.1	5.4	1.625	1.625
20/2/2016	12:15:00	6.3	5.6	1.315	1.315
20/2/2016	16:00:00	6.6	5.9	1.601	1.601
20/2/2016	19:32:00	6.9	6.1	1.699	1.134
20/2/2016	22:04:00	7	6.3	0.789	1.581
21/2/2016	9:50:00	7.7	6.9	1.193	1.02
21/2/2016	12:52:00	7.9	7	1.322	0.659
21/2/2016	17:08:00	8.1	7.2	0.938	0.938
21/2/2016	20:11:00	8.2	7.4	0.655	1.315
22/2/2016	8:04:00	8.7	7.9	0.844	0.844
22/2/2016	11:35:00	8.8	8	0.855	0.855
22/2/2016	14:28:00	8.9	8.1	0.695	0.695
22/2/2016	17:11:00	9	8.2	0.738	0.738
22/2/2016	21:56:00	9.1	8.3	0.42	0.42
23/2/2016	9:14:00	9.4	8.5	0.557	0.353

ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH10-SP-P ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/2/2016	11:57:00	9.5	8.6	0.738	0.738
23/2/2016	15:30:00	9.6	8.7	0.565	0.565
23/2/2016	19:58:00	-	8.8	-	0.447
24/2/2016	8:31:00	9.9	9	0.353	0.318
24/2/2016	10:44:00	10	9.1	0.29	0.903
24/2/2016	18:04:00	10.1	9.2	0.369	0.275
25/2/2016	9:16:00	10.3	9.4	0.322	0.263
25/2/2016	12:55:00	10.4	9.5	0.549	0.549
25/2/2016	19:11:00	10.5	9.6	0.318	0.318
26/2/2016	10:04:00	10.7	9.8	0.271	0.271
26/2/2016	12:37:00	10.8	9.9	0.785	0.785
26/2/2016	17:11:00	10.9	10	0.439	0.439
26/2/2016	22:19:00	11	10.1	0.388	0.388
27/2/2016	10:18:00	11.2	10.3	0.334	0.334
27/2/2016	15:03:00	11.3	-	0.42	-
27/2/2016	18:10:00	11.4	10.4	0.644	0.255
Average				0.421692	0.3877

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-N ที่อายุ 28 วัน

Specimen : GRH20-SP-N Age : 28 days Average K (m/s) = 3.58945×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
14/1/2016	16:11:00	5.4	6.9	-	-
14/1/2016	19:39:00	6.5	8.4	6.357	8.664
14/1/2016	22:14:00	7.5	10.7	7.754	17.835
15/1/2016	8:33:00	11.1	15.4	6.989	9.123
15/1/2016	10:41:00	11.6	16	4.693	5.635
15/1/2016	12:51:00	12.1	16.6	4.622	5.549
15/1/2016	17:40:00	13.4	17.8	5.407	4.991
15/1/2016	21:05:00	14.2	18.6	4.689	4.689
16/1/2016	8:44:00	17.2	21.6	5.156	5.156
16/1/2016	11:55:00	17.9	22.3	4.403	4.403
16/1/2016	15:36:00	18.6	23	3.806	3.806
16/1/2016	19:57:00	19.6	24.4	4.603	6.447
16/1/2016	22:30:00	20.1	24.9	3.928	3.928
17/1/2016	8:50:00	22.7	27.2	5.038	4.458
17/1/2016	12:55:00	23.6	28.1	4.415	4.415
17/1/2016	16:12:00	24.2	28.7	3.661	3.661
17/1/2016	19:07:00	24.9	29.4	4.807	4.807
17/1/2016	23:11:00	25.8	30.4	4.434	4.925
18/1/2016	9:08:00	28	32.5	4.43	4.226
18/1/2016	11:44:00	28.6	33.1	4.622	4.622
18/1/2016	13:07:00	28.8	33.3	2.896	2.896
18/1/2016	17:18:00	29.6	34	3.83	3.351
18/1/2016	20:33:00	30.2	34.6	3.696	3.696
18/1/2016	22:50:00	30.7	35	4.387	3.508

ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-N ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
19/1/2016	10:24:00	33.1	37.2	4.156	3.81
19/1/2016	13:55:00	33.7	37.7	3.418	2.849
19/1/2016	17:49:00	34.5	38.4	4.108	3.594
19/1/2016	20:11:00	34.9	38.7	3.386	2.539
19/1/2016	22:26:00	35.2	39.1	2.672	3.559
19/1/2016	23:15:00	35.4	39.4	4.905	7.358
20/1/2016	8:41:00	37.3	41.2	4.034	3.822
20/1/2016	10:52:00	37.7	41.6	3.669	3.669
20/1/2016	13:15:00	38.1	42	3.363	3.363
20/1/2016	18:56:00	39.2	43.1	3.877	3.877
20/1/2016	21:18:00	39.6	43.5	3.386	3.386
20/1/2016	22:50:00	40	43.9	5.227	5.227
21/1/2016	9:12:00	41.9	45.6	3.673	3.284
21/1/2016	11:45:00	42.4	46	3.928	3.143
21/1/2016	14:10:00	42.7	46.3	2.488	2.488
21/1/2016	17:53:00	43.5	47	4.312	3.771
21/1/2016	19:18:00	43.7	47.2	2.829	2.829
Average				3.6752	3.5037

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-N ที่อายุ 90 วัน

Specimen : GRH20-SP-N Age : 90 days Average K (m/s) = 2.35793×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
18/2/2016	17:05:00	0.6	1	-	-
18/2/2016	19:32:00	1.2	1.7	4.905	5.721
18/2/2016	22:04:00	1.8	2.4	4.744	5.533
19/2/2016	8:52:00	4.3	4.8	4.638	4.45
19/2/2016	11:56:00	4.9	5.4	3.92	3.92
19/2/2016	15:07:00	5.4	6	3.147	3.775
19/2/2016	19:02:00	6.2	6.7	4.093	3.579
19/2/2016	20:52:00	6.5	7.1	3.277	4.371
20/2/2016	9:12:00	8.7	9.4	3.575	3.736
20/2/2016	12:15:00	9.2	9.9	3.284	3.284
20/2/2016	16:00:00	9.9	10.6	3.74	3.74
20/2/2016	19:32:00	10.5	11.2	3.402	3.402
20/2/2016	22:04:00	10.9	11.6	3.163	3.163
21/2/2016	9:50:00	12.8	13.5	3.233	3.233
21/2/2016	12:52:00	13.2	13.9	2.641	2.641
21/2/2016	17:08:00	13.8	14.5	2.817	2.817
21/2/2016	20:11:00	14.2	14.9	2.625	2.625
22/2/2016	8:04:00	15.8	16.6	2.696	2.865
22/2/2016	11:35:00	16.3	17.1	2.723	2.802
22/2/2016	14:28:00	16.7	17.5	2.778	2.778
22/2/2016	17:11:00	17	17.8	2.213	2.213
22/2/2016	21:56:00	17.6	18.5	2.531	2.951
23/2/2016	9:14:00	19	19.9	2.547	2.625
23/2/2016	11:57:00	19.4	20.2	2.951	2.213

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-N ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/2/2016	15:30:00	19.8	20.7	2.256	2.821
23/2/2016	17:14:00	19.9	20.8	1.154	1.154
23/2/2016	19:58:00	20.3	21.1	2.931	2.197
24/2/2016	8:31:00	21.7	22.6	2.233	2.394
24/2/2016	10:44:00	22	22.8	2.711	1.809
24/2/2016	15:27:00	22.5	23.4	2.123	2.547
24/2/2016	18:04:00	22.8	23.7	2.296	2.296
24/2/2016	20:52:00	23.2	24	2.861	2.146
25/2/2016	9:16:00	24.6	25.4	2.26	2.26
25/2/2016	12:55:00	25	25.8	2.194	2.194
25/2/2016	16:00:00	25.4	26.2	2.598	2.598
25/2/2016	19:11:00	25.8	26.5	2.515	1.887
25/2/2016	22:07:00	26	26.9	2.284	2.284
26/2/2016	10:04:00	27.4	28.2	2.347	2.178
26/2/2016	12:37:00	27.7	28.5	2.358	2.358
26/2/2016	17:11:00	28.2	29	2.194	2.194
26/2/2016	19:20:00	28.5	29.3	2.794	2.794
26/2/2016	22:19:00	28.9	29.7	2.288	2.362
27/2/2016	10:18:00	30.3	31.1	2.339	2.339
27/2/2016	12:48:00	30.6	31.4	2.405	2.405
27/2/2016	15:03:00	30.9	31.6	2.672	1.781
27/2/2016	18:10:00	31.3	32	2.57	2.57
Average				2.41557	2.30029

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-P ที่อายุ 28 วัน

Specimen : GRH20-SP-P

Age : 28 days

Average K (m/s) = 1.17529×10^{-11}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
14/1/2016	16:11:00	0.3	1.2	-	-
14/1/2016	19:39:00	0.9	2	3.465	4.622
14/1/2016	22:14:00	1.4	2.4	3.877	3.1
15/1/2016	8:33:00	2.8	3.9	2.719	2.912
15/1/2016	10:41:00	3	4.3	1.88	3.755
15/1/2016	12:51:00	3.3	4.7	2.774	3.696
15/1/2016	17:40:00	3.9	5.4	2.496	2.912
15/1/2016	21:05:00	4.2	5.7	1.758	1.758
16/1/2016	8:44:00	5.3	6.6	1.891	1.546
16/1/2016	11:55:00	5.6	6.8	1.887	1.26
16/1/2016	15:36:00	6	7.1	2.174	1.632
16/1/2016	19:57:00	6.5	7.5	2.303	1.84
16/1/2016	22:30:00	6.9	7.7	3.143	1.57
17/1/2016	8:50:00	7.6	8.7	1.358	1.938
17/1/2016	12:55:00	7.9	9	1.472	1.472
17/1/2016	16:12:00	8.2	9.4	1.829	2.441
17/1/2016	19:07:00	8.5	9.6	2.06	1.373
17/1/2016	23:11:00	8.7	9.9	0.985	1.479
18/1/2016	9:08:00	9.5	11	1.609	2.213
18/1/2016	11:44:00	9.6	11.2	0.769	1.542
18/1/2016	13:07:00	9.7	11.3	1.448	1.448
18/1/2016	17:18:00	9.9	11.6	0.957	1.436
18/1/2016	20:33:00	10.1	11.8	1.232	1.232
18/1/2016	22:50:00	10.2	11.9	0.879	0.879

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-P ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
19/1/2016	10:24:00	11.1	12.8	1.558	1.558
19/1/2016	13:55:00	11.3	13	1.138	1.138
19/1/2016	17:49:00	11.6	13.3	1.542	1.542
19/1/2016	20:11:00	11.7	13.4	0.848	0.848
19/1/2016	22:26:00	11.9	-	1.781	-
19/1/2016	23:15:00	12	13.6	2.453	1.307
20/1/2016	8:41:00	12.7	14.4	1.487	1.699
20/1/2016	10:52:00	12.9	14.7	1.836	2.751
20/1/2016	13:15:00	13	14.8	0.84	0.84
20/1/2016	18:56:00	13.4	15.1	1.409	1.056
20/1/2016	21:18:00	13.6	15.3	1.691	1.691
20/1/2016	22:50:00	13.7	15.4	1.307	1.307
21/1/2016	9:12:00	14.3	16	1.158	1.158
21/1/2016	11:45:00	14.5	16.1	1.57	0.785
21/1/2016	14:10:00	14.6	16.2	0.828	0.828
21/1/2016	17:53:00	-	16.4	-	1.079
Average				1.25757	1.093

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-P ที่อายุ 90 วัน

Specimen : GRH20-SP-P Age : 90 days Average K (m/s) = 5.85859×10^{-12}

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
18/2/2016	17:05:00	1.1	0.3	-	-
18/2/2016	19:32:00	1.5	0.7	3.269	3.269
18/2/2016	22:04:00	1.9	1.1	3.163	3.163
19/2/2016	8:52:00	3.4	3	2.782	3.524
19/2/2016	11:56:00	3.8	3.4	2.613	2.613
19/2/2016	15:07:00	4.1	3.8	1.887	2.515
19/2/2016	19:02:00	4.6	4.2	2.558	2.044
19/2/2016	20:52:00	4.8	4.4	2.186	2.186
20/2/2016	9:12:00	6	5.7	1.95	2.111
20/2/2016	12:15:00	6.3	6	1.97	1.97
20/2/2016	16:00:00	6.7	6.4	2.135	2.135
20/2/2016	19:32:00	7	6.8	1.699	2.268
20/2/2016	22:04:00	7.2	7.1	1.581	2.37
21/2/2016	9:50:00	8.1	7.9	1.53	1.362
21/2/2016	12:52:00	8.3	8.1	1.322	1.322
21/2/2016	17:08:00	8.5	8.4	0.938	1.409
21/2/2016	20:11:00	8.7	8.6	1.315	1.315
22/2/2016	8:04:00	9.3	9.4	1.012	1.35
22/2/2016	11:35:00	9.5	9.6	1.091	1.322
22/2/2016	14:28:00	9.6	9.8	0.695	1.389
22/2/2016	17:11:00	9.7	9.9	0.738	0.738
22/2/2016	21:56:00	9.9	10.1	0.844	0.844
23/2/2016	9:14:00	10.2	10.5	0.718	0.875
23/2/2016	11:57:00	10.3	10.6	0.738	0.738

ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต GRH20-SP-P ที่อายุ 90 วัน (ต่อ)

Day	Time	(Level Water) cm		(K × 10 ⁻¹¹), m/s	
		No.1	No.2	No.1	No.2
23/2/2016	15:30:00	10.4	10.7	0.565	0.565
23/2/2016	19:58:00	10.5	10.8	0.447	0.447
24/2/2016	8:31:00	10.8	11.1	0.479	0.479
24/2/2016	10:44:00	11	11.2	1.809	0.903
24/2/2016	15:27:00	11.1	11.3	0.424	0.424
24/2/2016	18:04:00	11.2	11.4	0.765	0.765
24/2/2016	20:52:00	11.3	11.5	0.714	0.714
25/2/2016	9:16:00	11.6	11.8	0.483	0.483
25/2/2016	12:55:00	11.7	11.9	0.549	0.549
25/2/2016	16:00:00	11.8	12	0.651	0.651
25/2/2016	19:11:00	11.9	-	0.628	-
25/2/2016	22:07:00	12	12.1	0.683	0.326
26/2/2016	10:04:00	12.3	12.4	0.502	0.502
26/2/2016	12:37:00	-	12.5	-	0.785
26/2/2016	17:11:00	12.4	12.6	0.283	0.439
26/2/2016	19:20:00	12.5	12.7	0.93	0.93
26/2/2016	22:19:00	12.6	12.8	0.671	0.671
27/2/2016	10:18:00	12.9	13.1	0.502	0.502
27/2/2016	12:48:00	13	-	0.8	-
27/2/2016	18:10:00	13.1	-	0.373	-
Average				0.587917	0.5838

หมายเหตุ: ส่วนที่แรเงาเป็นส่วนที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยค่าการซึมผ่านน้ำ

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี >>>>>

ที่ วร ๙๓ / 2559

27 กรกฎาคม 2559

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

เรียน นายสุชีพ ศรีชู

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “ผลกระทบของการใช้เก้าอี้แทนที่นั่งในศูนย์แมนต์พอร์ตแลนด์ ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน” เพื่อขอตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ทางกองบรรณาธิการได้พิจารณาแล้วเห็นควรให้ตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2559 ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต แสงสวัสดิ์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก (กม.13) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0 2549 3493 โทรสาร: 0 2549 3493 e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

www.engineer.rmutt.ac.th/journal

ผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

**Effect of Using Rice husk ash to Replace Portland Cement on Compressive strength
of Concrete Under Pressure mold**

สุชีพ ศรีชู¹ และจตุพล ตั้งปกาศิต^{2*}

nong_cheep@hotmail.com¹, jatuphon_t@rmutt.ac.th^{2*}

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. ใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของ บริษัท เอ.ที.ไบโอพาวเวอร์ จำกัด จ.พิจิตร มี 2 ขนาด คือ เถ้าแกลบไม่บด และเถ้าแกลบบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่า การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบความดัน โดยการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) สำหรับการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10

คำสำคัญ : เถ้าแกลบ, กำลังอัด, การหล่อแบบอัดความดัน

Abstract

The objective of this research is to study the effect of the use of rice husk ash (RHA) as a partial replacement of cement on the compressive strength for concrete under pressure mold. By using 28-day compressive, of which equals to 240 ksc. Using RHA from biomass power plant - A.T. Biopower Co.,Ltd. in Phichit province. Two types of RHA, ground (GRH) and unground (URH) are used to replace Portland cement at 10% and 20% by weight of binder. The compressive strengths of concrete are tested at 7, 28, 60 and 90 days, and they all show that the replacement of GRH in Portland cement type I give higher strength of concrete than URH and CON-P. For the development for compressive strength of concrete under pressure mold, the replacement of GRH at 20% by weight in Portland cement can produce higher compressive strength than the replacement of GRH at 10%.

Keywords: Rice husk ash, Compressive strength, pressure mold.

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำแนวคิดเรื่องคอนกรีตสีเขียว (Green Concrete) มาใช้กันมากขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็นคอนกรีตผสมของเสี้ยนหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม คอนกรีตที่ผสมจากมวลรวมที่ถูกใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และคอนกรีตผสมวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต [1] การนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยการนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ใช้ทำคอนกรีต โดยที่คอนกรีตยังคงคุณสมบัติไม่ต่างจากเดิมหรือมีคุณสมบัติดีกว่าเดิม [2] ทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงและยังเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

เถ้าแกลบก็เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นซิลิกา (silica) สูง เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นวัสดุปูชโซลาน เพื่อใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยสามารถให้กำลังอัดเท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์ปกติ ที่ปริมาณการใช้ไม่เกินร้อยละ 20 [3, 4]

นอกจากการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังมีการศึกษาวิจัยในด้านการพัฒนาคอนกรีตให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งก็เป็นแนวทางในการลดปัญหาทางด้านมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย โดยมีการศึกษาการหล่อคอนกรีตภายใต้แบบอัดความดันสามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น โดยไม่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น หมายความว่า ถ้าใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่าเดิม การใช้แบบหล่ออัดความดันจะสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ [5] จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการหล่อคอนกรีตแบบอัดความดันและการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ร่วมกันจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก ซึ่งในอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปได้มีการพัฒนาระบบการผลิตมาอย่างต่อเนื่อง โดยอุตสาหกรรมผลิตเสาเข็มกลมแรงเหวี่ยงอัดแรง (Spun pile) ซึ่งรูปแบบการผลิตใช้กรรมวิธี

การปั่นคอนกรีตในแบบหล่อที่หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยวิธีธรรมดา [6] จากแนวคิดดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มทางเลือกในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการพัฒนาวิธีการหล่อคอนกรีตโดยใช้แบบหล่ออัดความดันและการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตและลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้มาก โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดันที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 เถ้าแกลบ ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแกลบของ บริษัท เอ.ที โป โอปาวเวอร์ จำกัด จังหวัดพิจิตร มี 2 ขนาด คือเถ้าแกลบไม่บด และเถ้าแกลบบดละเอียด มีขนาดกำลังบดตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 86 และ 7 โดยน้ำหนักตามลำดับ

3.1.3 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.1.4 สารลดน้ำพิเศษ

3.1.5 หิน ใช้หินที่มีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มม.

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 แบบหล่ออัดความดัน ขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 10x10x11 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยการใส่คอนกรีตให้มีความสูงเท่ากับ 11 ซม. เมื่อปิดฝาและดำเนินการ

ชั้นน็อคที่บนฝาจะทำให้ฝาแบบหล่ออัดคอนกรีตเหลือ
ความสูง 10 ซม.

3.2.2 แบบหล่อคอนกรีตธรรมดา มีขนาด 10x10x10 ซม.

ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีกำลังอัดเท่ากับ 240กก./

ตร.ซม.ที่อายุ 28 วัน ในตารางที่ 1 โดยวิธีของ ACI [7]

3.3.2 หล่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแบบหล่อธรรมดาและ
แบบอัดความดันคงที่โดยการชั้นน็อคที่บนฝาจะทำให้ฝา
แบบหล่ออัดคอนกรีตที่มีปริมาณของความสูงเดิม 11 ซม. ให้
เหลือความสูง 10 ซม. จากนั้นจะทำการถอดแบบ เมื่อ
คอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มด้วยน้ำ

3.3.3 ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต เมื่ออายุของ
คอนกรีต 7, 28, 60 และ 90 วัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) แบบหล่ออัดความดัน (ข) แบบหล่อพลาสติกแข็ง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Sample	Mix Proportion (by weight)						Slump (cm.)
	C (kg)	RH (kg)	S (kg)	R (kg)	W (kg)	SP* (kg)	
CON-N	316	-	739	1,090	211.42	-	10.30
CON-P	316	-	739	1,090	211.42	-	10.30
URH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	11.70
URH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	7.50
URH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	11.70
URH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	7.50
GRH10-SP-N	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	12.10
GRH20-SP-N	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	8.90
GRH10-SP-P	284.40	31.60	739	1,090	210.88	1.09	12.10
GRH20-SP-P	252.80	63.20	739	1,090	210.32	2.20	8.90

หมายเหตุ : * ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมสำหรับตัวอย่างที่ใช้สารลดน้ำพิเศษจะคิดน้ำที่ผสมอยู่ในสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 50

โดยปริมาณการใส่สารลดน้ำพิเศษใช้ค่า Slump เท่ากับ 10 ± 2.5 ซม. เป็นเกณฑ์ควบคุม

สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบด้วย CON หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน, URH และ GRH หมายถึง เถ้าแกลบไม่บดและเถ้าแกลบบดละเอียด, SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ, N และ P หมายถึง ตัวอย่างแบบหล่อธรรมดาและการหล่อแบบอัดความดัน ส่วนตัวเลข 10 และ 20 แสดงถึงร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ URH10-SP-P หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าแกลบไม่บด (URH) แทนที่ในปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 โดยเติมสารลดน้ำพิเศษ (SP) เพื่อปรับค่ายุบตัว โดยการหล่อตัวอย่างแบบอัดความดัน, CON-N หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา, CON-P หมายถึง คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบอัดความดัน

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าแกลบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบ แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่า เถ้าแกลบ มีปริมาณ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90.62 ในขณะที่มีองค์ประกอบอื่นในปริมาณน้อย และการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การปรับปรุงคุณภาพวัสดุพอซโซลานโดยการบดไม่มีผลทำให้องค์ประกอบเคมีเปลี่ยนแปลง [8] และเถ้าแกลบบดละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าแกลบอนุภาคขนาดใหญ่ มีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกัน [9]

ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) เท่ากับ 1.99 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่ความละเอียดโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 พบว่า เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) มีขนาดอนุภาคค้างบน

ตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 86 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่าเถ้าแกลบไม่บดมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และเถ้าแกลบบดมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบ
SiO_2	20.40	90.62
Al_2O_3	5.40	0.25
Fe_2O_3	3.10	0.20
CaO	63.71	0.85
MgO	1.04	0.35
K_2O	0.54	2.17
SO_3	2.90	0.13
Na_2O	0.08	0.04
LOI	2.83	5.39

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบ	
		ไม่บด	บดละเอียด
ความถ่วงจำเพาะ	3.18	1.99	1.99
ร้อยละ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325	13.5	86	7

4.2 ผลกระทบเนื่องจากความหนาแน่น

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. พบว่า คอนกรีตมาตรฐานที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดา (CON-N) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ 2,377 กก./ลบ.ม. แต่เมื่อทำการหล่อแบบอัดความดัน (CON-P) จะมีค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เท่ากับ 2,484 กก./ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน เท่ากับ 107 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.50 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต

(URH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (URH10-SP-P) เท่ากับ 111 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.71 และตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (URH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (URH20-SP-P) เท่ากับ 169 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.20 คอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่างคอนกรีต (GRH10-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH10-SP-P) เท่ากับ 166 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.05 และตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 (GRH20-SP-N) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นจากการหล่อแบบอัดความดัน (GRH20-SP-P) เท่ากับ 146 กก./ลบ.ม. หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.16 จะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. ของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON), ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตรา ร้อยละ 10 และ 20 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการหล่อแบบอัดความดันมีผลทำให้มวลรวม อยู่ชิดกันมากขึ้นช่องว่างระหว่าง มวลรวมน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5, 10] พบว่า เมื่อมวลรวม อยู่ชิดกันมากๆ ความหนาแน่นก็ย่อมเพิ่มสูงขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบเทียบกับความแน่นของตัวอย่างคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน จะเห็นว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ GRH ร้อยละ 10 เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ GRH มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ การแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นต่ำลง ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีความหนาแน่นที่

เพิ่มขึ้นสูงกว่าตัวอย่างของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบ URH ร้อยละ 10 เนื่องจากคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ URH มีค่า Slump น้อย การหล่อคอนกรีตให้แน่นด้วยแบบหล่อธรรมดาทำได้ค่อนข้างยาก การแทนที่เถ้าแกลบ URH ในปริมาณมากขึ้นความหนาแน่นจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าผลต่างของความหนาแน่นของคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดากับการหล่อแบบอัดความดันมีค่าสูงขึ้นจากการแทนที่เถ้าแกลบ URH เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ตัวอย่างของคอนกรีต	หน่วยน้ำหนักเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ผลต่าง (กก./ลบ.ม.)	เพิ่มขึ้น (%)
CON-N	2,377	107	4.50
CON-P	2,484		
URH10-SP-N	2,358	111	4.71
URH10-SP-P	2,469		
URH20-SP-N	2,348	169	7.20
URH20-SP-P	2,517		
GRH10-SP-N	2,356	166	7.05
GRH10-SP-P	2,522		
GRH20-SP-N	2,369	146	6.16
GRH20-SP-P	2,515		

4.3 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละของคอนกรีต พบว่า คอนกรีต CON-N มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264 และ 356 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต CON-P มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 371 และ 526 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 141 และ 148 ของคอนกรีต CON-N ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-P มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีต CON-N

ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละของตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่างของคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ตร.ซม. - (%))			
	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
CON-N	264 (100)	290 (100)	329 (100)	356 (100)
CON-P	371 (141)	413 (142)	465 (141)	526 (148)
URH10-SP-N	264 (100)	287 (99)	329 (100)	360 (101)
URH10-SP-P	366 (139)	431 (149)	460 (140)	521 (146)
URH20-SP-N	258 (98)	286 (99)	327 (99)	352 (99)
URH20-SP-P	360 (136)	411 (142)	464 (141)	521 (146)
GRH10-SP-N	269 (102)	328 (113)	341 (104)	363 (102)
GRH10-SP-P	376 (142)	461 (159)	490 (149)	534 (150)
GRH20-SP-N	271 (103)	336 (116)	346 (105)	368 (103)
GRH20-SP-P	380 (144)	470 (162)	491 (149)	545 (153)

หมายเหตุ : การเทียบร้อยละของกำลังอัดเทียบจากกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N

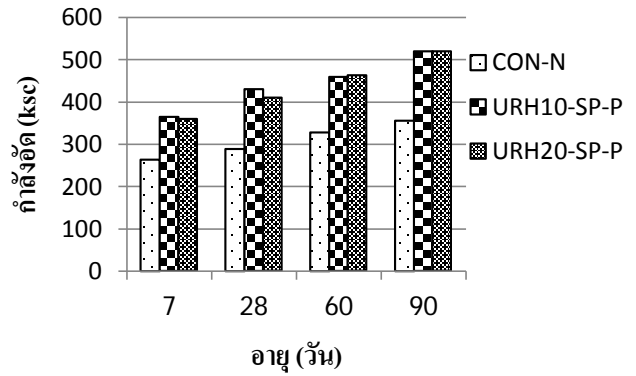
ส่วนคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N และ URH20-SP-N มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 258 และ 360, 352 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 98 และ 101, 99 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ และคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์อัตรา ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-N และ GRH20-SP-N มีกำลังอัด ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 269, 271 และ 363, 368 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 102, 103 และ 102, 103 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ จะเห็นว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N มีกำลังอัดใกล้เคียงกับ CON-N เนื่องจากการควบคุมค่า Slump ของการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบโดยใส่สารลดน้ำพิเศษ เพื่อควบคุมอัตราส่วน W/C ให้เท่าเดิม และจากอัตราการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่น้อยไม่เกินร้อยละ 10 จึงส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดเพียงเล็กน้อยจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจากการแทนที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ทราย

แม่น้ำบดซึ่งเป็นวัสดุเนื้อหามีความเป็นผลึกสูงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีแทนที่ในปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยจะทำให้กำลังอัดลดลงเล็กน้อย [11] และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของคอนกรีต แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าลดลง [12] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH20-SP-N กับตัวอย่างคอนกรีต CON-N พบว่าค่ากำลังอัดของ URH20-SP-N ทุกอายุการทดสอบมีทิศทางต่ำกว่าตัวอย่าง CON-N จะเห็นได้ว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมากขึ้นจากการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงมาก ส่วนของกำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นยังไม่มากพอที่จะสามารถชดเชยกำลังอัดได้ในส่วนที่หายไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจะมีกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น [8] และคอนกรีตที่

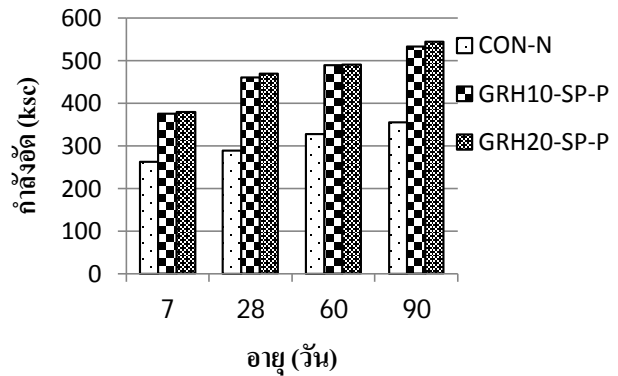
ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนร้อยละ ที่มากขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง [12]

เมื่อทำการหล่อคอนกรีตที่แทนที่ด้วย เถ้าแกลบไม่บด (URH) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 366, 360 และ 521, 521 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 139, 136 และ 146, 146 ของคอนกรีตมาตรฐาน(CON-N) ตามลำดับ และค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่อายุ 7 วัน และ 90 วัน เท่ากับ 376, 380 และ 534, 545 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 142, 144 และ 150, 153 ของคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ตามลำดับ แสดงว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบชนิดเดียวกันใน อัตราการแทนที่เท่ากันของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-N, URH20-SP-N, GRH10-SP-N, GRH20-SP-N ซึ่งเป็นไป ทิศทางเดียวกับ อย่างคอนกรีต CON-P

ผลกำลังอัดคอนกรีตข้างต้น แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-P, URH10-SP-P, URH20-SP-P, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ภายใต้การหล่อ แบบอัดความดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและมีค่า สูงกว่าคอนกรีตที่หล่อด้วยแบบหล่อธรรมดาเพราะเมื่อ คอนกรีตอยู่ภายใต้ความดัน มีผลทำให้ช่องว่างใน คอนกรีตลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ ซีเมนต์เพสต์ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย ที่ผ่านมา [5, 10] พบว่า ค่ากำลังอัด ของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้การ หล่อที่มีแรงดันบีบอัดเพราะทำให้ช่องว่างในคอนกรีต ลดลงจึงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซีเมนต์เพสต์ ในการยึดมวลรวมให้แน่นมากขึ้น



รูปที่ 2 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับ คอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (URH)



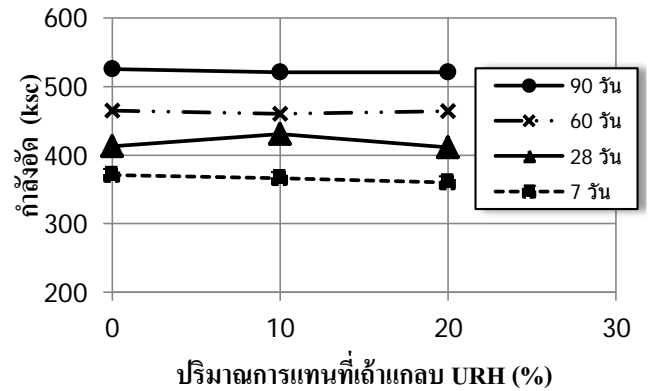
รูปที่ 3 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต CON กับ คอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบ (GRH)

จากรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัด ของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วย แบบหล่อธรรมดากับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วย เถ้าแกลบไม่บด (URH) ในปูนซีเมนต์ภายใต้การหล่อ แบบอัดความดัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH) ทุกอัตราการแทนที่และทุก อายุของการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตโดยมีค่าสูงกว่า กำลังอัดมาตรฐาน ซึ่งกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต CON-N, URH10-SP-P, URH20-SP-P ที่อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 366, 360 และ 356, 521, 521 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 139, 136 และ 100, 146, 146 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของ ตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน (CON-N) ที่หล่อด้วยแบบ

หล่อธรรมดาด้วยตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย
 ใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH) ภายใต้การหล่อแบบอัด
 ความดันดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต
 ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้แก่ลบบดละเอียด (GRH) ทุก
 อัตราการแทนที่และทุกอายุการทดสอบมีค่าสูงกว่ากำลัง
 อัดของตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน โดยกำลังอัดของ
 ตัวอย่างคอนกรีต CON-N, GRH10-SP-P, GRH20-SP-P ที่
 อายุ 7 และ 90 วัน เท่ากับ 264, 376, 380 และ 356, 534,
 545 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 100, 142, 144 และ
 100, 150, 153 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่แทนที่
 ด้วยใ้แก่ลบ URH และ GRH ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 ประเภทที่ 1 ปริมาตรร้อยละ 10 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ
 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดันจะมีค่ากำลังอัดสูง
 กว่าตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐานแบบหล่อธรรมดา จากผล
 ที่ได้เห็น ได้ว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงโดยเฉลี่ยมากกว่า
 ร้อยละ 40 ซึ่งมีแนวโน้มสามารถพัฒนาให้คอนกรีตใ้
 แก่ลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ใ้แก่ลบเพิ่มขึ้นภายใต้การหล่อ
 แบบอัดความดัน ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์
 ลงและลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โดยที่กำลังอัดของ
 คอนกรีตยังคงมีค่าเท่าเดิม สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่าน
 มา [5] พบว่า การหล่อคอนกรีตภายใต้แรงดันจะสามารถ
 ลดปูนซีเมนต์ลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของ
 คอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัด เท่ากับ 400 กก./ตร.ซม. ใ้
 แบบหล่อธรรมดาจะมีค่ากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตที่
 ออกแบบกำลังอัดเท่ากับ 300 กก./ตร.ซม. ใ้แบบหล่อ
 อัดความดัน ผลที่ได้สามารถพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลัง
 สูงขึ้นโดยไม่ต้องใ้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่ม

4.4 ผลกระทบร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยใ้แก่ลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ภายใต้การ หล่อแบบอัดความดัน

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง
 ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยใ้แก่ลบไม่บด (URH) กับ
 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน
 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์
 ด้วยใ้แก่ลบไม่บด (URH) กับค่ากำลังอัดของ
 คอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

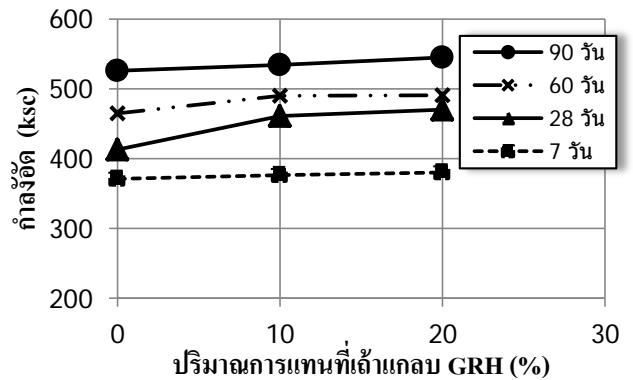
ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยใ้แก่ลบไม่บด
 (URH) ในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ของ
 ตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P และ URH20-SP-P มีค่า
 ใกล้เคียงกับตัวอย่าง CON-P ถึงแม้ว่าใ้แก่ลบไม่บดมี
 อนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงมาก [3] จากการ
 แทนที่ใ้แก่ลบไม่บด (URH) ทำให้กำลังอัดลดลงจาก
 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไป แต่กำลังอัดที่ได้ปฏิกิริยา
 ปอซโซลานที่เกิดขึ้นและการหล่อแบบอัดความดัน
 สามารถชดเชยกำลังอัดได้เพียงพอทำให้มีค่าไม่แตกต่าง
 กัน และเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่ใ้แก่ลบไม่บด
 (URH) ของตัวอย่างคอนกรีต URH10-SP-P กับ
 URH20-SP-P พบว่า ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน กำลังอัด
 ของ URH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P อยู่เล็กน้อย
 เนื่องจากการแทนที่ในปริมาณน้อย จะไม่ส่งผลกระทบต่อ
 กำลังอัดมากนักและยังมีกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซ
 ลานเกิดขึ้น จึงเป็นผลทำให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่ที่อายุ 60
 วันขึ้นไป กำลังอัดของ URH10-SP-P และ URH20-SP-P
 มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการพัฒนากำลังอัดของ
 คอนกรีตที่แทนที่ใ้แก่ลบไม่บด (URH) ภายใต้การหล่อ
 แบบอัดความดัน ในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน เป็นผลได้จาก
 ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซ
 ลานเกิดขึ้นยังไม่มากเนื่องจากใ้แก่ลบไม่บดมีอนุภาค
 ใหญ่ การแทนที่ใ้แก่ลบเพิ่มขึ้นทำให้ปูนซีเมนต์ลดลง
 ค่ากำลังอัดจึงต่ำลงและเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วันขึ้นไป

กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้ การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 จึงสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2] การพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีการพัฒนาช้า แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะพัฒนากำลังมากขึ้นและยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุปอซโซลานด้วย คือวัสดุละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน พบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปริมาณการแทนที่ ร้อยละ 10 และ 20 ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P และ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า CON-P เนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบมีผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกสอดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น

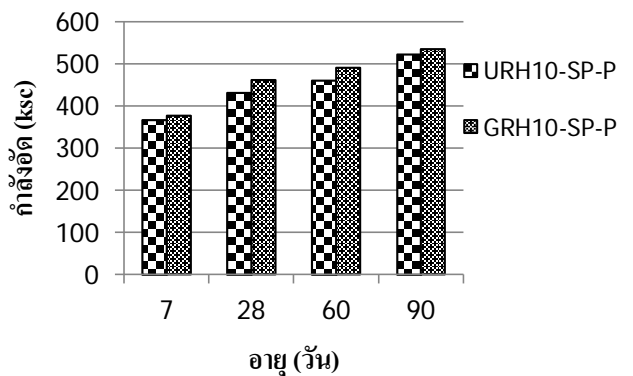
และเมื่อพิจารณาปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P กับ GRH20-SP-P พบว่า ค่ากำลังอัดของ GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า GRH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ แสดงว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่เถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในปริมาณที่ร้อยละ 20 มีกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นสูงกว่า โดยสามารถชดเชยกำลังอัดที่หายไปจากการลดลงของปูนซีเมนต์ได้จึงทำให้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่า การใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ซึ่งกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก

ให้กำลังค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH) กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน

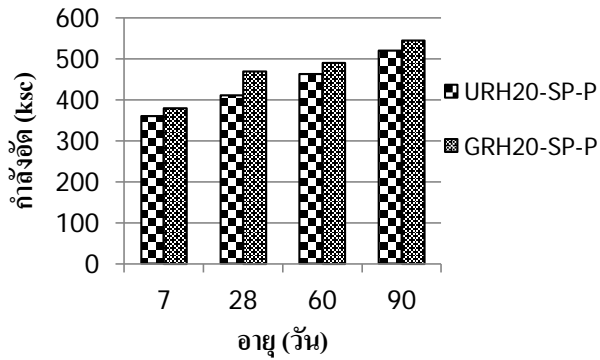
4.5 ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าแกลบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังอัดคอนกรีตแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบไม่บด (URH10-SP-P) และเถ้าแกลบบดละเอียด (GRH10-SP-P) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 10

พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH10-SP-P มีค่าสูงกว่า URH10-SP-P ทุกอายุการทดสอบ เนื่องจากเจ้าแกลบที่บดละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและสามารถอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า



รูปที่ 7 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตแทนที่เจ้าแกลบร้อยละ 20

และจากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบร้อยละ 20 ภายใต้การหล่อแบบอัดความดัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเจ้าแกลบไม่บด (URH20-SP-P) และเจ้าแกลบบดละเอียด (GRH20-SP-P) ในปูนซีเมนต์อัตราร้อยละ 20 พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต GRH20-SP-P มีค่าสูงกว่า URH20-SP-P ทุกอายุการทดสอบซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ทำการหล่อแบบอัดความดัน ตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) สามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่เจ้าแกลบไม่บด (URH) เนื่องจากความละเอียดของเจ้าแกลบทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและอนุภาคที่มีความละเอียดสูงทำให้สามารถแทรกอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เจ้าแกลบละเอียดมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูง ที่ส่วนผสมเดียวกัน คอนกรีตผสมเจ้าแกลบละเอียดมีกำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา [9] และกำลังของมอร์ตาร์ที่มีเจ้าแกลบหินผสมอยู่จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเจ้าแกลบหิน โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเจ้าแกลบ

หินละเอียดที่สุดให้กำลังอัดสูงสุด ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเจ้าแกลบหินขนาดหยาบที่สุดจะให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด [13]

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองจากงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตแทนที่ด้วยเจ้าแกลบไม่บด (URH) และคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P) โดยการแทนที่เจ้าแกลบบดละเอียด (GRH) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10
2. การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทำการหล่อแบบอัดความดันการแทนที่เจ้าแกลบไม่บด (URH) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงคอนกรีตมาตรฐาน (CON-P)

6. กิตติประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2560 และ บริษัท เอ.ที.ไบโอพาวเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] เฉลิมขจร เจริญรัตนภิรมย์, “GREENCON CRETE คอนกรีตสีเขียวเพื่อสิ่งแวดล้อม,” วารสารคอนกรีต TCA e-magazine ฉบับที่ 16 ประจำเดือน สิงหาคม 2548.
- [2] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548. “การศึกษาค่าดัชนีกำลังของ มอร์ตาร์ที่เกิดจากไฮดรชันการอัดตัวอนุภาคและปฏิกิริยา ปอซโซลาน ของเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมัน,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2548, หน้า 465 ถึง 475.

- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท.).พิมพ์ครั้งที่ 7.
- [4] V. Sata, J. Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt., 2012, "Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland" Cement & Concrete Composites, Vol.34, No.1, pp.94-100.
- [5] สุกฤษ มณีรัตน์, ชำนาญกิจ ศิริยานนท์, พิเศษฐ์ สร้อยสำโรง, สมคิด กุลสุวรรณ, นพรัตน์ วิลารักษ์ และ จตุพล ตั้งปกาศิต, "กำลังอัดของคอนกรีตภายใต้แบบหล่อแบบอัดความดัน," การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปี ครั้งที่ 10. วันที่ 20-22 ตุลาคม 2557 ณ โรงแรมดุสิตไฮสแตนดาร์ดรีสอร์ท จังหวัด เชียงราย บทความที่ MAT 63.
- [6] บริษัท ฌรณงค์ไมโครสปัน จำกัด. เสาค้ำ Spun Micropile. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : www.narongmicrospun.com
- [7] American concrete Institute. ACI 211. 1-91 : Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass concrete and ACI 201. 2R-92 : Guild to Durable concrete. ACI Manual of concrete Practice, Part1, Michigan, 2000.
- [8] วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546. "วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน," วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 26 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2546, พ.ศ.2546, หน้า 459 ถึง 473.
- [9] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรการ วงศ์คำจันทร์, 2544. "พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด," วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2544 , พ.ศ.2544, หน้า 327 ถึง 341.
- [10] สมิตร ส่องพิริยะกิจ, ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข, กันตพงศ์ ผิวเหลือง, ธีรวัจน์ ผกผ่า และ รัฐพล เกียรติวิริยะบุญมา, 2549. "กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อก่อตัวภายใต้แรงดัน สูง," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, วันที่ 20-22 เมษายน 2549 ณ โรงแรม เมอร์ลินบีช จังหวัดภูเก็ต. บทความที่ MAT 58.
- [11] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2550. "การศึกษาผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด," วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2550, หน้า 141 ถึง 151.
- [12] สุวัฒน์ งามจันทร์, วชิรณัฏ เสนาวัง, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2558. "ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด การซึมของน้ำ และการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 ณ จังหวัดชลบุรี, หน้า 1 ถึง 6.
- [13] จตุพล ตั้งปกาศิต, "การศึกษาค่าดัชนีกำลังและผลของขนาดเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2541.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสุชีพ ศรีชู
วัน เดือน ปีเกิด	26 ธันวาคม 2523
ที่อยู่	34 หมู่ 3 ตำบลหูล่อง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย พ.ศ.2551
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกร 6 ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ.2555-ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	086 489 3980
อีเมล	nong_cheep@hotmail.com

