

**การศึกษาคูณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมถั่วลอย
และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างบ้าน**



นายวุฒิพัทธ์ ราชคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**A STUDY OF PROPERTIES ON LIGHT WEIGHT CLAY
BRICK CONTAINING FLY ASH AND CALCIUM
HYDROXIDE FOR HOUSING CONSTRUCTION
MATERIALS**

Phutthiphat Ratchakam



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์
สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างบ้าน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวัชรเดช)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พุดิพัทธ์ ราชคำ : การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและ
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างบ้าน (A STUDY OF PROPERTIES
ON LIGHTWEIGHT CLAY BRICK CONTAINING FLY ASH AND CALCIUM
HYDROXIDE FOR HOUSING CONSTRUCTION MATERIALS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 245 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอิฐดินเหนียวมวลเบาให้สามารถใช้งานและมีคุณสมบัติ
เทียบเท่าอิฐดินดิบจากดินเหนียวล้วนที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งเป็นการนำวัสดุดินเหนียวด้านเกวียนที่
ผ่านการบดเป็นผงละเอียด มีคุณสมบัติที่มีความเป็นพลาสติกสูง นำมาผสมกับเถ้าลอยและวัสดุผสม
เพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40
โดยน้ำหนักของดินเหนียว ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นวัสดุผสมเพิ่มอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15
และ 20 โดยน้ำหนักของดินเหนียว เป็นวัสดุช่วยประสานในส่วนผสม กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อ
ดินเหนียวที่เหมาะสมเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนักดินเหนียว และใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่ม
ฟองอากาศที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผสมเข้าไปในส่วนผสมเพื่อช่วยให้อิฐ
ดินเหนียวมีน้ำหนักเบา บ่มตัวอย่างให้ได้อายุทดสอบที่ 7, 28 และ 60 วัน ทำการทดสอบกำลังอัด
การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก การหดตัวเชิงปริมาตรรวม การซึมผ่านของน้ำ และการนำความร้อน
ของอิฐดินเหนียวทุกส่วนผสมตามลำดับ

จากผลการศึกษา พบว่า ปริมาณการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอก
ไซด์ที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้น การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดลง โดยอิฐดินเหนียวมวล
เบาที่มีการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 40 ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 20
ที่มีการเติมสารเพิ่มฟองอากาศ มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.10 กก/ซม² และ 25.98 กก/ซม² การดูดซึมน้ำ
มีค่าเท่ากับ 23.3 % และ 24.8 % หน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าเท่ากับ 1388.1 กก/ม³ และ 1232.2 กก/ม³
หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าเท่ากับ 1110.4 กก/ม³ และ 1094.3 กก/ม³ ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม
แบบขึ้นมีค่าเท่ากับ 2.86 % และ 2.05 % ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งมีค่าเท่ากับ 4.94
% และ 2.96 % ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าเท่ากับ 1.59×10^{-8} ม/วินาที และ 0.35×10^{-8}
ม/วินาที และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.218 วัตต์/เมตร.เคลวิน และ 0.217 วัตต์/
เมตร.เคลวิน ที่อายุ 28 วันและ 60 วัน นอกจากนี้ยังพบว่า อิฐดินเหนียวมวลเบาที่ทำขึ้นจากดิน
เหนียวด้านเกวียนแทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเติมสารเพิ่มฟองอากาศ มี
หน่วยน้ำหนักประมาณ 1200 กก/ม³ และค่ากำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ดี แต่หากไม่ผสมรวมกับ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะไม่สามารถทนน้ำได้ การใช้เถ้าลอยร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารเพิ่มฟองอากาศ ยังช่วยลดการหดตัว หน่วงน้ำหนัก การซึมผ่านน้ำ และการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PHUTTHIPHAT RATCHAKAM : A STUDY OF PROPERTIES ON
LIGHTWEIGHT CLAY BRICK CONTAINING FLY ASH AND CALCIUM
HYDROXIDE FOR HOUSING CONSTRUCTION MATERIALS.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 245 PP.

CLAY BRICK / LIGHT WEIGHT BRICK / DAN KWIAN CLAY / FLY ASH /
CALCIUM HYDROXIDE

This research aimed to develop lightweight clay bricks to use and have properties comparable to adobe that is commonly used. This was the use of Dan kwian clay thoroughly ground into a fine powder having high plasticity to mix with fly ash and calcium hydroxide. Fly ash was used instead of clay at the ratio of 0, 10, 20, 30, and 40 percent by weight of clay and calcium hydroxide was added to the mixture at the ratio of 5, 10, 15, and 20 percent by weight of clay as a binding material. The appropriate ratio of water to clay was 0.65 by weight of clay and foaming agent was used at 0.5 percent by weight of the calcium hydroxide, mixed in to the ingredients to make the brick light. The samples were cured for 7, 28, and 60 days before being tested for their compressive strength, water absorption, unit weight, total volume shrinkage, water permeability, and thermal conductivity of all clay mixtures, respectively.

The study found that the higher substitution of clay with fly ash and calcium hydroxide, the higher the compressive strength while water absorption, unit weight, percent total volume shrinkage, coefficient of water permeability and coefficient of thermal conductivity decreased. The lightweight clay bricks with 40 percent

substitution of clay by fly ash mixed with 20 percent calcium hydroxide and foaming agent had the compressive strength of 13.10 kg/cm² and 25.98 kg/cm², the water absorption of 23.3% and 24.8%, wet unit weight of 1388.1 kg/m³ and 1232.2 kg/m³, dry unit weight of 1110.4 kg/m³ and 1094.3 kg/m³, percent of wet total volume shrinkage of 2.86% and 2.05%, percent of dry total volume shrinkage of 4.94% and 2.96%, the coefficient of water permeability of 1.59×10^{-8} m/s and 0.35×10^{-8} m/s and the coefficient of thermal conductivity of 0.218 W/m.°K and 0.217 W/m.°K at 28 and 60 days, respectively. In addition, lightweight clay bricks made from the substitution of Dan kwian clay with fly ash mixed with calcium hydroxide and foaming agent had the unit weight about 1200 kg/m³ and the compressive strength was at a good level. However, if it was not mixed with calcium hydroxide then water can penetrate. The use of fly ash with calcium hydroxide and foaming agent also significantly helped reducing shrinkage, unit weight, water permeability and thermal conductivity.

School of Civil Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลกรต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการและหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรณเดช กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร. คำภี จิตชัยภูมิ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านความรู้ทางวิชาการ และวัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย ที่ดีตลอดมา

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และอำนวยความสะดวกในเรื่องเอกสารต่างๆ และผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พุดิพัทธ์ ราชคำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	๗
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อัฐดินเหนียว	5
2.1.1 ประวัติความเป็นมาของอัฐดินเหนียว.....	5
2.1.2 อัฐดินเหนียวเผา	6
2.2 รูปแบบของบ้านดิน (Earth Housing).....	10
2.2.1 ดินอัด (Rammed Earth)	10
2.2.2 อัฐดินดิบ (Adobe).....	11
2.2.3 ก้อนดินอัด (Compressed earth block)	11
2.2.4 ดินป่น (Cob).....	12
2.2.5 ดินฉาบบนโครงไม้ (Wattle and daub)	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ความทนทานของบ้านดิน	14
2.4 ดิน	15
2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน	17
2.4.2 สถานภาพของดิน.....	17
2.4.3 การจำแนกประเภทของดิน	18
2.4.4 สารปรับสภาพหรือสารผสมเพิ่มในดิน.....	19
2.5 ดินเหนียว	21
2.6 โครงสร้างของผลึกของดินเหนียว.....	22
2.6.1 Silica tetrahedral unit.....	22
2.6.2 Alumina octahedral unit	23
2.7 คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว.....	23
2.7.1 รูปร่างและขนาด	23
2.7.2 พื้นที่ผิว	23
2.7.3 ความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติก	24
2.7.4 การขยายตัว	24
2.8 ดินเหนียวด้านเกวียน.....	25
2.8.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวและดินทราย ด้านเกวียน	25
2.8.2 ผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคดินเหนียวและดินทราย ด้านเกวียน	26
2.8.3 ผลการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคดินตัวอย่าง โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	26
2.9 วัสดุปอชโซลาน	27
2.9.1 การนำวัสดุปอชโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	30
2.9.2 ปฏิกิริยาปอชโซลาน	31
2.10 ปอชโซลานธรรมชาติ.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11	เถ้าลอย	33
2.11.1	องค์ประกอบทางเคมี.....	35
2.11.2	ความละเอียดของเถ้าลอย	35
2.11.3	ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย	36
2.11.4	ประโยชน์ของเถ้าลอยในงานคอนกรีต.....	36
2.12	ปูนขาว	38
2.12.1	Quick Lime	38
2.12.2	Hydrate Lime	41
2.13	สารเคมีผสมเพิ่ม	42
2.14	สรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
2.15	ข้อสรุปสรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
2.16	กรอบแนวคิดงานวิจัย	50
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
3.1	บทนำ	51
3.2	วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	51
3.2.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	51
3.2.2	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	51
3.3	การเตรียมวัสดุดินเหนียวและหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบ	54
3.3.1	การเตรียมวัสดุดินเหนียว	54
3.3.2	การผสมส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบาสำหรับหล่อก้อนตัวอย่าง	54
3.4	สัญลักษณ์แสดงสัดส่วนส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบา	55
3.5	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินเหนียวและวัสดุปอซโซลาน	57
3.5.1	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเหนียว	58
3.5.2	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน	58
3.6	การทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเหนียวมวลเบา	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวมวลเบา	62
3.7.1	การทดสอบหาร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตร	62
3.7.2	การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ	62
3.7.3	การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก	63
3.7.4	การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	63
3.7.5	การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	64
3.8	สรุปจำนวนของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	65
3.8.1	ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่ากำลังอัด, ดูดซึมน้ำ, หน่วยน้ำหนัก, หดตัว แบบขึ้นและแบบแห้ง, การซึมผ่านของน้ำ และการนำความร้อน ของอิฐดิน เหนียวมวลเบา	65
4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล	67
4.1	บทนำ	67
4.2	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	67
4.2.1	คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด้านเกวียน	67
4.2.2	คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอย และแคลเซียมไฮดรอกไซด์	68
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียม ไฮดรอกไซด์	69
4.3.1	ดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด	70
4.3.2	เถ้าลอย	70
4.3.3	แคลเซียมไฮดรอกไซด์	70
4.4	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์	71
4.5	ลักษณะทางกายภาพของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบาหลังการหล่อขึ้นรูป	72
4.6	กำลังอัด	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1	ค่าลัษณะของอัฐดินเหนียวมวลเบาและอัฐดินเหนียวควบคุม	73
4.6.2	ค่าลัษณะเปรียบเทียบกัอายุการบ่ม	75
4.6.3	ค่าลัษณะเปรียบเทียบกัปริมาณการแทนที่ด้วยเฒาลอย	78
4.7	การคูดซึมน้ำ	81
4.7.1	การคูดซึมน้ำของอัฐดินเหนียวมวลเบาและอัฐดินเหนียวควบคุม	81
4.7.2	การคูดซึมน้ำเปรียบเทียบกัปริมาณการแทนที่ของเฒาลอย	82
4.7.3	การคูดซึมน้ำเปรียบเทียบกัปริมาณการเพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์	84
4.8	หน่วยน้ำหนัก	86
4.8.1	หน่วยน้ำหนักขึ้น	86
4.8.2	หน่วยน้ำหนักแห้ง	90
4.9	การหัดตัวเชิงปริมาตรรวม	94
4.9.1	การหัดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้น	94
4.9.2	การหัดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง	98
4.10	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	102
4.10.1	ค่าค่าลัษณะเปรียบเทียบกัค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	102
4.11	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	106
4.11.1	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอัฐดินเหนียวมวลเบาและ อัฐดินเหนียวควบคุม	106
4.11.2	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปรียบเทียบกัปริมาณการ แทนที่ด้วยเฒาลอย	108
4.11.3	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปรียบเทียบกัปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์	109
4.12	โครงสร้างทางจุลภาคจากภาพถ่าย SEM ของอัฐดินเหนียวมวลเบา	111
4.13	การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอัฐดินเหนียวมวลเบาจากงานวิจัย	114
5	สรุปผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	117

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 สรุปผลการวิจัย	117
5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบา	117
5.1.2 กำลังอัด	119
5.1.3 การดูดซึมน้ำ	119
5.1.4 ให้น้ำหนัก.....	119
5.1.5 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม	119
5.1.6 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	120
5.1.7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน.....	120
5.1.8 โครงสร้างทางจุลภาค.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ	121
รายการอ้างอิง	122
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวด้านเกรียน เถ้าลอยแม่ เมาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารเคมีผสมเพิ่ม.....	127
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด ให้น้ำหนัก การดูดซึมน้ำ การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นและแบบแห้ง	134
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำ.....	185
ภาคผนวก ง. ผลการทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน	226
ภาคผนวก จ. บททความวิชาการที่ได้รับการนำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่	235
ประวัติผู้เขียน	245

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กำลังรับแรงอัดของอิฐตันและอิฐกลวง ตามมาตรฐาน ASTM C62-89a และ C652-89a	8
2.2 กำลังรับน้ำหนักของอิฐดินเหนียวตามมาตรฐาน มอก.77-2545 และ 102-2531	9
2.3 อัตราการดูดกลืนน้ำของอิฐดินเหนียวตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 และ 102-2531	9
2.4 ความเสียหายที่พบในบ้านที่ทำจากดิน	15
2.5 สัดส่วนของดินที่เหมาะสมกับรูปแบบต่างๆ	16
2.6 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเหนียวสำหรับการก่อสร้าง บ้านดินรูปแบบต่างๆ	18
2.7 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS	18
2.8 ผลกระทบของสารปรับสภาพที่มีต่ออิฐดินดิบ	20
2.9 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินสำหรับโครงสร้างส่วนต่างๆ	21
2.10 แสดงประโยชน์การใช้งานของดินชนิดต่างๆ	21
2.11 เฟสของสารประกอบที่ตรวจพบในดินทรายด้านเหนียวและดินเหนียวด้านเหนียว	25
2.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้านเหนียวและดินทรายด้านเหนียวด้วย XRF	26
2.13 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)	29
2.14 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)	30
2.15 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ (ASTM C 618)	32
2.16 การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของเถ้าลอย ตะกรัน ซิลิกาฟูม ดินดานเผา และดินขาว	33
2.17 คุณสมบัติของปูนสุกและปูนขาว	39

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.18 คุณสมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์.....	40
2.19 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม	40
2.20 คุณสมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด	41
3.1 สัญลักษณ์ของแต่ละอัตราส่วนผสม	56
3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน	65
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด้านเกวียน	68
4.2 ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะ	69
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดินเหนียวบดละเอียด แล้วย่อยและแคลเซียม ไฮดรอกไซด์	70
4.4 ค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวควบคุม	75
4.5 การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวควบคุม	81
4.6 ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบ กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวควบคุม ที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน	103
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียว ควบคุม	107
4.8 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับงานวิจัยต่างประเทศ	115
4.9 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับงานวิจัยภายในประเทศ	116
4.10 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับวัสดุก่อผนังชนิดอื่นๆ	117

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการเลื่อนไม้แบบของเทคนิคดินอัด 10
2.2	การตากก้อนอิฐดินดิบ 11
2.3	โรงงานทำก้อนดินอัด 12
2.4	การขึ้นรูปผนังด้วยเทคนิคการปั้นดิน 13
2.5	ผนังบ้านที่ใช้เทคนิคดินฉาบบนโครงไม้ 14
2.6	การแบ่งชนิดของดินตาม USDA 16
2.7	โครงสร้างของแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่สำคัญของแร่ดินเหนียว..... 22
2.8	โครงสร้างของแผ่นอลูมินา (Alumina octahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่สำคัญของแร่ดินเหนียว..... 23
2.9	ภาพถ่าย SEM ของดินทรายด้านเกวียน 27
2.10	ภาพถ่าย SEM ของดินเหนียวด้านเกวียน 27
2.11	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) ของเถ้าลอย 34
2.12	ลักษณะของผงปูนขาว (ปูนสุก) ที่นำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม 39
2.13	ลักษณะของผงปูนขาวไฮดรตที่นำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม 42
3.1	แบบหล่อก่อนตัวอย่างขนาดมาตรฐาน 215 x 103 x 65 มม..... 53
3.2	เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องกำเนิดโฟมเหลว (Foaming generator) และปั๊มลม..... 53
3.3	เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำและชุดทดสอบการส่งผ่านความร้อน..... 53
3.4	วัสดุที่ใช้ทำวิจัย แร่ดินเหนียวบด เถ้าลอย ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีผสมเพิ่ม..... 55
3.5	ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลีแอร์ (Le Chatelier Flask)..... 59
3.6	ชุดทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness)..... 59
3.7	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis)..... 60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)).....	60
3.9 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM).....	61
4.1 ลักษณะอนุภาคของเม็ดดินตามธรรมชาติและผ่านการบดละเอียด.....	68
4.2 กราฟลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	69
4.3 ภาพถ่ายขยาย 1500 เท่า ของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด.....	71
4.4 ภาพถ่ายขยาย 2000 เท่า ของเถ้าลอย.....	71
4.5 ภาพถ่ายขยาย 2000 เท่า ของผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	72
4.6 ขนาดของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบาหลังการหล่อขึ้นรูป.....	73
4.7 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 กับอายุการบ่ม.....	75
4.8 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 10 กับอายุการบ่ม.....	76
4.9 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 15 กับอายุการบ่ม.....	77
4.10 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 20 กับอายุการบ่ม.....	77
4.11 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย.....	78
4.12 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 10 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย.....	79
4.13 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 15 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย.....	79
4.14 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 20 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การดูดซึมน้ำของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 7 วัน.....	83
4.16 การดูดซึมน้ำของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน.....	83
4.17 การดูดซึมน้ำของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 60 วัน.....	84
4.18 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 7 วัน.....	85
4.19 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 28 วัน.....	85
4.20 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 60 วัน.....	86
4.21 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย เถ้าลอยที่อายุ 7 วัน.....	87
4.22 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย เถ้าลอยที่อายุ 28 วัน.....	87
4.23 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย เถ้าลอยที่อายุ 60 วัน.....	88
4.24 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 7 วัน.....	89
4.25 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 28 วัน.....	89
4.26 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 60 วัน.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย ถั่วลันเตาที่อายุ 7 วัน.....	91
4.28 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย ถั่วลันเตาที่อายุ 28 วัน.....	91
4.29 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วย ถั่วลันเตาที่อายุ 60 วัน.....	92
4.30 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตากับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 7 วัน.....	93
4.31 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตากับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 28 วัน.....	93
4.32 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตากับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อายุ 60 วัน.....	94
4.33 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตาที่อายุ 7 วัน.....	95
4.34 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตาที่อายุ 28 วัน.....	95
4.35 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตาที่อายุ 60 วัน.....	97
4.36 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตา กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน.....	97
4.37 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตา กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน.....	97
4.38 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตา กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน.....	98
4.39 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยถั่วลันเตาที่อายุ 7 วัน.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน..... 99
4.41	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน..... 100
4.42	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน..... 101
4.43	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน..... 101
4.44	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย กับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน..... 102
4.45	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียว มวลเบาชุดเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5..... 104
4.46	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียว มวลเบาชุดเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 10..... 105
4.47	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียว มวลเบาชุดเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 15..... 105
4.48	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียว มวลเบาชุดเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20..... 106
4.49	ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านความร้อนของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณ แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน..... 108
4.50	ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านความร้อนของปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณ แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน..... 109
4.51	ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านความร้อนของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณ ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน..... 110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52	ค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านความร้อนของปริมาณแทนที่ด้วยแก้วลอยกับปริมาณ ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน..... 111
4.53	ภาพ SEM ของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียวชุดควบคุม อายุ 28 วันและ 60 วัน..... 114



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	American Society for Testing Material
Al_2O_3	Aluminum Oxide
BSI	British Standard Institute
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Calcium Hydroxide
CaO	Calcium Oxide
CH	วัสดุผสมเพิ่มผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวละลายน้ำ
cm^2/g	ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
DCL	แร่ดินเหนียวคานเกวียนบดละเอียด
100DCL-Cont.	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ดินเหนียวล้วน
100DCL+XXCH-Cont.	ส่วนผสมควบคุมที่ใช้ดินเหนียวล้วนผสมวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ XX โดยน้ำหนักดินเหนียว
<u>AADCLBBFA</u> + <u>XXCHE</u>	ส่วนผสมที่ใช้ดินเหนียวร้อยละ <u>AA</u> แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ <u>BB</u> โดยน้ำหนักดินเหนียวผสมเพิ่มวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ <u>XX</u> โดยน้ำหนักดินเหนียว และเติมโฟมเหลว
Foaming Agent	สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ
FA	เถ้าลอยแม่เมาะ
Fe_2O_3	Ferric Oxide
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
kg	กิโลกรัม
ksc	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kg/m^3	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LOI	Loss On Ignition
MPa	เมกะปาสคาล
m/sec	เมตรต่อวินาที
N/m ²	นิวตันต่อตารางเมตร
N/mm ²	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
μm	ไมโครเมตรหรือไมครอน
SEM	Scanning Electron Microscope
SiO ₂	Silicon Dioxide
TIS	Thailand Industrials Standard
W/CL	อัตราส่วนน้ำต่อนินเหนียว
W/m.°K	วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน
XRF	X-Ray Fluorescence
XAS	X-Ray Absorption Spectroscopy

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาพปัจจุบันปฏิเสธไม่ได้ว่าผลกระทบจากสภาวะเรือนกระจกหรือโลกร้อน ส่งผลกระทบโดยตรงต่อมนุษย์และทุกสรรพสิ่งที่อยู่อาศัยบนโลก ผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ก็เนื่องมาจากมนุษย์ได้ใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติและพลังงานกันอย่างมากมาย โดยเฉพาะวงการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย ดังจะเห็นได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เมื่อผลิตปูนซีเมนต์ออกมา 1 ตัน ก็จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา 1 ตันเช่นกัน (Davidovits, 1991) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาที่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมลพิษตามมา จึงทำให้หลายภาคส่วนหันกลับมาสนใจและพยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีที่หลากหลาย เช่น การปลูกป่าทดแทน การใช้พลังงานที่สะอาด ลดการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมและถ่านหิน และการนำของเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

“อิฐดินดิบหรืออิฐดินเหนียว (Adobe or Clay Brick) อิฐที่ยังไม่เข้าสู่กระบวนการเผา หล่อขึ้นรูปด้วยวิธีง่ายๆ ให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ทำให้แข็งตัวเป็นก้อนด้วยวิธีตากแห้งพึ่งแดด และถือว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (อนุสรณ์, 2552) อิฐดินดิบหรืออิฐดินเหนียวจะถูกนำไปใช้อย่างมากในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่ใช้ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ อาทิเช่น การสร้างบ้านดินหรือ Earth Building เป็นการใช้วัสดุจากธรรมชาติมาสร้างเป็นที่อยู่อาศัย ซึ่งมีปรากฏพบทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ (ประชุม, 2551) เพราะบ้านที่สร้างจากดินจะช่วยลดการใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมทั้งปูนซีเมนต์และเหล็ก และยังลดการใช้พลังงานในการผลิตวัตถุดิบได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่า อิฐดินดิบหรืออิฐดินเหนียวมีคุณสมบัติที่ทนต่อการดูดซับความร้อน ทำให้อุณหภูมิผนังค่อนข้างคงที่ มีความเป็นฉนวนและทนต่อเสียงได้ดี โดยปกติอิฐดินหรืออิฐดินเหนียวจะมีความหนาแน่นคิดต่อลูกบาศก์เมตรจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ $1600 - 1920 \text{ kg/m}^3$ (Kumar, 2002) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตโครงสร้าง ซึ่งถือว่าน้ำหนักค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าอิฐดินดิบหรืออิฐดินเหนียวจะสร้างได้โดยง่ายและกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน แต่ก็ยังมีข้อเสียและข้อจำกัดหลายๆด้าน เช่น การควบคุมคุณภาพที่ทำได้ยาก กำลังและความ

แข็งแรงต่ำ การหดตัวสูง ส่วนผสมต้องใช้ดินเหนียวเป็นหลัก ทำให้ต้องผสมกับหรือวัสดุธรรมชาติประเภทเส้นใยทดแทน (รัฐภูมิ, 2552) เพื่อลดการหดตัวและการแตกร้าวที่ผิวและที่สำคัญไม่ทนทานต่อสภาวะน้ำท่วมขัง ซึ่งทำให้อิฐดินเหนียวเปื่อยยุ่ย เป็นผลเสียโดยตรงต่อผนังดินที่เป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การทำอิฐดินเหนียวให้มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดี ให้มีคุณสมบัติที่เทียบเท่าอิฐดินดิบที่ใช้งานทั่วไป โดยส่วนผสมหลักจะใช้ดินเหนียวด่านเกวียน และวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรม เช่น แก้วลอยหรือแก้วฉนวนหินมาผสมทดแทนในบางส่วน นอกจากนี้ยังใช้วัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวละลายน้ำมาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติม ทำให้อิฐดินเหนียวมีความแข็งแรง การหดตัวต่ำ แข็งตัวเร็วและทนทานต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดี เพื่อที่จะทำให้อิฐดินเหนียวมีน้ำหนักเบาขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักปกติ มีการเติมสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศที่ผลิตเป็นโฟมเหลวลงในส่วนผสม ทำให้อิฐดินเหนียวดังกล่าวมีน้ำหนักลดลงและมีความพรุน สามารถนำไปใช้งานในสภาวะจริงได้ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทาง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทดลองหาสัดส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมแก้วลอย วัสดุผสมเพิ่มและสารเคมีผสมเพิ่มเป็นส่วนผสม ให้มีคุณสมบัติและสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้งานในสภาวะจริงได้

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรรวม การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของอิฐดินเหนียวมวลเบาในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม

1.2.4 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม

1.2.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐดินเหนียวมวลเบาในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 ดินเหนียวตากแห้งบดละเอียด ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 จากบ่อดินเหนียวแหล่งอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา ตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

1.3.2 เถ้าลอยแม่เมาะ (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2008)

1.3.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวชนิดละลายน้ำ (Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Grade A ซึ่งใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม จากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี

1.3.4 น้ำที่ใช้ผสม ใช้น้ำประปาภายในเขตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.5 สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) เพื่อการผลิตอิฐมวลเบาแบบเซลลูล่า สูตร SUT 1 เป็นสารชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ ใช้ผสมในสัดส่วนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เจือจางน้ำในอัตราส่วน 1 : 40 โดยน้ำหนัก ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดโฟมเหลว (Foam Generator) ซึ่งโฟมเหลวมีความหนาแน่นประมาณ 50 - 60 kg/m^3

1.3.6 ใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว

1.3.7 ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นวัสดุผสมเพิ่ม โดยเพิ่มลงในส่วนผสมของดินเหนียวซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย ในสัดส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว

1.3.8 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ผสม (จากการทดสอบขีดพิกลความเหลวของดินเหนียว) กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียว ($W/CL = 0.65$) ของทุกอัตราส่วนผสม

1.3.9 ขนาดของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบา ใช้แบบหล่อเหล็กมาตรฐานทรงสี่เหลี่ยมตัน ขนาด 215 มม x 103 มม x 65 มม สำหรับหล่อก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน BS3921 (2003)

1.3.10 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบา

1.3.11 ทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเหนียวมวลเบา โดยการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ประยุกต์ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67

1.3.12 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวมวลเบา เช่น การทดสอบหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นและแบบแห้ง การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ประยุกต์ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C90 และ ASTM C140

1.3.13 ทดสอบคุณสมบัติหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำก้อนตัวอย่างของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่อายุ 28 และ 60 วัน ประยุกต์ใช้วิธีทดสอบคล้ายการซึมผ่านของคอนกรีต

1.3.14 ทดสอบคุณสมบัติหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของก้อนตัวอย่างของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่อายุ 28 และ 60 วัน ประยุกต์ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E1153

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษารวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สรุปขอบเขตงานวิจัย รวมถึงวิธีการดำเนินการทดสอบ

1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.3 ดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้วิจัย ทดลองสัดส่วนผสมและหล่อก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

1.4.4 ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ ฯลฯ ของอิฐดินเหนียวมวลเบา

1.4.5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อผนังแนวใหม่ที่มีน้ำหนักเบา ที่ได้จากส่วนผสมหลักคือดินเหนียวซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติกับเถ้าลอย วัสดุผสมเพิ่มและใช้สารเคมีเพิ่ม เป็นส่วนช่วยลดน้ำหนักของวัสดุก่อผนังที่พักอาศัยที่สร้างขึ้นจากดิน

1.5.2 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่เหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมและวัสดุธรรมชาติที่หาได้ในประเทศไทย ภายในท้องถิ่น นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ

1.5.3 อิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้จากการวิจัยสามารถขึ้นรูปได้โดยง่าย แข็งตัวเร็ว มีความแข็งแรง คงทนต่อสภาวะน้ำท่วมขัง มีคุณสมบัติเทียบเท่าวัสดุก่อผนังชนิดอื่นๆ

1.5.4 ช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดและช่วยลดภาวะโลกร้อน

1.5.5 ความรู้ที่ได้จากการวิจัยอิฐดินเหนียวมวลเบาในระดับเบื้องต้นสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับสูงต่อไป

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้างบ้าน จึงได้ทำการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง ประวัติความเป็นมาของอิฐดินเหนียว รูปแบบของบ้านดิน ความทนทานของบ้านดิน ดินเหนียว โครงสร้างผลึกของดินเหนียว คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว ดินเหนียวด้านเควียน ปอชโซลาน ปอชโซลานธรรมชาติ เถ้าลอยแม่เมาะ วัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอชโซลานจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมกับวัสดุธรรมชาติอย่างเช่น ดินเหนียวด้านเควียน ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นพลาสติกสูง เพื่อพัฒนาและวิจัยให้เป็นอิฐดินเหนียวมวลเบา ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อที่มีราคาถูก ให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเทียบเท่าอิฐดินดิบทั่วไปที่ทำจากดินเหนียว ดังนี้

2.1 อิฐดินเหนียว (Earth Brick)

อิฐดินเหนียว (Earth Brick) เป็นวัสดุก่อที่มีอายุเก่าแก่ที่สุดบนโลกโดยเกิดขึ้นจากวัสดุก่อสร้างที่มีอยู่บนพื้นโลก อิฐดินเหนียวนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างหลายด้าน มีคุณสมบัติที่สามารถทนต่อความร้อนและเสียงได้ดีและยังไปกว่านั้น ค่าความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวจะมีค่าอยู่ระหว่าง $1600 - 1920 \text{ kg/m}^3$ อิฐดินเหนียวยังเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทำจากวัสดุธรรมชาติและยังเป็นวัสดุก่อสร้างในส่วนหนึ่งของตัวอาคาร (Kumar, 2002)

2.1.1 ประวัติความเป็นมาของอิฐดินเหนียว (History of Clay brick)

การสร้างที่อยู่อาศัยด้วยหินก่อในยุคแรกๆ ใช้ก้อนหินที่เก็บได้ตามธรรมชาติมาก่อเรียงกันโดยไม่มีการใช้วัสดุประสาน หรืออาจใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุประสาน ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเครื่องมือในการสกัดหินได้แล้วก็มีการสกัดแต่งหินให้ก่อเข้ากันได้ดี มีการใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน หรือที่ปัจจุบันเรียกว่าปูนก่อ (Mortar) เนื่องจากความคงทนของหินก่อ ตัวอย่างโบราณสถานที่ใหญ่ที่สุดที่สร้างด้วยหินก่อก็คือ พีรามิดในอียิปต์ ซึ่งสร้างเมื่อประมาณ 4,500 ปีมาแล้ว พีรามิดกษัตริย์แห่งคีออปส์ (Pyramid of Cheops) มีความสูง 147 เมตร กำแพง

เมืองจีน เป็นสิ่งก่อสร้างหินก่อและอิฐดินเหนียวก่อที่ยาวที่สุดในโลก สร้างตั้งแต่ศตวรรษที่ 5 ก่อนคริสตกาล จนถึงคริสต์ศตวรรษที่ 16 อาคารหินก่อยังคงเป็นที่นิยมอยู่จนถึงยุคต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 ดังจะเห็นจากอาคารพาณิชย์มากมายในเมืองใหญ่ๆ ทั่วโลก

อิฐดินเหนียวตากแดด (Sun-dried mud brick) เริ่มมีใช้มาประมาณ 10,000 – 12,000 ปีมาแล้วในที่ลุ่มเมโซโปเตเมีย และแม้แต่ในทวีปอเมริกาเหนือและใต้ โดยการนำดินเหนียวมาปั้นเป็นก้อน ตากให้แห้งในอากาศหรือตากแดด แล้วนำมาก่อโดยใช้ดินเหนียวเช่นกันเป็นตัวประสาน ต่อมามีการนำเอามูลวัวหรือฟางมาผสมเพื่อเพิ่มกำลัง เมื่อประมาณ 7,000 ปีที่แล้วมีการค้นพบว่าการเอาก้อนดินเหนียวมาเผาช่วยให้ความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกกร่อนมากขึ้น และได้มีการพัฒนาเผาอิฐมาอย่างต่อเนื่องจนกลายมาเป็นอิฐดินเหนียว (Clay brick) ที่รู้จักกันในปัจจุบัน มีการจดทะเบียนสิทธิบัตรเครื่องทำอิฐตั้งแต่ปี ค.ศ. 1619

อิฐแคลเซียมซิลิเกตเป็นอิฐประเภทหนึ่งที่ผลิตขึ้นในยุคแรกๆ เมื่อเริ่มรู้จักการนำปูนขาว (Lime) มาใช้ โดยการนำเอาปูนขาวผสมทรายมาปั้นเป็นก้อนและตากให้แห้งในอากาศ ต่อมา มีการเร่งกระบวนการตากแห้งโดยใช้ไอน้ำมาช่วยบ่มอิฐ

2.1.2 อิฐดินเหนียวเผา (Burn Clay brick)

1) วัตถุดิบ อิฐดินเหนียวทำจากดินเหนียวหรือดินเซล ซึ่งมีสารประกอบของซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก มีออกไซด์ของโลหะบางซึ่งเป็นสารที่ให้สี เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 – 1200 °C จะได้วัสดุที่แข็งแรงขึ้นเนื่องมาจากการหลอมละลายของสารเซรามิก

กระบวนการผลิต กระบวนการผลิตมี 3 แบบหลักๆ คือกระบวนการโคลนอ่อน (Soft mud process) กระบวนการโคลนแข็ง (Stiff mud process) และกระบวนการอัดแห้ง (Dry-press process)

ในกระบวนการโคลนอ่อน ดินเหนียวที่ผ่านการคัดแยกเอาหินหรือดินก้อนโต หรือวัสดุเจือปนอื่นๆ ออกแล้ว จะถูกนำมาผสมน้ำจนปั้นได้ นวดให้เข้ากับน้ำจนเนื้อสม่ำเสมอ แล้วนำมาอัดใส่แบบพิมพ์ ฝั่งแดดให้แห้งประมาณ 1-2 วัน ขั้นตอนนี้จะช่วยลดพลังงานในการเผาด้วย เนื่องจากกระบวนการนี้มีการปั้นด้วยมือ จึงต้องผสมน้ำค่อนข้างมากเพื่อช่วยต่อการปั้น ปกติจะผสมที่ระดับ 20-30 % กระบวนการนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตอิฐมอญระดับพื้นบ้าน สามารถทำได้ในครัวเรือนโดยไม่ต้องมีการลงทุนมาก

กระบวนการโคลนแข็งเป็นกระบวนการที่รีดดินเหนียวด้วยเครื่องรีด ให้มีรูปหน้าตัดตามต้องการ แล้วตัดเป็นก้อนๆ ด้วยเส้นลวด ดังนั้นอิฐจึงต้องมีความเหนียวพอที่จะคงรูปอยู่ได้หลัง

การรีด ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมดินเหนียวอยู่ในช่วงประมาณ 12 – 15 % วิธีนี้ทำให้ได้อิฐที่มีขนาดค่อนข้างคงที่และมีผิวที่เรียบกว่า สามารถทำรูปในแนวที่รีดได้ นอกจากนี้อิฐที่ได้ยังมีความหนาแน่นมากกว่าอิฐจากกระบวนการโคลนอ่อนอันเนื่องมาจากการมีปริมาณน้ำน้อยกว่าและการอัดผ่านช่องที่มีหน้าตัดเล็กกว่ากระบอกรีด กระบวนการนี้ใช้ผลิตอิฐระดับโรงงาน ซึ่งจะทำได้อิฐที่มีคุณภาพสูงกว่า และกำลังผลิตสูงกว่า แต่มีการลงทุนสูงกว่าด้วย

การผลิตโดยวิธีอัดแห้งต้องใช้ปริมาณน้ำน้อย คือประมาณน้อยกว่า 10 % เหมาะสำหรับดินเหนียวที่มีความเหนียว (Plasticity) ต่ำ วิธีนี้จะใช้เครื่องอัดกำลังสูงอัดดินเหนียวเข้าไปในแบบเหล็กแล้วถอดแบบทันทีเพื่อใช้แบบเดิมในการอัดก้อนใหม่ เป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยมในเมืองไทยเพราะต้องอาศัยเครื่องจักรกลไฮดรอลิก ซึ่งต้องลงทุนสูงและมีการบำรุงรักษาที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม การผลิตอิฐดินซีเมนต์ต้องใช้วิธีนี้

การเผาอิฐกระทำที่อุณหภูมิประมาณ 900 – 1200 °C ซึ่งจะมีการหลอมละลายเซรามิกที่เรียกว่า Verification การเผาที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่าจะทำให้เกิดการหลอมละลาย หรืออิฐ “สุก” จะทำให้ได้อิฐที่ไม่มีความคงทน ถึงแม้อิฐจะมีความแข็งแรงก็ตาม การเผาระดับพื้นบ้านจะเป็นการนำอิฐมาก่อเรียงแบบโปรง คลุมด้วยฟางแล้วเผา วิธีนี้จะทำให้ได้อิฐที่สุกไม่สม่ำเสมอ

เมื่อนำอิฐออกมาจากเตาเผา อิฐจะเย็นตัวลงและดูดความชื้นจากอากาศภายนอกเข้าไปในลักษณะเดียวกัน ทำให้อิฐขยายตัวเล็กน้อยและทำให้ขนาดอิฐที่ได้ต่างจากขนาดของแบบหล่อหรือแบบรีดที่ใช้ตอนแรก

2) ขนาดและรูปร่าง มาตรฐานสากลยอมรับขนาดของก้อนอิฐที่สามารถจัดเข้าในตารางขนาด 600 x 600 มม ได้โดยให้มีหน่วยพิศมณฐานเท่ากับ 100 มม ดังแสดงในรูป 2.1 โดยให้ความหนาของปูนก่อมาตรฐาน 3/8 นิ้ว หรือ 10 มม ดังนั้นขนาดจริง (Actual size) ของก้อนอิฐจะน้อยกว่าขนาดระบุ (Normal size) 10 มม เช่นอิฐขนาดระบุ ๕ x ๒ เป็น 200 x 400 มม มีขนาดจริง 190 x 390 มม เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM C652 ของอเมริกันกำหนดให้อิฐกลวง (Hollow block) มีพื้นที่หน้าตัดสุทธิ (Net cross-sectional area) ในระนาบนอนระหว่างร้อยละ 40 -75 ของหน้าตัดรวม (Gross cross-sectional area) มาตรฐาน ASTM C34 เป็นมาตรฐานกระเบื้องดินเหนียว (Clay tile unit) ซึ่งหมายถึงอิฐที่มีเปลือกผนังครีบบางกว่าและกำลังต่ำกว่า

มาตรฐาน BS 3921 ของอังกฤษกำหนดให้อิฐโปรง (Perforated brick) ต้องมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิไม่น้อยกว่า ร้อยละ 75 ของหน้าตัดรวม และแต่ละรูต้องไม่เกินร้อยละ 10

มาตรฐานของ มอก. ถึงแม้จะมีทั้งอิฐกลวงและคอนกรีตบล็อกกลวง แต่ไม่มีการกำหนดสัดส่วนของหน้าตัดสุทธิของอิฐกลวง

3) กำลังรับแรงอัด นอกจากอิฐจะรับแรงอัดในแนวตั้งเป็นหลักแล้ว พฤติกรรมของอิฐบ่งชี้ว่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น กำลังรับแรงดึง ความทนต่อการสึกกร่อน ฯลฯ ผูกพันกับกำลังรับแรงอัดคือเมื่ออิฐมีกำลังรับแรงอัดสูง ก็จะมีความหนาแน่นสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี มีการยืดหดตัวต่ำ เป็นต้น

มาตรฐานในประเทศต่างๆ มีการแบ่งประเภทของอิฐดินเหนียวและข้อกำหนดต่างๆ ไว้อย่างต่างกัน เพื่อเป็นความรู้เชิงเปรียบเทียบ และเพื่อเป็นพื้นฐานในการไปศึกษาเอกสารต่างประเทศเพิ่มเติม ในที่นี้จะนำเอามาตรฐานของประเทศอเมริกา ประเทศอังกฤษ และประเทศไทย

ประเทศอเมริกามีมาตรฐานควบคุมคุณสมบัติของอิฐ 3 ฉบับดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ASTM C62-89a สำหรับอิฐตัน ASTM C652-89a สำหรับอิฐกลวง ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงอิฐกระเบื้องผนัง ค่ากำลังอัดที่กำหนดมีแสดงในตารางที่ 2.1

มาตรฐานอังกฤษกำหนดให้ Engineering brick class A มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 70 MPa และ Class B ไม่น้อยกว่า 50 MPa

มาตรฐาน มอก. 77-2545 สำหรับอิฐก่อสร้างสามัญ และ มอก. 102-2531 สำหรับอิฐกลวงรับน้ำหนัก กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 กำลังรับแรงอัดของอิฐตันและอิฐกลวง ตามมาตรฐาน ASTM C62-89a และ C652-89a

เกรดของอิฐ	กำลังรับแรงอัด (MPa)*		อัตราการดูดซึมน้ำที่ 5 ซม. ในน้ำเดือด	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
SW	20.7	17.2	17.0	20.0
MW	17.2	15.2	22.0	25.0
NW	10.3	8.6	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด

บนหน้าตัดรวมสำหรับอิฐตัน บนหน้าตัดสุทธิสำหรับอิฐกลวง

ตารางที่ 2.2 กำลังรับน้ำหนักของอิฐดินเหนียวตามมาตรฐาน มอก.77-2545 และ 102-2531

ชั้น คุณภาพ	กำลังรับแรงอัด (MPa)					
	อิฐก่อสร้างสามัญ		อิฐกลวงรับน้ำหนัก			
			อิฐโพรงตั้ง		อิฐโพรงนอน	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก.	21.0	17.0	100	70	50	35
ข.	17.0	15.0	70	50	50	35
ค.	10.0	9.0	-	-	-	-

4) กำลังรับแรงดึง อิฐดินเหนียวเป็นวัสดุเปราะเช่นเดียวกับคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของอิฐดินเหนียวมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดและมักจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับกำลังรับแรงดัดคือมีค่าประมาณ 0.10 – 0.32 ของกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงที่ทดสอบโดยการดัด (Flexural tensile strength) มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบผ่า (Splitting tensile strength)

5) การดูดซึมน้ำ การทดสอบการดูดซึมน้ำที่ใช้กับอิฐมี 2 แบบ คือการนำอิฐไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่าการทดสอบแบบเย็น (Cold test - C) และการทดสอบที่นำอิฐที่ต้มตัวแล้วจากการทดสอบดังกล่าวไปใส่ในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เรียกว่าการทดสอบแบบร้อน (Boiling test - B) อัตราส่วน C/B เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การต้มตัว” (Saturation coefficient) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณโพรงที่อุ้มน้ำได้ง่ายเมื่อข้อกำหนดเรื่องการดูดซึมน้ำของมาตรฐาน ASTM C62-89a และ C652-89a สำหรับอิฐตันและอิฐกลวง แสดงในตารางที่ 2.1 โดยได้ยึดเอาการทดสอบแบบร้อนเป็นเกณฑ์ และยังคงควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การต้มตัว ให้ไม่เกิน 0.78 และ 0.88 สำหรับอิฐเกรด SW และ MW ตามลำดับ ส่วนเกรด NW นั้นไม่มีการควบคุม มาตรฐาน มอก. 77-2545 และ 102-2531 สำหรับอิฐก่อสร้างสามัญและอิฐกลวงรับน้ำหนัก มีดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อัตราการดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวตามมาตรฐาน มอก. 77-2545 และ 102-2531

ชั้นคุณภาพ	อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุด (%)			
	อิฐก่อสร้างสามัญ		อิฐกลวงรับน้ำหนัก	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก.	17.0	20.0	16	19
ข.	22.0	25.0	25	28
ค.	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	-	-

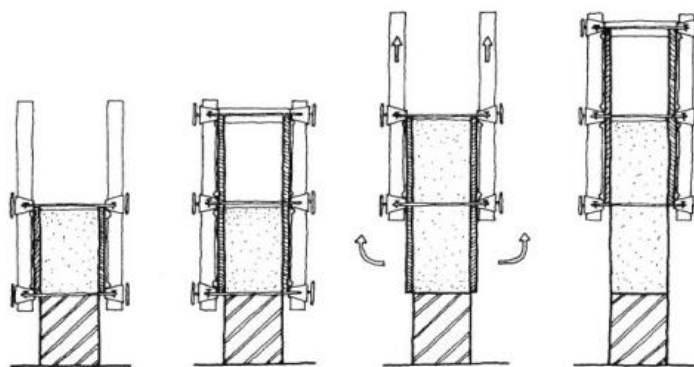
6) การยืดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของอิฐมีค่าระหว่าง 4.5×10^{-6} และ 7.2×10^{-6} โดยดินเหนียวที่เนื้อแน่นกว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ต่ำกว่า (อนุสรณ์, 2552)

2.2 รูปแบบของบ้านดิน (Earth Housing)

บ้านดินที่นิยมก่อสร้างในต่างประเทศมีหลายรูปแบบ ในแต่พื้นที่จะมีความนิยมแตกต่างกัน ในโซนทวีปแอฟริกาและทวีปอเมริกาใต้จะนิยมก่อสร้างในรูปแบบอิฐดินดิบ ส่วนในโซนทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือการใช้เทคนิคดินอัดจะได้รับความนิยมในการก่อสร้างมากกว่ารูปแบบอื่น (Matthew, 2012) สำหรับประเทศไทยบ้านดินที่นิยมมากที่สุดคืออิฐดินดิบและก้อนดินอัดรูปแบบก่อสร้างบ้านดินที่สำคัญมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ดินอัด (Rammed Earth)

อาคารที่ก่อสร้างด้วยเทคนิคนี้จะเป็นระบบผนังดินแบบผนังรับน้ำหนัก การก่อสร้างอาศัยการขึ้นไม้แบบตามรูปแบบของผนังบ้าน แล้วนำดินอัดลง ไปให้แน่นเป็นชั้นๆ โดยใช้แรงคนหรือเครื่องจักร เมื่อดินแน่นได้ที่จึงถอดแบบ ออกค่อยๆ ทำสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เหมือนการหล่อผนังคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2.1 ผนังที่ใช้ในวิธีการนี้ควรหนาตั้งแต่ 20 เซนติเมตรขึ้นไป ข้อดีของอาคารแบบนี้คือ ใช้ปริมาณน้ำน้อยในผสมเหมาะสำหรับพื้นที่ที่น้ำหายาก การใช้พลังงานในการกระแทกให้ดินแน่นทำให้ผิวงานออกมาดูเรียบร้อย เหมาะสำหรับรูปแบบบ้านที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมหรือมีลักษณะซ้ากันหลายๆหลังเพราะสามารถใช้ไม้แบบที่ซ้ากัน มีความมั่นคงแข็งแรง ข้อเสียของเทคนิคนี้คือค่าใช้จ่ายในส่วน of ไม้แบบมีราคาแพงและช่างต้องมีทักษะพอสมควร การบดอัดดินต้องการแรงงานหรือเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพ (Dabaieh, 2015)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเลื่อนไม้แบบของเทคนิคดินอัด (Dabaieh, 2015)

2.2.2 อิฐดินดิบ (Adobe)

การก่อสร้างด้วยอิฐดินดิบเป็นโครงสร้างผนังก่อด้วยอิฐดินเป็นผนังรับน้ำหนัก ไม่ต้องมีเสา การทำช่องเปิดที่มีขนาดกว้างๆ จำเป็นต่อการก่ออิฐให้มีลักษณะเป็นโดมโค้งหรือโดมยอดแหลมเพื่อรับน้ำหนักหรือใช้ไม้(ใช้ได้ทั้งไม้ท่อนและไม้แผ่น) ทำเป็นคานทับหลังเพื่อรับน้ำหนักอิฐที่อยู่ด้านบน บ้านดินส่วนใหญ่ที่ทำในประเทศไทยมักจะใช้วิธีนี้ในการก่อสร้างดินที่เหมาะสมคือดินร่วนปนทราย กรณีที่แหล่งดินมีดินเหนียวมากควรผสมทรายเพื่อลดการหดตัวของดินเหนียว ในบางครั้งมีการผสมฟางสั้นๆหรือแกลบเพื่อช่วยให้เกิดความแข็งแรงในการยึดเกาะในเนื้อของตัวอิฐ ขนาดของอิฐจะถูกกำหนดด้วยน้ำหนักของอิฐเมื่อแล้วเสร็จและความหนาขององค์อาคารที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้กันที่ขนาด 4x8x16 นิ้ว มีน้ำหนักประมาณ 13 กิโลกรัม 1 ตารางเมตรใช้อิฐประมาณ 35 ก้อน (ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติบ้านบุญ,2558)

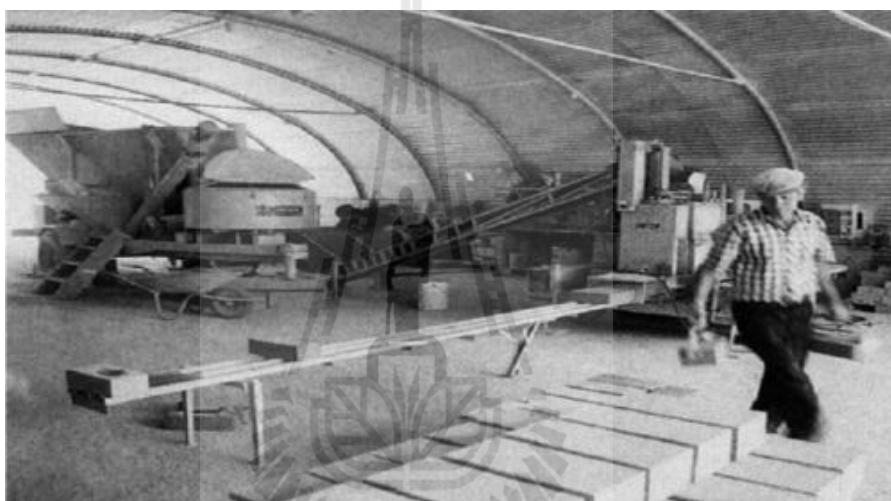
ข้อดีของการสร้างบ้านด้วยอิฐดินดิบก็คือ ค่าใช้จ่ายในการทำอิฐดินดิบ มีเฉพาะค่าแรงงาน เครื่องมือที่ใช้ก็ได้ในท้องถิ่น สามารถค่อยๆ ทอยทำอิฐเก็บรวบรวมไว้ได้ เมื่อถึงเวลาที่จะเริ่มสร้างหรือมีจำนวนอิฐดินดิบที่เพียงพอแล้วจะสร้างได้เร็ว ผนังแห้งเร็วเมื่อก่อเสร็จแล้วสามารถฉาบได้ทันที ส่วนข้อเสียของการสร้างด้วยอิฐดินดิบคือตัวอิฐจะมีความทนทานน้ำได้ต่ำ ต้องมีการเลือกบริเวณการก่อสร้างบ้านที่เหมาะสม รูปแบบอาคารมีผลต่อการทำงานเช่นผนังที่มีความโค้งมากๆหรือช่องเปิดที่กว้าง ในการทำอิฐจำเป็นต้องมีสถานที่ในการตากอิฐและเก็บอิฐพอสมควร ฤดูกาลมีผลต่อเวลาในการตาก



รูปที่ 2.2 การตากก้อนอิฐดินดิบ (ศูนย์กสิกรรมธรรมชาติบ้านบุญ,2558)

2.2.3 ก้อนดินอัด (Compressed earth block)

ก้อนดินอัด (CEB) เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการอัดก้อนดินดิบในแบบหล่อด้วยเครื่องมือเฉพาะ ซึ่งมีทั้งระบบที่ใช้แรงคนและเครื่องจักร ความชื้นเหลวของดินที่ใช้ในวิธีการจะคล้ายที่ใช้สำหรับระบบดินอัด ก้อนดินอัดที่ได้จะมีน้ำหนักและความทนทานที่มากกว่าอิฐดินดิบ เครื่องมือที่รู้จักกันในระบบนี้คือ CINVA-Ram ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1956 (Pacheco-Torgal, 2011) ในประเทศไทยเครื่องมือชนิดนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำบล็อกประสาน ซึ่งถือเป็นก้อนดินอัดประเภทหนึ่ง การผลิตก้อนดินอัดสามารถทำได้ทั้งสถานที่ก่อสร้างและโรงงาน ตัวอย่างรูปแบบการทำงานของโรงงานก้อนดินอัดดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โรงงานทำก้อนดินอัด (Pacheco-Torgal, 2011)

ข้อดีของระบบก้อนดินอัดคือมีความแข็งแรง ทนทานกว่าก้อนดินดิบการใช้แรงอัดจากเครื่องจักรทำให้สามารถควบคุมรูปทรงและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอมากกว่าการทำได้ด้วยมือ อีกทั้งยังผลิตได้ปริมาณที่มากกว่า ข้อเสียของวิธีการนี้คือการใช้เครื่องมือทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นนอกจากค่าแรงงาน ดินที่เหมาะสมกับระบบดินอัดอาจจะต้องมีการซื้อจากแหล่งอื่นในกรณีที่ดินท้องถิ่นไม่เหมาะสม

2.2.4 ดินปั้น (Cob)

เทคนิคดินปั้นเป็นการใช้ดินเหนียวผสมทรายและฟางเส้นยาว ปั้นเป็นก้อนแบนๆ แล้ววางปั้นไปเรื่อยๆ โดยใช้การกดลงไปเพื่อให้ฟางในดินก้อนใหม่ลงไปสานกับฟางในก้อนดินเก่า ซึ่งผนังที่ได้จะเป็นผนังรับน้ำหนักเหมือนผนังที่ก่อด้วยอิฐดินดิบ ผนังจะเป็นเนื้อเดียวกันหมดทั้งหลัง ทำให้มีความแข็งแรงกว่าผนังแบบอิฐดินดิบ แต่ต้องทำผนังให้หนากว่าแบบอิฐดินดิบ โดย

ให้ผนังมีส่วนฐานที่กว้างกว่าส่วนบน ส่วนผสมของดินเหนียว ทราย และฟางนั้นขึ้นอยู่กับดินในแต่ละท้องถิ่น แต่ควรให้ทรายมีปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับดินเหนียว เพื่อให้ผนังหดตัวน้อย อาจทดลองผสมดินเหนียวทรายและฟาง แล้วปั้นเป็นก้อน ขนาดประมาณรองเท้าแตะ ทิ้งไว้จนแห้งแล้วลองหักดูว่าแข็งหรือเปราะอย่างไร ถ้าก้อนดินนั้นเปราะแสดงว่าต้องเพิ่มดินเหนียว



รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปผนังด้วยเทคนิคการปั้นดิน (Solaripedia, 2015)

ข้อดีของการก่อสร้างด้วยเทคนิคดินปั้นคือ ใช้เครื่องมือง่ายๆ ไม่ต้องทำเป็นก้อนอิฐ และสามารถทำผนังขึ้นไปเรื่อยๆ ได้เลยโดยไม่ต้องมีโครงไม้ การทำงานคล้ายกับการทำประติมากรรมขนาดใหญ่ ความแข็งแรงของผนังขึ้นอยู่กับวิธีการทำงานของช่าง ข้อเสียคือมีข้อจำกัดในการทำบ้านรูปร่างต่างๆ ได้ไม่มาก เป็นวิธีที่ใช้แรงงานและเวลาในการก่อสร้างมาก ในการทำขั้นต่อไปต้องรอให้ชั้นล่างแข็งแรงก่อน ผนังแห้งช้าเนื่องจากผนังที่หนาทำให้ต้องทิ้งไว้เป็นเดือนเพื่อให้ความชื้นลดลง ถ้าผสมทรายน้อยจะทำให้หดตัวมาก ไม่เหมาะที่จะทำอาคารขนาดใหญ่ (Solaripedia, 2015)

2.2.5 ดินฉาบบนโครงไม้ (Wattle and daub)

เทคนิคนี้เป็นการนำโครงไม้หรือไม้ไผ่มาทำเป็นเสาและसानโครงตาข่าย จากนั้นก็นำดินเหนียวมาโปะอัดเข้าในช่องว่างให้กลายเป็นผนัง โครงสร้างไม้ทำหน้าที่เป็นแกนและส่วนดินกลายเป็นส่วนผิวดังรูปที่ 2.5 เทคนิคนี้คนไทยคุ้นเคยพอสมควร เพราะยังใช้มาสมัยก่อนใช้เทคนิคนี้เป็นส่วนมาก คือสานโครงไม้ไผ่ขึ้นมาก่อนแล้วนำดินมาฉาบบนโครงไม้ ดินอาจผสมด้วยขี้วัว ขี้ควาย หรือผสมแทนแกลบก็ได้ เพื่อไม่ให้ผนังร้าวเวลาแห้ง เทคนิคนี้จะใช้ไม้มากขึ้นเป็นการทำ

บ้านแบบเสารับน้ำหนัก เทคนิคนี้สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆเช่นอิฐดินดิบ ตัวบ้านสามารถทำเป็นพื้นยกสูงได้เนื่องจากตัวผนังมีน้ำหนักไม่มาก อย่างไรก็ตามถ้าทำผนังให้หนาขึ้นก็สามารถก่อสร้างบนหินหรือคอนกรีตได้

ข้อดี คือผนังจะไม่หนาและทำเสร็จเร็ว ผนังที่ไม่ฉาบด้วยดินก็มีความเป็นธรรมชาติ สามารถใช้ในการตกแต่งได้ ข้อเสียคือผนังที่บางจะมีความเป็นฉนวนต่ำและทนทานน้ำที่ต่ำ ในบางพื้นที่ไม้ที่มีคุณสมบัตินำมาทำผนังจะหาได้ยาก (พันพรรณ, 2015)



รูปที่ 2.5 ผนังบ้านที่ใช้เทคนิคดินฉาบบนโครงไม้ (พันพรรณ, 2015)

2.3 ความทนทานของบ้านดิน (Durability of Earth Housing)

ความทนทานของบ้านดินเป็นที่รับรู้กันว่ามีความทนทานสูงจากความจริงที่อาคารที่ทำจากดินเหล่านี้มีอายุมากกว่าร้อยปี แต่ความทนทานนี้ขึ้นอยู่กับ การบำรุงรักษาอาคารนั้นๆด้วย ปัญหาใหญ่ด้านความทนทานของบ้านดินคือความชื้น ซึ่งมาจากน้ำฝนและน้ำฝนที่ขึ้นมาจากพื้นดิน จากรูปแบบความเสียหายทั่วไปที่ตรวจพบของบ้านที่ทำจากอิฐดินดิบแสดงดังตารางที่ 2.4 จะพบว่า ปัญหาความชื้นทำให้เกิดความเสียหายให้อาคารถึงร้อยละ 80 อีกปัญหาหนึ่งคือปัญหารอยร้าว เกิดขึ้นเนื่องจากตัวผนังหรือทับหลังไม่สามารถรับแรงเค้นที่สะสมบริเวณช่องเปิดได้

ปัญหาความชื้นสามารถแก้ไขตั้งแต่ตอนเริ่มก่อสร้างบ้านเช่น การเลือกสถานที่และรูปแบบอาคารที่เหมาะสม การเลือกใช้วัสดุผนังที่ทึบน้ำในบริเวณห้องน้ำหรือกำแพงภายนอก การใช้วิธีปรับสภาพดินให้มีความทึบและทนทานต่อน้ำก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ในการออกแบบส่วนผสมและการ

ปรับสภาพดินสามารถใช้ทดสอบตัวอย่างดินแบบเร่ง เช่น วิธีการใช้น้ำหยดหรือใช้การพ่นน้ำด้วยแรงดัน เพื่อช่วยประเมินคุณภาพของตัวอย่างว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ ส่วนการแก้ไขปัญหารอยร้าวสามารถแก้ไขโดยใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงพอ การใช้ระบบเสาเอ็นที่ถูกต้องและการซ่อมแซมเพิ่มความแข็งแรงในบริเวณที่มีปัญหา

ตารางที่ 2.4 ความเสียหายที่พบในบ้านที่ทำจากดิน (สุรพงษ์, 2558)

ลักษณะของความเสียหาย	ความเสียหายของอาคาร (%)
ความชื้นในกำแพงเนื่องจากแรงยกตัว	80
กำแพงภายในหลุด พื้นที่ที่เสียหาย 40-60 % ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ครึ่งล่างของกำแพง	70
กำแพงภายในหลุด พื้นที่ที่เสียหาย 10- 20 % ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเหนือบัวพื้น	60
ความชื้นในกำแพงเนื่องจากฝนหรือการสาดน้ำ	40
รอยร้าวเฉียงใต้พื้นที่หน้าต่าง	30
รอยร้าวตามแนวนอนของกำแพง	30
ความเสียหายทั่วไปบริเวณทับหลังช่องเปิด	20
รอยร้าวเฉียงใกล้กับมุมทับหลังช่องเปิด	10
รอยร้าวเฉียงระหว่างทับหลังช่องเปิดที่ติดกัน	10
รอยร้าวแนวตั้งเหนือทับหลังประตู	10
รอยร้าวแนวตั้งใกล้กับกรอบประตู	10
กำแพงภายในหลุด พื้นที่เสียหาย 5-10 % ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ครึ่งล่างของกำแพง	10

2.4 ดิน (Earth)

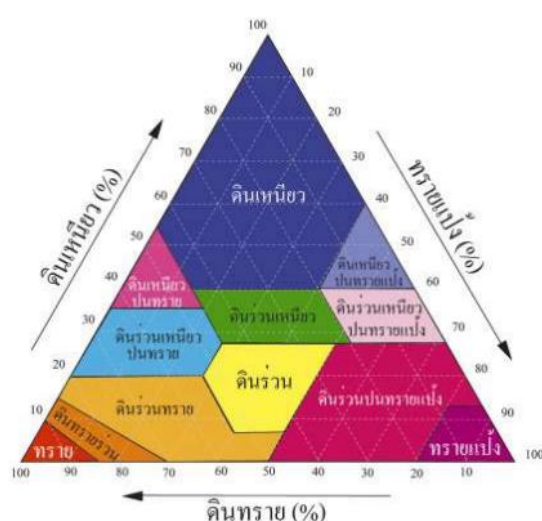
ดินหมายถึงวัตถุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสลายตัวทางกายภาพและเคมีของสารอินทรีย์ หินและแร่ กลายเป็นชั้นผิวบนของโลก ดินในแต่ละแหล่งจะมีลักษณะแตกต่างกัน อนุภาคที่ใหญ่ที่สุดคืออนุภาคทราย (Sand) อนุภาครองลงมาคืออนุภาคทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดคืออนุภาคดินเหนียว (Clay) ส่วนผสมของอนุภาคทั้งสามมีผลต่อคุณสมบัติของดิน ซึ่งทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปแสดงดังรูปที่ 2.6

ดินเหนียวเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะมีความแข็งแรงมาก ในสภาพเปียกสามารถปั้นเป็นก้อนได้ มีความสามารถในการระบายน้ำและอากาศต่ำ ดินร่วนเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดนุ่มมือในสภาพดินแห้งจะสามารถจับกันเป็นก้อนแข็งพอประมาณ ในสภาพที่มีความชื้นสามารถปั้นเป็นก้อนไม่แตกจากกัน มีความสามารถในการระบายน้ำได้ดี ส่วนดินทรายเป็นเนื้อดินเกาะกันหลวม เนื่องจากมีส่วนที่เป็นทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มาก มีการยึดเกาะตัวเล็กน้อยในสภาพชื้นแต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกัน

ทรายเป็นส่วนย่อยสลายจากหินมีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 0.60 – 4.75 มม ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ทรายที่มีขนาดเล็กกว่านี้จะเรียกว่าทรายแป้งหรือตะกอนทราย โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 – 0.60 มม ขนาดที่เล็กกว่านี้ถือว่าเป็นอนุภาคดินเหนียว เม็ดทรายในเนื้อดินจะช่วยให้เกิดความแข็งแรงและลดการหดตัวเมื่อดินแห้ง จากการค้นคว้าข้อมูลดินร่วนปน ทรายที่มีอนุภาคทรายร้อยละ 50 – 70 อนุภาคทรายแป้งร้อยละ 15 – 20 และอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 10 – 30 มีความเหมาะสมในการนำมาทำอิฐดินดิบ ข้อมูลบ้านดินแบบอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สัดส่วนของดินที่เหมาะสมกับรูปแบบต่างๆ (สุรพงษ์, 2558)

รูปแบบบ้านดิน	ดินเหนียว (%)	ทรายแป้ง (%)	ดินเหนียวและทรายแป้ง (%)	ทราย (%)	กรวด (%)
ดินอัด	5-20	10-30	15-35	35-80	0-30
ก้อนดินอัด	5-25	15-35	20-40	40-80	0-20
อิฐดินดิบ	10-30	10-40	20-50	50-80	-
ใช้ทั่วไป	15	20	35	60	5



รูปที่ 2.6 การแบ่งชนิดของดินตาม USDA (สุรพงษ์, 2558)

2.4.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน

ดินประกอบไปด้วยเนื้อดินหรือเม็ดดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งในช่องว่างอาจเต็มไปด้วยน้ำหรืออากาศ อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือมีทั้งน้ำและอากาศปนกัน ดินจะประกอบด้วย

- 1) ของแข็ง คือ เนื้อดินหรือเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นแร่ธาตุต่างๆ
- 2) ของเหลว ซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นน้ำ
- 3) ก๊าซ ซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยปกติจะเป็นอากาศ

2.4.2 สถานภาพของดิน

ดินพวกเม็ดละเอียดโดยเฉพาะดินเหนียว จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปตามจำนวนน้ำที่มีอยู่ในดิน และจำนวนน้ำในดินนี้จะมีผลสำคัญต่อสถานภาพของดิน เพราะจะทำให้ดินอยู่ในสถานภาพต่าง ๆ กัน เช่น ดินอาจมีสถานภาพเป็นดินเหลว (Liquid state) เมื่อมีน้ำมากจนกระทั่งเนื้อดินมีลักษณะคล้ายของเหลวข้น ไม่สามารถทรงรูปอยู่ได้ และเมื่อปริมาณน้ำลดลงอีกดินก็จะมีสถานภาพเป็นวัสดุกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) เพราะ ปั้นเป็นรูปต่างๆ ได้ยาก มักจะมีรอยแตกร้าว ปริมาณน้ำที่เป็นจุดแบ่งสถานภาพต่างๆ ของดินนี้เรียกว่า (Consistency limit หรือ Atterberg' limits) ได้แก่

- 1) Liquid Limit (L.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากของเหลวเป็นพลาสติก หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถไหลไปได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง
- 2) Plastic Limit (P.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นวัสดุกึ่งแข็ง หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถถูกคลึงเป็นเส้นกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม หรือ 1/8 นิ้ว ได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว
- 3) Shrinkage Limit (S.L.) คือ ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากวัสดุกึ่งแข็งเป็นของแข็ง หรือคือปริมาณน้ำที่มากที่สุดซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการสูญเสียน้ำอีกต่อไปก็ไม่ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาตรลง

ค่าสูงสุดและต่ำสุดของขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเหนียวสำหรับการก่อสร้างบ้าน ดินรูปแบบต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเหนียวสำหรับการก่อสร้างบ้านดิน
รูปแบบต่างๆ (สุรพงษ์, 2558)

รูปแบบบ้านดิน	ขีดจำกัดเหลว	ดัชนีความเหนียว
ดินอัด	25 - 46	2 - 30
ก้อนดินอัด	25 - 50	2 - 31
อิฐดินดิบ	31 - 50	16 - 33

2.4.3 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกดินคือการจัดกลุ่มดินให้เป็นกลุ่มย่อยๆ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในทิศทางเดียวกัน ปัจจุบันนี้ระบบการจำแนกดินที่นิยมมีด้วยกัน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบเอกภาพ (USCS) และระบบ AASHTO แต่ในที่นี้จะขอกล่าวเพียงระบบเอกภาพเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบการจำแนกดินเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS)

ระบบเอกภาพแบ่งดินออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ ดินเม็ดหยาบ (Coarse grained soil) พวกรวดและทราย ซึ่งเป็นดินที่มีขนาดของเม็ดดินค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (ขนาด 0.075 มม) มากกว่าร้อยละ 50 ของดินทั้งหมด และเม็ดดินละเอียด (Fine grained soil) พวกลินตะกอนและดินเหนียว ซึ่งก็คือดินที่มีขนาดของเม็ดดินค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักดินทั้งหมด ต่อมาการจำแนกดินตามคุณสมบัติพื้นฐานของดิน สำหรับดินเม็ดหยาบ จะใช้ข้อมูลพิทักแอดเทอร์เบิร์ก สัญลักษณ์ของกลุ่มดินที่จำแนกโดยระบบนี้จะประกอบด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ 2 ตัว เช่น GW และ SM เป็นต้น โดยตัวอักษรตัวแรกแสดงชนิดของดิน (ดินเม็ดหยาบหรือดินเม็ดละเอียด) ตัวที่สองแสดงคุณสมบัติของดินตัวอักษรแต่ละตัวมีความหมาย (สุขสันต์, 2554) ดังต่อตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS (สุขสันต์, 2554)

สัญลักษณ์	ลักษณะของเม็ดดิน	ย่อมาจาก
G	กรวด	Gravel
S	ทราย	Sand
M	ตะกอนทราย	Silt
C	ดินเหนียว	Clay
O	สารอินทรีย์	Organic

ตารางที่ 2.7 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดินโดยระบบ USCS (สฤษดิ์, 2554) (ต่อ)

สัญลักษณ์	ลักษณะของเม็ดดิน	ย่อมาจาก
Pt	มีสารอินทรีย์สูง	Peat
W	มีขนาดคละกันดี	Well graded
P	มีขนาดคละกันไม่ดี	Poorly graded
L	L.L. < 50 %	Low Liquid Limit
H	L.L. > 50 %	High Liquid Limit

2.4.4 สารปรับสภาพหรือสารผสมเพิ่มในดิน

สารปรับสภาพหรือสารผสมเพิ่มที่ผสมร่วมกับดินเหนียวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและสมรรถภาพของอิฐเช่น กำลั้งอัด หน่ว้น้ำหนัก ความพรุน การดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อการขัดสีและความแข็ง สามารถจำแนกออกเป็นสามกลุ่มใหญ่คือ ชนิดแร่ธาตุสารที่สำคัญประกอบด้วย ทราย สารปอชโซลานและเถ้า ชนิดที่สองคือชนิดสังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากโรงอุตสาหกรรมได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ยิปซัม สบู่และวัสดุขยงมะตอย ชนิดสุดท้ายเป็นแบบอินทรีย์ประกอบด้วยวัสดุที่ได้จากพืชและสัตว์ประกอบ เส้นใย น้ำมันพืช สารเทนินิน ขางไม้ กากน้ำตาล ขน เลือดไขมันและสิ่งขับถ่ายจากสัตว์เป็นต้น

จากตัวอย่างที่แสดงไว้จะพบว่าสารปรับสภาพมีให้เลือกหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการหาสารปรับสภาพนั้นๆ ขั้นตอนการเตรียมและผสมเข้าไปในส่วนผสม สารปรับสภาพที่ควรเลือกใช้สำหรับประเทศไทยได้แก่ ทราย เส้นใยพืช ปูนขาวและปูนซีเมนต์ ตารางที่ 2.8 แสดงผลกระทบของสารปรับสภาพที่มีต่ออิฐดินดิบ จากตารางจะเห็นว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความเอนกประสงค์ที่สุด การใช้ปูนซีเมนต์หรือปูนขาวขึ้นอยู่กับปริมาณดินเหนียวที่อยู่ในส่วนผสมดินและส่วนของโครงสร้างที่ต้องการใช้งาน ดังตารางที่ 2.9 แสดงข้อมูลที่แนะนำโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) (สุรพงษ์, 2558)

ตารางที่ 2.8 ผลกระทบของสารปรับสภาพที่มีต่ออินดิคิบ (สุรพงษ์, 2558)

ชนิดสารปรับสภาพ	รายละเอียด	ลดการหดตัว – พองตัว	กำลังและความแข็งแรง	ความทนทานต่อน้ำ	กำลังอัด	กำลังดึง	การกัดกร่อน	แข็งแรงเร็วขึ้น
แร่ธาตุ	ทราย	/			/			
	ปอชโซลาน		/		/		/	
	เถ้า	/	/					
สังเคราะห์	ปูนปอร์ตแลนด์	/	/	/	/		/	/
	ปูนขาว		/					
	ยิบซัม				/			
	ยางมะตอย			/				
ได้จากพืช	เส้นใยพืช		/			/		
	น้ำมันพืช			/				
	ยางไม้			/				
	กากน้ำตาล		/					
ได้จากสัตว์	เส้นใยสัตว์					/		
	เลือด		/	/				
	ไขมันสัตว์			/				
	อุจจาระ	/	/					

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินสำหรับโครงสร้างส่วนต่างๆ (สุรพงษ์, 2558)

ปริมาณดินเหนียว และทรายแป้ง (%)	กำแพงภายใน	กำแพงภายนอก	ฐานราก	พื้น
0 – 10	1 : 16	1 : 16	1 : 16	1 : 8
10 – 25	1 : 22	1 : 16	1 : 16	1 : 11
25 - 40	1 : 22	1 : 11	1 : 11	1 : 11

2.5 แร่ดินเหนียว (Clay Mineral)

หมายถึง กลุ่มแร่ซิลิเกต (Alumino silicate minerals) จัดอยู่ในกลุ่ม ฟิโลซิลิเกต (Phyllosilicates) มีโครงสร้างเป็นแผ่น (Sheet structure) ยกเว้นพวกกลุ่มแอตตาปูไกต์ (Attapugite) ซึ่งมีโครงสร้างยาวแบบลูกโซ่ (Chain silicates) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอลูมินา (Alumina sheet) และแผ่นซิลิกา (Silica sheet) ที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แบบ 2 หรือ 3 ชั้น มีทั้งชนิดที่ขยายตัวได้และขยายตัวไม่ได้ มักมีไอออน (Ions) ของพวก Fe, Mg, Ca, K, Na และไอออนอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยในโครงสร้าง ดินเหนียวที่พบทั่วไปคือ เกาลินไนท์ (Kaolinite), อิลไลต์ (Illite), มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และเวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite) (ศิริรัตน์, 2545) ซึ่งมีเม็ดดินจะเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก มีขนาดไม่เกิน 0.002 มม หรืออาจจะเล็กกว่านี้มาก ดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งก่อให้เกิดเป็นโครงผลึก ซึ่งความหนาของผลึกอาจเล็กถึง 15 อังสตรอม และความกว้างอยู่ในระดับไมครอน (พรพจน์, 2554)

ตารางที่ 2.10 แสดงประโยชน์การใช้งานของดินชนิดต่างๆ (ศิริรัตน์, 2545)

ชนิดดิน	ประโยชน์การใช้งานทางเซรามิก
ดินขาว (Kaolinite)	ใช้ทำฟิลเลอร์ (Filler) และเคลือบกระดาษ (Coating) ทำผลิตภัณฑ์ทนไฟ (Refractories) ผลิตภัณฑ์เซรามิก
บอลล์เคลย์ (Ball clay)	ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ผลิตภัณฑ์ทนไฟ
ดินทนไฟ (Fire clay)	ใช้ทำผลิตภัณฑ์ทนไฟ ผลิตภัณฑ์เซรามิก
เบนโตไนต์ (Bentonite)	ทำโคลนเจาะ (Drilling mud) และผสมทรายทำเบ้าหลอม (Foundry sand bond) โดยทำจากเบนโตไนต์ชนิดพองตัว (Swelling type) ส่วนเบนโตไนต์ชนิดไม่พองตัว (Non swelling type) ใช้ทำสารที่ดูดซับหรือฟอกสี

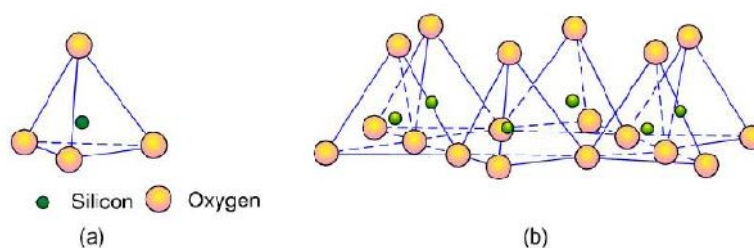
ตารางที่ 2.10 แสดงประโยชน์การใช้งานของดินชนิดต่างๆ (ศิริรัตน์, 2545) (ต่อ)

ชนิดดิน	ประโยชน์การใช้งานทางเซรามิก
ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth)	ใช้ดูดซับ ฟอกสี และประโยชน์ในด้านอื่นๆ
ดินชนิดอื่นๆ (Miscellaneous clays) รวมทั้งหินดินดาน	ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ปูนซีเมนต์ (Cements) และ ผลิตภัณฑ์น้ำหนักเบา

2.6 โครงสร้างของผลึกของดินเหนียว (Structure Clay Mineral)

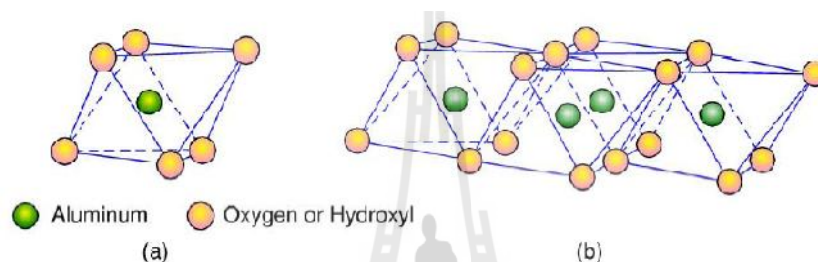
จากการค้นพบรังสี X-ray และเครื่องมือที่ทันสมัยในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเล็กๆ คือ X-ray Diffraction, Electron microscope และ Differential thermal analysis ทำให้มนุษย์เข้าใจว่า โครงสร้างของดินเหนียวไม่ได้อยู่ในสภาพที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) และมีรูปร่างคล้ายกับกรวด หรือทรายทั่วไป แต่แร่ดินมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก และมีสภาพเป็นผลึกแทบทุกชนิด ดินเหนียวสามารถแบ่งได้ 3 พวกใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างผลึกได้แก่ Kaolinite, Smectite และ Hydrous mica หรือ Illite นอกจากนั้นยังพบว่ามียังมีดินเหนียวกลุ่มอื่นๆ อีก เช่น Vermiculite และ Chlorite เป็นต้น โครงสร้างผลึกของดินเหนียว ประกอบไปด้วย (ศิริรัตน์, 2545)

2.6.1 Silica tetrahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (Si) 1 อะตอมล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม อัดตัวกันโค่นมีซิลิกอนอยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้าน ดังนั้นจึงเรียกว่า Silica tetrahedral unit หน่วยโครงสร้างนี้ จะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นโดยที่มีการเกาะออกซิเจนร่วมกันระหว่างอะตอมที่อยู่พื้นฐาน ทำให้เกิดเป็นแผ่นที่มีลักษณะเหมือนรังผึ้งขึ้น ก็จะเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป แผ่นนี้เรียกว่า Silica tetrahedral sheet หรือเรียกสั้นๆ ว่าแผ่น ซิลิกา (Silica sheet) (ศิริรัตน์, 2545) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่สำคัญของดินเหนียว (พรพจน์, 2554)

2.6.2 Alumina octahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างอีกชุดหนึ่งซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 6 อะตอม อัดตัวกันโดยมีอะลูมิเนียมอะตอม อยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงที่มีแปดด้าน ดังนั้นจึงเรียกว่า Alumina octahedral unit หน่วยโครงสร้าง นี้จะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นในแนวระนาบ เช่นเดียวกับ Silica tetrahedral sheet โดยมีการเกาะ ออกซิเจนร่วมกัน แต่แผ่นที่เกิดขึ้นจะเป็นแผ่นที่บิไม่มีช่องรูปหกเหลี่ยมเหมือนอย่างแผ่นซิลิกา (Silica sheet) แผ่นของ Alumina octahedral นี้เรียกว่า Alumina octahedral sheet หรือแผ่น Alumina sheet (ศิริรัตน์, 2545) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแผ่นอลูมินา (Alumina octahedral sheet) ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างที่สำคัญ ของดินเหนียว (พรพจน์, 2554)

2.7 คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว (Properties of Clay mineral)

2.7.1 รูปร่างและขนาด รูปร่างและขนาดของดินเหนียว มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (Flake-like) ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของดินเหนียวส่วนใหญ่จะทรงไว้ในลักษณะของผลึก บางชนิดจะมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ได้อย่างชัดเจนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน บาง ชนิดเป็นแผ่นบางๆ ส่วนขอบของอนุภาคที่เป็นผลึกเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นด้วยชัดเจนเพราะมี รอยฉีกขาดอยู่ทั่วไปหมด ส่วนดินเหนียวบางชนิดก็มีรูปร่างของแผ่นบางๆ ที่ม้วนเป็นหลอดคล้าย ขนมหางม้าก็มี เป็นต้น ขนาดอนุภาคของดินเหนียวนั้นก็แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิด ลักษณะ องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical organization) และสภาพที่เกิดขึ้นโดยปกติจะมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน (micron)

2.7.2 พื้นที่ผิว (Surface area) เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียว มีขนาดเล็กมากและ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแผ่นแบนและบางจึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิว ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงมาก อนุภาคของสารมีน้ำหนักเท่ากัน แต่เมื่อมีรูปร่างและลักษณะ แตกต่างกันไป เช่น กลมเป็นลูกบาศก์และแบน จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดแตกต่างกันเป็นอย่างมาก

อนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากันอนุภาคจะเป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะเห็นได้ว่าดินเหนียว มีรูปร่างที่ส่งเสริมให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด

2.7.3 ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity) ดินเหนียวมีคุณสมบัติเกี่ยวกับความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียว คำว่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) นั้นหมายถึงความสามารถเกาะยึดกันได้ ระหว่างของอนุภาคดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความเชื่อมแน่นสูงก็เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียว ซึ่งมีความเชื่อมแน่นสูงจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ การไถพรวนดินนั้นลำบากเมื่อดินนั้นเปียก นอกจากนี้เมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่มบีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เราก็มักเรียกว่าสภาพพลาสติก (Plasticity) ส่วนดินเหนียวบางชนิดมีความเชื่อมแน่นต่ำคือมีพื้นที่ผิวน้อย จึงมีน้ำยึดเกาะอยู่ที่ผิวน้อยที่จะช่วยยึดอนุภาคของดินเหนียวอื่นๆ ที่อยู่ติดไป ดังนั้น จึงมีผลทำให้การเกาะกันระหว่างอนุภาคของดินเหนียวไม่แน่นถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่ก็ตาม ดังนั้นจึงมีสภาพร่วน ไม่เหนียวและคุณสมบัติเกี่ยวกับพลาสติกก็ต่ำด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความเหนียวและร่วนของดินนี้เกี่ยวข้องอยู่กับพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นอย่างมาก ดินเหนียวที่มีความเชื่อมแน่น และสภาพพลาสติกสูงจะเป็นดินเหนียวพวกที่มีพื้นที่ผิวมาก จึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ที่ผิวได้มาก การเกาะกัน ระหว่างอนุภาคดินก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

2.7.4 การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking) ดินเหนียวบางชนิดมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการขยายตัวได้สูงมาก บางชนิดก็ขยายตัวได้น้อยทั้งนี้เกี่ยวกับลักษณะทางโครงสร้างของดินเหนียว โดยเฉพาะดินเหนียวบางชนิดแผ่นผลึกที่ซับซ้อนทับกันเป็น Clay micelle นั้นจะมีช่องหรือระยะระหว่างแผ่นผลึกที่ทับกันค่อนข้างกว้างและไม่ยึดเกาะกันเหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย แล้วเข้าไปยึดเกาะอยู่ในชั้นระหว่างแผ่น (Inter layer) นั้นได้มากขึ้นก็ยังทำให้ระยะระหว่างแผ่นโครงสร้างดินเหนียวพวกนี้ขยายมากขึ้น ดังนั้นจึงมีผลทำให้ดินเหนียวพวกนี้เมื่อเปียกน้ำแล้วจะพองหรือขยายตัวได้ แต่ถ้าทำให้ดินเหนียวนี้แห้งลง เช่นนำเข้าเตาอบเพื่อไล่น้ำออก น้ำที่เกาะอยู่ในช่องว่างนี้ของดินเหนียวก็จะหลุดโดยการระเหยออกมาเมื่อน้ำออกมาทั้งหมดก็ทำให้ระยะช่องว่างของดินเหนียวนั้นยุบลงมา ดังนั้นจึงมีผลทำให้ดินเหนียวนั้นหดตัว (ศิริรัตน์, 2545)

2.8 ดินเหนียวด่านเกวียน (Dan Kwian Clay Mineral)

ดินเหนียวด่านเกวียน เป็นดินเหนียวที่พบได้บริเวณเขตอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา ต.ด่านเกวียน อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นบ่อดินเหนียวที่นิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้องเคลือบ อิฐก่อสร้าง ฯลฯ เป็นดินเหนียวปนทรายที่มีคุณสมบัติการเป็นพลาสติกสูง สามารถปั้นขึ้นรูปได้โดยง่าย และเมื่อผ่านการเผาจะทำให้มีความแข็งแรงและความทนทานสูง จากงานวิจัยของ (ศิริรัตน์, 2545) ได้ทำการเจาะสำรวจบ่อดินเหนียวเพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวในเขตจังหวัดนครราชสีมา เพื่อนำมาใช้ในการงานเซรามิก จากการตรวจสอบเฟสของดินทรายและดินเหนียวด่านเกวียน พบว่า ดินทรายด่านเกวียนพบควอร์ต (SiO₂) เป็นหลักและพบ Montmorillonite เพียงเล็กน้อยจึงทำให้ดินทรายด่านเกวียนมีลักษณะเป็นทราย มีความเหนียวน้อยมาก ส่วนดินเหนียวด่านเกวียน พบส่วนประกอบหลักเป็นควอร์ต (SiO₂) และพบ Montmorillonite (Na_{0.3}(Al, Mg)₂ SiO₄O₁₀(OH)₂·8H₂O) และ Chamosite (Fe₃SiO₂O₅(OH)₄) ซึ่งทำให้ดินเหนียวด่านเกวียนมีดินเหนียวและมีสีแดงเพราะมีส่วนประกอบของเหล็ก ข้อมูลจากการวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด่านเกวียนและดินทรายด่านเกวียน ดังตารางที่ 2.11 และ 2.12

ตารางที่ 2.11 เฟสของสารประกอบที่ตรวจพบในดินทรายด่านเกวียนและดินเหนียวด่านเกวียน (ศิริรัตน์, 2545)

ชนิดดิน	เฟสที่ปรากฏ
ดินทรายด่านเกวียน	Quartz (SiO ₂) Montmorillonite (Al(OH) ₂) _{0.33} Al ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33} O ₁₀)(OH) ₂
ดินเหนียวด่านเกวียน	Quartz (SiO ₂) Montmorillonite (Na _{0.3} (Al, Mg) ₂ SiO ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·8H ₂ O) Chamosite (Fe ₃ SiO ₂ O ₅ (OH) ₄)

2.8.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวและดินทรายด่านเกวียน

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF ของดินเหนียวและดินทรายด่านเกวียน ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้านเกวียนและดินทรายด้านเกวียนด้วย XRF (ศิริรัตน์, 2545)

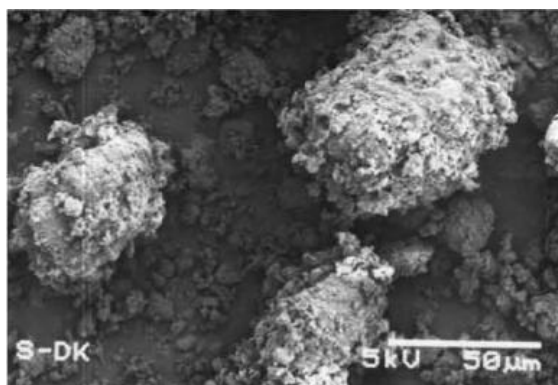
องค์ประกอบของสาร	ดินเหนียวด้านเกวียน	ดินทรายด้านเกวียน
Silicon Dioxide (SiO_2)	54.7	81.4
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	21.3	7.56
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	6.63	2.91
Calcium Oxide (CaO)	0.18	0.29
Magnesium Oxide (MgO)	0.90	0.38
Potassium Oxide (K_2O)	1.34	0.75
Loss On Ignition (LOI)	13.8	4.72

2.8.2 ผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคดินเหนียวและดินทรายด้านเกวียน

จากผลการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคดินตัวอย่างก่อนนำไปผ่านการล้าง โดยวิธี wet sieve พบว่า ดินเหนียวและดินทรายด้านเกวียนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 ไมครอน อยู่ถึง 95.55 % และ 86.18 % ตามลำดับ

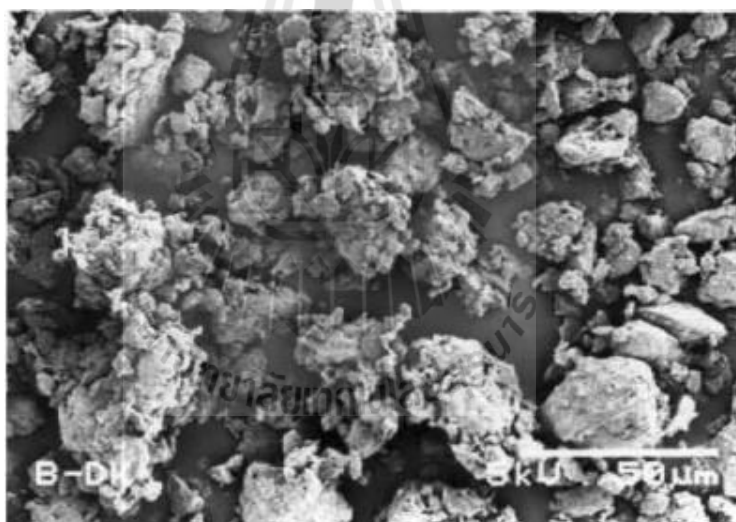
2.8.3 ผลการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคดินตัวอย่าง โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ผลการศึกษารูปร่างและขนาดอนุภาคดินตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope พบว่าดินเหนียวและดินทรายด้านเกวียน มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นและเกาะกันเป็นก้อนโต เนื่องจากมี Montmorillonite รูปร่างและขนาดอนุภาคของดินทรายด้านเกวียน มีขนาดประมาณ 3 – 50 ไมครอน ลักษณะของรูปร่างมีลักษณะเป็นแผ่นๆ และเกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพถ่าย SEM ของดินทรายค่านเกวียน (ศิริรัตน์, 2545)

รูปร่างและขนาดของอนุภาคดินเหนียวค่านเกวียน มีขนาดประมาณ 3 – 20 ไมครอน ลักษณะของรูปร่างมีลักษณะเป็นแผ่นๆ และเกาะกันเป็นก้อนโตขึ้น ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพถ่าย SEM ของดินเหนียวค่านเกวียน (ศิริรัตน์, 2545)

2.9 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials)

วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan materials) เป็นสารซีเมนต์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยชาวอียิปต์โบราณใช้มอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งทำจากยิปซัมที่ผ่านการเผาเพื่อก่อสร้างสิ่งต่างๆ หลายอย่าง รวมทั้งใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างหินในการสร้างปิรามิด

แห่งคีโอปส์ (Pyramid of Cheops) เมื่อประมาณ 3,000 ปีก่อนคริสตศักราช ยิปซัมที่ผ่านการเผาจะรวมตัวกับน้ำและก่อตัวแต่ไม่สามารถแข็งตัวในน้ำได้

ต่อมาชาวโรมันเรียนรู้การใช้ปูนขาวจากชาวกรีก และชาวอียิปต์ก็เริ่มใช้ปูนขาวในสมัยเดียวกันกับชาวโรมัน การแข็งตัวของปูนขาวเกิดจากการรวมตัวกับน้ำและการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ การแข็งตัวของเพสต์ (Paste) หรือมอร์ตาร์ที่ทำมาจากปูนขาวจึงเกิดจากผิวภายนอกเข้าสู่ภายใน และเนื่องจากปูนขาวต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นปูนขาวจึงไม่สามารถแข็งตัวได้ในน้ำ ชาวกรีกและชาวโรมันโบราณจึงใช้เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) ที่บดให้ละเอียดผสมกับปูนขาวและทรายทำเป็นมอร์ตาร์ที่มีความแข็งแรงขึ้นและสามารถทนทานต่อการละลายของน้ำได้ดี

ในเถ้าภูเขาไฟมีธาตุซิลิกาและอลูมินาที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว ปฏิกิริยานี้มีชื่อเรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzonic reaction)” เนื่องจากเถ้าภูเขาไฟที่ดีที่สุดมาจากหมู่บ้านปอซซูโอลิ (Pozzuoli) ใกล้กับภูเขาไฟเวซุเวียส (Vesuvius) ซึ่งเคยระเบิดพ่นลาวา (Lava) และเถ้าถ่านออกมาอย่างมากมายในอดีต ดังนั้นคำว่า “ปอซโซลาน” จึงใช้ต่อกันมา และหมายถึงวัสดุที่ละเอียดคล้ายเถ้าภูเขาไฟเมื่อใช้ผสมกับปูนขาวและน้ำทำให้ได้สารซีเมนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน

มาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีธาตุซิลิกา (SiO_2) หรือซิลิกาและอลูมินา (Al_2O_3 และ SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานอยู่ในรูปของผงละเอียดและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ และเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานคล้ายปูนซีเมนต์” สิ่งสำคัญประการหนึ่งของวัสดุปอซโซลานคือ ต้องมีความละเอียดสูงจึงจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีและรวดเร็ว

ตารางที่ 2.13 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	>70.0	>70.0	70-50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0

ตารางที่ 2.13 ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) (ต่อ)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	N
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

ประเภทของวัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (Diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ และดินขาว (Meta kaolin) เป็นต้น และ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้ เถ้าขาน้อย เถ้าปาล์ม น้ำมัน และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์, 2545)

2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาด่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ดังแสดงในตารางที่ 2.14 ถึง 2.16 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีปริมาณ CaO ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากดินเหนียวและควอร์ต เนื่องจากด่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง ตามมาตรฐาน ASTM C 311 (2007) (อนนท์, 2545)

ตารางที่ 2.14 ข้อกำหนดทางกายภาพของวัสดุปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด :			
- ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละหนึ่งกำลังเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	34	34	34
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	115	115
ความคงตัว (Soundness) ^C			
- การขยายตัวหรือหดตัวอโตเคลฟ, ไม่เกินร้อยละข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ ^D	0.8	0.8	0.8
- ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากดินเหนียวโดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้ว ยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย (อนนท์, 2545)

เถ้าลอย Class C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารปอชโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย CaO สูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญาและอินทรชัย, 2548) แต่ในปัจจุบันเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 (ปริญญาและชัย, 2547)

2.9.1 การนำวัสดุปอชโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

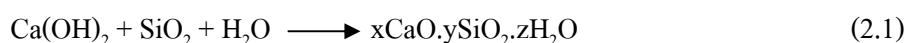
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ ผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐานปฏิกิริยาปอช

โซลานเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ทั้งหมด

การประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด โดยอนุภาคของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อแพร่กระจายเข้าไปในเพสต์แล้วจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลаниค ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แทรกตามอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกเหนือจากปฏิกิริยาปอซโซลаниคแล้วยังเกิดการแทรกซึมของสารปอซโซลานที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนด้วย

2.9.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ, ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น ผลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมินีเยมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่คอนกรีตเช่นเดียวกับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของปฏิกิริยาปอซโซลานมีสมการเคมีดังสมการ (2.1) และ (2.2)



ค่า x, y และ z ในสมการที่ (2.2) และ (2.3) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินีเยมไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สารประกอบ C-S-H และ C-A-H นอกจากจะช่วยให้กำลังให้กับคอนกรีตแล้ว ยังช่วยให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ด

ปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตลดลงตามไปด้วย (ปริญญญาและชัย, 2547)

2.10 ปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

วัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีมาแล้ว คำว่า “ปอซโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอซซูลิ (Pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยในปีคริสต์ศักราช 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (Vesuvius) แต่อย่างไรก็ตามก่อนคริสต์ศักราช 2000 ได้มีการนำถ้ำภูเขาไฟและดินเฝ้า มาใช้ในงานก่อสร้างมากมายที่ โรม กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานยังคงสามารถยืนหยัดให้เห็นได้จนถึงปัจจุบันนี้จึงเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นถึงความทนทานของการใช้วัสดุปอซโซลาน ต่อมาในต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือ ในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่ และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอซโซลานยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกที่พบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์-ซิลิกาในคอนกรีต ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเฝ้า (Calcined clay) ดินดานเฝ้า (Calcined shale) และดินขาว (Metakaolin) ซึ่งดินขาวที่กล่าวถึงนี้เป็นดินเฝ้าพิเศษ ผลิตโดยเอาดินเหนียวขาวล้วนมาเผาที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจึงบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 2 ไมครอน ดินขาวนำมาใช้ในงานที่ต้องการความซึมผ่านที่ต่ำ หรือต้องการกำลังที่สูง ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตมากกว่านำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใส่เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอซโซลานธรรมชาติ (ASTM C 618 (2008))

Class F : เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก
Class C : เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิกและวัสดุประสานในซีเมนต์
Class N : ปอซโซลานธรรมชาติที่ถูกเผาหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย Diatomaceous Earth (diatomite) Opaline Cherts และดินดาน Tuffs และถ้ำภูเขาไฟหรือพิมิไซท์ ดินเฝ้า รวมทั้งดินขาว และดินดาน

วัสดุปอชโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจำแนกเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N ดังตารางที่ 2.9 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีและคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลานและวัสดุปอชโซลานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (จันทนา, 2550)

ตารางที่ 2.16 การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของเถ้าลอย ตะกรัน ซิลิกาฟุ่ม ดินดานเผา และดินขาว (จันทนา, 2550)

สารประกอบ	ปริมาณสารประกอบ (%)					
	เถ้าลอย Class F	เถ้าลอย Class C	ตะกรัน บด	ซิลิกาฟุ่ม	ดินดาน เผา	ดินขาว
SiO ₂	52	35	35	90	50	53
Al ₂ O ₃	23	18	12	0.4	20	43
Fe ₂ O ₃	11	6	1	0.4	8	0.5
CaO	5	21	40	1.6	8	0.1
SO ₃	0.8	4.1	9	0.4	0.4	0.1
Na ₂ O ₃	1.0	5.8	0.3	0.5	-	0.05
K ₂ O	2.0	0.7	0.4	2.2	-	0.4
Total Na (eq. Alk)	2.2	6.3	0.6	1.9	-	0.3
Loss On Ignition (LOI)	2.8	0.5	1.0	3.0	3.0	0.7
Blaine Fineness, cm ₂ /g	4,200	4,200	4,000	200,000	7300	190000
Relative Density	2.38	2.65	2.94	2.40	2.63	2.50

2.11 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงหลักอย่างหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อถ่านหินถูกเผาจะกลายเป็นเชื้อเพลิง ใช้ในการต้มน้ำจนกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปหมุนกังหันไอน้ำ และกังหันไอน้ำจะไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และยังมีวัตถุพลอยได้คือ เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าถ่านเตา หรือ เถ้าหนัก (Bottom ash) และขี้ปซัม เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฝุ่นปนไปกับก๊าซร้อน และถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อแยกฝุ่นออกจากก๊าซร้อนก่อนปล่อยออก

จากปล่องควัน เถ้าถ่านหินเหล่านี้จะถูกรวบรวมเก็บไว้ในไซโล จากนั้นจึงนำไปทิ้งในสถานที่ที่เตรียมไว้ (Zhang, 2013)

เถ้าลอยมีลักษณะโดยทั่วไปคือ เป็นฝุ่นผงคล้ายปูนซีเมนต์ มีสีเทาดำ หรือน้ำตาล จัดเป็นวัสดุปอซโซลานอย่างหนึ่ง (Pozzolan Material) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักทางเคมี คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้น เถ้าลอยจึงมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมน้ำ เถ้าลอยนิยมนำมาใช้งานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลสองประการคือ ประการแรก พบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุ ซิลิกา, อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการไหลได้ดีขึ้น ทำให้การสูบล่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้ เนื่องจากรูปร่างที่กลม และผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง (ปริญาและชัย, 2547)



รูปที่ 2.11 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) ของเถ้าลอย (ศักดิ์สิทธิ์, 2551)

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยจะมีข้อเสีย คือ ทำให้

อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัว และละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่ (ศักดิ์สิทธิ์, 2551)

ในทางปฏิบัติจะใช้เถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารปอชโซลาน และจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาปอชโซลานทำให้กำลังรับแรงที่อายุมากขึ้นดีขึ้น และเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์และการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้คุณสมบัติด้านความทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลม เมื่อผสมทดแทนปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมหรือทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำลดลง ซึ่งทำให้ส่วนผสมมีความทึบน้ำสูงขึ้น และความคงทนดีขึ้นด้วยจึงนิยมใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม

2.11.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ดังนั้น ASTM C 618 จึงแยกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 – 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่แล้วถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class F ส่วนหินสับบิทูมินัส (Subbituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class C เป็นส่วนใหญ่ สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน เถ้าลอยที่ได้เป็นทั้ง Class F และ Class C เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม้สม่าเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจึงต่างกัน (วราภรณ์, 2536)

2.11.2 ความละเอียดของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อย โดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ (0.001 mm) จนถึง 0.15 mm ความละเอียดของเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินจะขึ้นอยู่กับการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเถ้าเผา การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะได้เถ้าลอยที่มีคุณภาพสูงและมี

ทรงกลม แต่ในกรณีเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าลอยจะไม่แน่นอน สำหรับเถ้าลอยในประเทศไทยพบว่าความละเอียดของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm^2/g

การวัดความละเอียดของเถ้าลอยมี 2 วิธีที่นิยมคือ วิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีร่อนผ่านแรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถ้าลอยกล่าวคือ เถ้าลอยต้องมีขนาดของอนุภาคร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยที่มีความละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่หยาบ

2.11.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าลอย เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่มีสถานะที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70 – 80 โดยเถ้าลอยที่ละเอียดจะมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าลอยที่หยาบ เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ นอกจากนี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน (ปริญญานและชัย, 2547) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตโดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 – 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น

2.11.4 ประโยชน์ของเถ้าลอยในงานคอนกรีต

1) ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรด เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารเชื่อมประสานและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งหากคอนกรีตสัมผัสกับกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก ดังนี้ (สมชัย, 2542)



ซึ่งสารประกอบ CaSO_4 จะตกตะกอนกลายเป็นยิปซัม (Gypsum) อยู่บนผิวคอนกรีต ทำให้ถูกชะล้างได้ง่าย ส่วนสารประกอบ CaCl_2 จะกลายเป็นผลึกเกลือคลอไรด์สะสมอยู่ในโพรงของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทำให้เกล็ดดังกล่าวสามารถละลายได้ จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในคอนกรีตทำให้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่มีอยู่ลดน้อยลง และสาเหตุอีกประการหนึ่งคือเถ้าลอยมีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงสามารถลดการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

2) ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในงานที่ใช้คอนกรีตเป็นปริมาณมาก ๆ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะสูง ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต ความร้อนสะสมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์จะลดลงเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ลดลง และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ลดโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากผลของความร้อน

3) เพิ่มกำลังของคอนกรีตในช่วงระยะปลาย การพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้ต้องมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเมื่อปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยาเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในเถ้าลอยอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจากเดิม จึงทำให้ความแข็งแรงในระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาจะลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น แต่สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยกลับพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เถ้าลอยแทนที่ในซีเมนต์มากขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดามีค่าเพิ่มขึ้น

4) เพิ่มความสามารถในการเทได้ เนื่องจากเถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมขนาดระหว่าง 5-40 ไมครอน ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยมาผสมคอนกรีตจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยเพิ่มความสามารถในการเทได้ คือ อนุภาคเถ้าลอยในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่าจะจับอยู่ที่ผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ส่งผลให้อนุภาคของปูนซีเมนต์อยู่ห่างกันจึงสามารถไหลได้ง่ายขึ้น (วรภรณ์, 2536)

5) ลดการหดตัวแบบแห้งจากการสูญเสียน้ำ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Dry Shrinkage) เป็นผลมาจากซีเมนต์เพสต์เกิดการสูญเสียน้ำขึ้น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อ

สารเชื่อมประสานมากย่อมเกิดการหดตัวแบบแห้งได้มาก (วราภรณ์, 2536) ถ้าลอยเมื่อนำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดลงที่ความสามารถในการเทได้เท่าเดิม ทำให้คอนกรีตผสมถ้าลอยมีความหดตัวแบบแห้งลดลง

2.12 ปูนขาว (Lime)

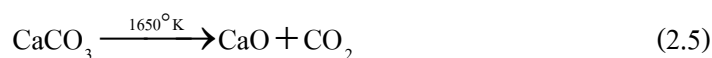
ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยนำมาเป็นวัสดุยึดประสานในการก่อสร้างอาคารหรือถนนมาตั้งแต่สมัยกรีก โรมัน และอียิปต์โบราณ โดยทั่วไปนิยามของปูนขาวคือ สารที่มีองค์ประกอบของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการเผาหินปูน มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สามารถขุดพบหินหินที่ใช้ผลิตปูนขาวได้ทั้งในสภาพที่บริสุทธิ์ ปูนขาวสามารถแบ่งตามลักษณะทางเคมีได้เป็น 2 ประเภท คือ Quick Lime (CaO) และ Hydrated Lime (Ca(OH)_2)

2.12.1 Quick Lime หรือ Calcium Oxide (CaO)

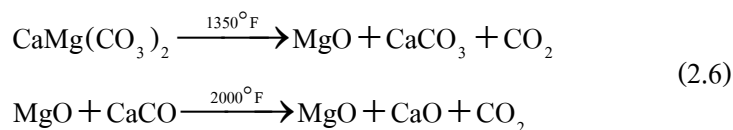
ปูนสุก (Quick Lime) คือ ปูนขาวที่มี Calcium Oxide (CaO) เป็นส่วนประกอบหลัก และมี Magnesium Oxide (MgO) เป็นส่วนประกอบรอง ปูนสุก สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท

- 1) High Calcium Quicklime (CaO)
- 2) Dolomitic Calcium Quicklime ($\text{CaO}+\text{MgO}$)

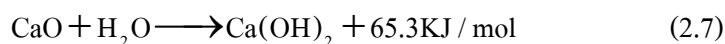
กรรมวิธีในการผลิต คือ การเผา Limestone โดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ที่มีอยู่ใน Limestone ให้เหลือแต่ CaO ดังสมการ



จากสมการจะเห็นได้ว่า จะต้องใช้อุณหภูมิในการเผา Limestone สูงถึง 1650 องศาฟาเรนไฮต์ (900 องศาเซลเซียส) จึงทำให้ Limestone แตกตัวออกเป็น CaO และ CO_2 แต่ในบางครั้งอาจต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาฟาเรนไฮต์ (1100 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ Calcitic Limestone เกิดการแตกตัวส่วนกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต Dolomitic Quicklime คือการเผา Dolomitic Quicklime ที่อุณหภูมิ 1350 องศาฟาเรนไฮต์ (750 องศาเซลเซียส) ทำให้ได้ MgO และ CO_2 แต่อาจจะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาฟาเรนไฮต์ (1100 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดการแตกตัวของ CO_2 ที่สมบูรณ์เต็มที่ ดังสมการ



ปูนสุก เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ปูนสุกแตกตัวออกเป็น Hydrated Lime หรือ Slake Lime และมีความร้อนเกิดขึ้นดังสมการ



ในกระบวนการผลิตนอกจากจะให้ความร้อนแล้ว ยังทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของปูนสุกเป็นปูนขาว ทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป (ปณชัย, 2551) ได้แสดงสมบัติของปูนสุกและปูนขาวดังแสดงในตารางที่ 2.17 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 2.18 และสมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.17 คุณสมบัติของปูนสุกและปูนขาว (ปณชัย, 2551)

Characteristic	Quick Lime	Water	Hydrate Lime
Molecular Weight	56	18	78
Specific Gravity	3.3	1	2.2
Relative Weight	1	0.32	1.32
Relative Volume	1	-	1.99



รูปที่ 2.12 ลักษณะของผงปูนขาว (ปูนสุก) ที่นำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม (ปณชัย, 2551)

ตารางที่ 2.18 คุณสมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ (ปณชัย, 2551)

PROPERTIES OF THEORETICALLY PURE LIMES				
Characteristic	Quick Lime		Hydrate Lime	
Chemical Name	Calcium or Calcium Oxide	Magnesium or Magnesium Oxide	Calcium Hydroxide	Magnesium Hydroxide
Chemical Formula	CaO	MgO	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂
Crystalline Form	Cubic	Cubic	Hexagonal	Hexagonal
Melting Point	2570 °C	2800 °C	-	-
Decomposition Point	-	-	580 °C	345 °C
Boiling Point	2850 °C	3600 °C	-	-
Heat of Solution at 18 °C	+ 18.33 kg-cal	-	+2.79 kg-cal	+0.0 kg-cal
Molecular Weight	56.09	40.32	74.10	58.34
Specific Gravity	3.40	3.65	3.34	2.40

ตารางที่ 2.19 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม (ปณชัย, 2551)

PROPERTIES OF COMMERCIAL LIMES		
(a) Quick Lime		
Chemical Composition	High Calcium (%)	Dolomitic (%)
CaO	92.25-98.00	55.00-57.50
MgO	0.30-2.50	37.60-40.80
CO ₂	0.40-1.50	0.40-1.50
SiO ₂	0.20-1.50	0.10-1.50
Fe ₂ O ₃	0.10-0.40	0.05-0.40
Al ₂ O ₃	0.10-0.50	0.05-0.50
H ₂ O	0.10-0.90	0.10-0.90
Specific Gravity	3.20-3.40	3.20-3.40
Specific Heat at 100 °F, Btu/lb	0.19	0.21
Bulk Density (People Lime), pcf	55.00-60.00	55.00-60.00

(b) Hydrate Lime			
Characteristic	High Calcium	Monohydrate Dolomitic	Dehydrate Dolomitic
Principle Chemical Composition	Ca(OH)_2	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$
Specific Gravity	2.30 – 2.40	2.70 – 2.90	2.40 – 2.60
Specific Heat at 100 °F, Btu/lb	0.29	0.29	0.29
Bulk Density, pcf	25.00 – 35.00	25.00 – 35.00	30.00 – 40.00

2.12.2 Hydrate Lime หรือ Calcium Hydroxide (Ca(OH)_2)

เมื่อปูนสุกรวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration กลายเป็นปูนขาว จำแนกได้ 3 ประเภท คือ

- 1) Hydrate high – Calcium Lime, Ca(OH)_2
- 2) Normal hydrate or Monohydrate Dolomitic Lime, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$
- 3) Predure hydrate or Dehydrate Dolomitic Lime, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$

ขนาดอนุภาคของปูนขาวจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 1 ใน 10 เท่า ของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์

ปูนขาวประเภท Hydrate Lime จะนิยมใช้กันกว้างขวางกว่าประเภท Quick Lime ทั้งนี้เป็นเพราะ Hydrate Lime เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่า มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเครื่องจักรและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้อยกว่า Quick Lime ส่วนรายละเอียดของคุณสมบัติ และสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 คุณสมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด (ปณชัย, 2551)

Characteristic	Lime	
	Quick Lime	Hydrate Lime
$\text{CaO} + \text{MgO}$	ไม่น้อยกว่า 92 %	ไม่มากกว่า 95 %
CO_2 – at Kiln	ไม่มากกว่า 3 %	ไม่มากกว่า 5 %
CO_2 – elsewhere fineness	ไม่มากกว่า 10 %	ไม่มากกว่า 7 %



รูปที่ 2.13 ลักษณะของผงปูนขาวไฮดรตที่นำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม (ปณชัย, 2551)

2.13 สารเคมีผสมเพิ่ม (Foaming Agent)

สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ (foaming agent) จัดเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ชนิดหนึ่ง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ (synthetic) และชนิดโปรตีน (protein-based) สามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นโฟม เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการย่อยสลายโดยแบคทีเรียและสิ่งมีชีวิตอื่น สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนในธรรมชาติ เช่น กรดไขมันของสบู่ (fatty acid soap) ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการผลิตเป็นโฟมคอนกรีต สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน เพื่อพัฒนาความแข็งแรงสูงเพื่อเป็นการยกระดับของโครงสร้างโฟมคอนกรีตให้สูงขึ้นอีก องค์ประกอบทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวต้องมีความมั่นคงในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างของคอนกรีต ($\text{pH} = 12.5$ โดยประมาณ) เพราะว่าสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดมีความอ่อนไหวง่ายต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิค่า ดังนั้นการเก็บรักษาสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตโดยเคร่งครัด นั้นมีความหลากหลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่และในขณะทำการเลือกสารลดแรงตึงผิวให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจาะจงประยุกต์ใช้จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิสูจน์ความถูกต้องด้วยเหตุนี้ก่อนจะใช้สารเพิ่มฟองจึงควรมีความรอบคอบที่จะดำเนินการทดลองผสมก่อนนำไปใช้กับงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานจริงที่มีปริมาณมาก (large scale)

2.13.1 ชนิดสังเคราะห์

สารลดแรงตึงผิวชนิดสังเคราะห์ (synthetic surfactant) สามารถจำแนกตามลักษณะของกลุ่มพวก Hydrophilic ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุลที่สามารถละลายในน้ำได้

1) ชนิดอานอนลบ (anionic) ประมาณ 70% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดประจุลบโดยส่วนหนึ่งของโมเลกุล Hydrophilic เหล่านั้นทำหน้าที่เป็นประจุลบ

2) ชนิดอานอนบวก (cationic) น้อยกว่า 5% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดประจุบวก โดยกลุ่ม Hydrophilic มีกำลังผลักดันทำหน้าที่เป็นประจุบวก

3) ชนิดไม่มีอานอน (non-ionic หรือไม่มีขั้ว) ประมาณ 25% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดไม่มีขั้วและมีความเป็นกลางทางอำนาจไฟฟ้า (electrically neutral) การปราศจากประจุไฟฟ้า (electric charge) นี้จะทำให้มีเสถียรภาพ (stability) มากขึ้นสำหรับเป็นประโยชน์ต่อขั้นตอนการผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ

4) ชนิดสองประจุ (amphoteric หรือ zwitterionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการผลิตโฟมคอนกรีตเท่าใดนัก เนื่องจากขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายที่โมเลกุลนั้นสามารถรักษาไว้ทั้งประจุบวกหรือลบหรือทั้งสองประจุ กล่าวคือถ้าคอนกรีตมีความเป็นด่าง ($\text{pH} > 7$) สารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่จะเป็นประจุลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าคอนกรีตมีความเป็นกรด ($\text{pH} < 7$) ประจุของสารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่จะเป็นขั้วบวกได้เช่นกัน

ลักษณะของสารเคมีดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นเป็นพื้นฐานและหน้าที่ที่มีความหลากหลาย ในปัจจุบันผลกระทบของลักษณะของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีตส่วนใหญ่ยังไม่รู้จัก และบางครั้งการใช้สารลดแรงตึงผิวยังอาจได้รับการคัดสรรด้วยพื้นฐานที่มาจากความมากในประสบการณ์ก็เป็นได้ ประสิทธิภาพการทำงานของสารลดแรงตึงผิวประเภทต่าง ๆ อาจมีความสามารถแตกต่างกันด้วยชนิดของสารยึดประสานที่ใช้ แม้ว่าอนุภาคของเม็ดซีเมนต์ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าพื้นผิวของอนุภาคของซีเมนต์มีทั้งประจุบวกและลบ เมื่อมีการนำวัสดุต่าง ๆ มาผสมกันจึงมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นการลบล้างประจุโดยการใส่เกลือลง ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีอานอน (non-ionic) หรือ Amphoteric อาจจะมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อนำไปใช้กับโฟมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทราย ขณะที่สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเดียว (single charge) อาจจะมีเหมาะสมมากสำหรับโฟมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเกลือเป็นส่วนผสม

2.13.2 สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน

สารละลายลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวหนึ่งส่วนต่อสัดส่วนน้ำ 5-40 เท่า อัตราส่วนที่ใช้ให้ได้รับประสิทธิภาพสูงสุดโดยทั่วไปเท่ากับ 1 : 25 แต่ค่าที่

เหมาะสมที่สุดคือบทบาทการทำงานของประเภทสารลดแรงตึงผิวและผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ อัตราส่วนในการเจือจางสารควรพิจารณาโดยคำนึงถึงความเข้มข้นของ Micelle ของโฟมเป็นสำคัญ สารละลายลดแรงตึงผิวคือฟองน้ำ (foamed) ความขึ้นเหลวคล้ายกับของโฟมโกนหนวด (shaving foam) และความหนาแน่นอยู่ระหว่าง $20-90 \text{ kg/m}^3$

ความหนาแน่นโฟมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้ ความหนาแน่นของโฟมที่ผลิตด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ชนิดโปรตีน (protein-based) มักจะประมาณ 50 kg/m^3 สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนมีขนาดฟองที่เล็กและมีความเสถียรภาพมากกว่า นอกจากนี้การเกิดการระบายน้ำออกจากโฟมเกิดขึ้นน้อยและมีโครงสร้างรูพรุนปิด (closed pore structure) ที่แข็งแรง ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดโปรตีนจึงอาจเหมาะสมมากในการผลิตโฟมคอนกรีตที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูงและมีความแข็งแรงสูง (Kearsley and Wainwright, 2002)

2.14 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2002 Sunil Kumar ได้ทำการศึกษาการผลิตอิฐก่อแบบตันและอิฐก่อแบบกลวงให้มีราคาถูกลง โดยศึกษาการใช้เถ้าลอย-ปูนขาวไม่ละลายน้ำ-ยิปซัม (FaL-G) โดยใช้คุณสมบัติทางเคมีระหว่างเถ้าลอยและปูนขาวเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยึดประสาน หล่อก้อนตัวอย่าง 2 ขนาด คือ อิฐแบบตัน ขนาด $200 \times 100 \times 75$ มม และอิฐแบบกลวง $45 \times 45 \times 250$ มม บ่มตัวอย่างที่อายุ 24, 48, 72 และ 96 วัน ทำการทดสอบกำลังอัด, การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดมีค่า 5.90 N/mm^2 ที่อายุ 96 วัน ค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 28.9 – 37.2 % ทั้งนี้ค่าการดูดซึมน้ำจะแปรผันเพิ่มขึ้นหรือลดต่ำลงตามปริมาณของเถ้าลอยในส่วนผสม และค่าความหนาแน่นมวลของอิฐมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $1172 - 1230 \text{ kg/m}^3$ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การผสมเถ้าลอยและปูนขาวชนิดไม่ละลายน้ำในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีคุณสมบัติในการยึดประสานระหว่างวัสดุเป็นอย่างดี ทำให้เกิดการยึดเกาะ การหดตัวและรอยแตกร้าวของอิฐมีค่าที่ลดน้อยลง

ในปี ค.ศ. 2003 K.B.Anand et al. ทำการศึกษาและประเมินผลการซึมผ่านของน้ำในระบบผนังก่อ โดยใช้ตัวอย่างผนังที่ก่อด้วยอิฐธรรมดา ขนาดตามมาตรฐานระบบอังกฤษ แบ่งการก่อผนังทดสอบออกเป็น 3 แบบ คือ แบบ Structurally efficient hollow block แบบ SILBLOCK และแบบ HILBLOCK การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ เครื่องมือวัดและขั้นตอนการทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E514-90 โดยใช้ความดันที่ 500 Pa (0.5 MPa) ในการทดสอบใช้ความดันที่ศูนย์กลาง 120 Pa (0.12 MPa) และใช้อัตราการพ่นไอน้ำที่ 138 liter/hr/m^2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมผ่านน้ำบนผนังทั้ง 3 แบบ จากการทดลองพบว่าอิฐที่ก่อแบบ SILBLOCK มี

ค่าการซึมผ่านน้ำที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเวลา และอิฐที่ก่อแบบ HILBOCK มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับรูปแบบการก่อและลักษณะรูปร่างของอิฐก่อซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการซึมผ่านของน้ำ

ในปี ค.ศ. 2003 Michele Dondi et al. ทำการศึกษาและวิจัยการซึมผ่านของไอน้ำในอิฐดินเหนียวโดยใช้ตัวอย่างอิฐดินเหนียวนำมาตัดให้มีขนาดเล็กลง ที่มีความหนา 2 ซม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม เป็นรูปทรงกระบอกตัด ใช้ตัวอย่างทดสอบจาก 13 อัตราส่วนผสม อบตัวอย่างให้แห้งก่อนการทดสอบ โดยใช้แรงดันไอน้ำในการทดสอบการซึมผ่าน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเปรียบเทียบกับความพรุนรวมและความหนาแน่นเฉลี่ยของความพรุนภายใน ใช้วิธีจำลองทางสถิติวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความแม่นยำและน่าเชื่อถือ จากผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านไอน้ำของอิฐดินเหนียวที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วง 3.35×10^{-12} ถึง $12.70 \times 10^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพิสัยจะอยู่ในช่วง 5.5 ถึง $8.5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ และยังพบอีกว่าอิทธิพลของขนาดรูพรุนภายในมีส่วนช่วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอน้ำมีค่าที่สูงหรือค่าที่ต่ำ ส่วนหนึ่งเกิดจากปริมาณขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคภาครูพรุนในที่ขนาดเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2003 Sunil Kumar ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของอิฐจากเถ้าลอย-ปูนขาวไม่ละลายน้ำ-ฟอสโฟอิมพ์ซั่ม เพื่อใช้ผลิตบล็อกกั้นผนังแบบกลวง โดยมีวัตถุประสงค์ผลของกำลังอัดการดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก และปริมาณร้อยละของวัสดุซีเมนต์ที่เหมาะสม (เถ้าลอยผสมปูนขาวไม่ละลายน้ำ) ใช้เถ้าลอยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20 – 80 โดยปริมาตร ผสมปูนขาวชนิดไม่ละลายน้ำอัตราส่วนร้อยละ 10 - 60 โดยปริมาตร และผสมเพิ่มฟอสโฟอิมพ์ซั่มอัตราส่วนร้อยละ 10 – 40 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดสอบความชื้นเหลวปกติที่ร้อยละ 90 หล่อตัวอย่างขนาด $45 \times 45 \times 250$ มม บ่มตัวอย่างที่อายุ 24, 72, 96 และ 120 วัน จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 40 ขึ้นไป ค่ากำลังอัดสูงสุดอายุ 120 วัน มีค่าที่สูงกว่า 3.50 MPa. เมื่อเทียบกับอิฐดินเหนียวเผา ค่ากำลังที่สูงขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอยที่มีสารประกอบหลักเป็นซิลิกาและอลูมินาทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมินเนตและซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นตัวพัฒนากำลัง ค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 19.2 – 37.2 % ค่าหน่วยน้ำหนักของบล็อกก่อผนังมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอิฐดินเหนียวเผาผลดลงประมาณ 20 – 40% และสัดส่วนปริมาณสารซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 – 40%

ในปี พ.ศ. 2546 จิรฐิติ บรรจงศิริและจักรี ดิยะวงศ์สุวรรณ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนดินที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านดินโดยใช้เทคนิคดินดิบ โดยใช้วัสดุหลักเป็นดินเหนียวและใช้ทรายและแกลบดิบเป็นวัสดุปรับสภาพ ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียว การหาปริมาณน้ำที่

เหมาะสม กำลังอัดของอิฐดินดิบ และการหดตัวของอิฐดินดิบ พบว่า คุณสมบัติของดินเหนียวที่ใช้มีความเป็นพลาสติกสูง อัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 50 – 75 เมื่อใช้ผสมร่วมกับเกล็ดดินดิบและร้อยละ 75 – 125 เมื่อใช้ผสมร่วมกับทรายและเกล็ดดินดิบ และน้ำที่ใช้ผสมไม่ควรเกิดขีดพิคัดความเหลวของดินเหนียว ค่ากำลังอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 4.30 – 6.24 กก/ซม² เมื่อใช้ร่วมกับวัสดุปรับสภาพ และค่าการหดตัวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 2.73 – 7.23 นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การใช้ส่วนผสมในปริมาณที่พอเหมาะช่วยทำให้มีความสามารถในการทำงานได้ เมื่อใช้ร่วมกับวัสดุปรับสภาพสามารถขึ้นรูปและถอดแบบได้ง่าย

ในปี พ.ศ. 2547 ประชุม คำพูน ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอิฐดินดิบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดและกำลังคัต โดยใช้เถ้าลอยร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 โดยน้ำหนักดิน อัตราส่วนต่อเส้นใยฟางข้าว 1:50 โดยปริมาตรของดิน และใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในอัตราส่วนน้ำต่อดิน 1:1 หล่อตัวอย่างขนาด 10 x 15 x 30 ซม. ผึ่งให้แห้งในอากาศ 48 ชั่วโมง ตากตัวอย่างโดยการผึ่งแดดเป็นเวลา 14 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดและกำลังคัตของอิฐดินดิบที่อายุ 14 วันและ 28 วัน มีค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 มีค่ากำลังอัดสูงสุด 1.23 ksc และค่ากำลังคัตสูงสุด 0.94 ksc ที่อายุ 28 วัน จึงทำให้ได้ทราบว่าเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อพัฒนากำลังของอิฐดินดิบได้

ในปี ค.ศ. 2005 X. Ling Ling et al. ทำการศึกษาผลกระทบของอิฐดินเหนียวเผาที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวในปริมาณสูงที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 50, 60, 70 และ 80 โดยใช้เถ้าลอยที่มีความชื้นและคุณภาพต่ำ ทำการเผาอิฐดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1,050 °C โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัว การแตกร้าว และความทนทานต่อสภาวะแช่แข็ง ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยที่ใช้แทนที่ดินเหนียวในปริมาณที่สูง ทำให้ดัชนีความเป็นพลาสติกของส่วนผสมมีค่าที่ลดลงซึ่งแปรผันตามปริมาณเถ้าลอย มีความชื้นเหลวที่พอเหมาะ และช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังสูงขึ้นการดูดซึมน้ำ การหดตัวเชิงปริมาตร การแตกร้าวของอิฐอยู่ในเกณฑ์ต่ำ และมีความทนทานเมื่ออยู่ในภาวะถูกแช่แข็ง

ในปี พ.ศ. 2551 ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ จตุพร ตั้งศิริสกุล ทำการศึกษาผลกระทบของวัสดุการเกษตรที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของอิฐดินดิบ โดยใช้ดินเหนียว 2 ชนิด จากแหล่งที่แตกต่างกันมาผลิตก้อนอิฐ ใช้วัสดุเส้นใยทางการเกษตรผสมลงในส่วนผสมของอิฐดินดิบในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3, 6 และ 9 โดยน้ำหนัก หลังการหล่อขึ้นรูป ตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 7 วัน และอบแห้งหลังการตากแดดเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ จากการศึกษาพบว่า เกล็ดและเส้นใยขุยมะพร้าว สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดและลดการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของดินเหนียวพบว่า ดินเหนียวชนิดที่ 2 มีปริมาณทรายมากกว่าซึ่ง

ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า และการหดตัวต่ำกว่าก้อนอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดที่ 1 และในด้านการนำความร้อนของก้อนอิฐพบว่า การแทนที่ดินเหนียวด้วยเกลบในส่วนผสมของอิฐดินดิบ ทำให้ค่าการนำความร้อนของก้อนอิฐต่ำลงเมื่อเทียบกับก้อนอิฐควบคุม เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมทั้งในด้านคุณสมบัติเชิงกล และการเป็นฉนวนกันความร้อน พบว่าก้อนอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดที่ 2 ซึ่งผสมเกลบร้อยละ 3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 24.9 ksc ค่าการหดตัว เท่ากับร้อยละ 10.5 และค่าการนำความร้อน เท่ากับ 0.70 W/m²K และก้อนอิฐที่ทำจากดินเหนียวชนิดที่ 2 ซึ่งผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 9 มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 29.2 ksc ค่าการหดตัวเท่ากับ ร้อยละ 6.2 และค่าการนำความร้อน เท่ากับ 0.90 W/m²K ผลจากการวิจัยนี้บ่งชี้ได้ว่า การใช้วัสดุทางธรรมชาติเป็นส่วนผสม ส่งผลในการเพิ่มความสามารถในด้านคุณสมบัติเชิงกลและการเป็นฉนวนกันความร้อนของก้อนอิฐดินดิบ

ในปี พ.ศ. 2552 วรินทร์ บัญชาพัฒนศักดิ์และคณะ ได้ทำการศึกษาการใช้กากชีปะ่งซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตยางน้ำข้น มีคุณสมบัติเป็นมวลรวมเบา นำมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างด้วยการผสมกับดินเหนียว เพื่อผลิตเป็นอิฐดินเหนียวน้ำหนักเบา โดยผสมดินเหนียวและกากชีปะ่งในสัดส่วนที่ต่าง ๆ กัน คือ 100:0 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 (w/w) ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม พบว่า พื้นที่ผิวภายนอกของอิฐมีลักษณะขรุขระ มีรูพรุนกระจายทั่วทั้งก้อน มีน้ำหนักเบาลงมากกว่าร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักอิฐดินเหนียวล้วน ค่าความหนาแน่นมีค่าระหว่าง 990 – 1900 กก/ม³ ค่าการหดตัวมีมากขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่ของกากชีปะ่ง มีค่าการหดตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 15 – 27 ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 11 – 34 และค่ากำลังอัดจะแปรผกผันกับปริมาณกากชีปะ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 26 – 35 กก/ซม² ซึ่งถือว่าผลการทดสอบที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการทดสอบอิฐดินเหนียวที่ ASTM C67 กำหนด

ในปี ค.ศ. 2009 G.Cultrone and E.Sebastian ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอิฐดินเหนียว เพื่อศึกษาผลกระทบต่อตัวอย่างอิฐ เช่น สีผิวอิฐดินเหนียว ความคงทนต่อการผุกร่อน และน้ำหนัก โดยใช้เถ้าลอยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 5 ถึง 15 ทำการเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมและนำอิฐไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C และ 1000 °C แบ่งการเผาออกเป็นสองชุดพบว่า สีของเนื้ออิฐมีสีที่ละเอียดกว่าอิฐที่ไม่ผสมเถ้าลอย และยังพบอีกว่าอิฐที่ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กระหว่าง 0.1 ถึง 10 ไมครอน (micron) ทำให้อิฐมีน้ำหนักลดลง มีความทนทาน และการผุกร่อนลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐที่ไม่ใช้เถ้าลอยผสม ดังนั้น เถ้าลอยที่นำมาใช้ผสมมีคุณสมบัติที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐดินเหนียวและยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอิฐให้มีราคาต้นทุนต่ำลง

ในปี ค.ศ. 2009 J.E.Oti et al. ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวอัดก้อน โดยใช้วัสดุหลักคือดินเหนียวใช้วัสดุแทนที่คือ ปูนไลม์ ปูนไลม์ละลายน้ำ และกากตะกอนเตาถลุง แบ่งส่วนผสมออกเป็น 5 อัตราส่วนผสม อัดก้อนตัวอย่างโดยใช้แรงดันไฮดรอลิก บ่มตัวอย่างทดสอบ 7, 28, 56 และ 90 วัน โดยศึกษาถึงกำลัง ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ ร้อยละช่องว่าง หน่วยน้ำหนัก และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสภาวะแช่แข็ง จากการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังอัดเริ่มพัฒนากำลังที่ระยะต้น (0-28 วัน) และเริ่มมีค่าสูงขึ้นที่ระยะปลาย (28-60 วัน) ค่ากำลังอยู่ในช่วง 1.75 – 7.25 MPa ปริมาณความชื้นมีค่าไม่เกิน 17 % ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 17 – 20 % ร้อยละของช่องว่างอยู่ระหว่าง 3-5 % ค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 1790 – 1800 kg/m³ และค่าการสูญเสีย น้ำหนักอยู่ระหว่าง 1.2 – 1.9 % นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใช้ดินเหนียวผสมร่วมกับปูนไลม์ ปูนไลม์ ไฮดรอลิกและการตะกอนเตาถลุง ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (C-S-H gel) เป็นตัวช่วยพัฒนากำลังให้สูงขึ้น

ในปี ค.ศ. 2009 J.E.Oti et al. ได้ศึกษาผลกระทบด้านกำลังอัดของอิฐดินเหนียวอัดก้อน โดยใช้ปูนไลม์และกากตะกอนเตาถลุง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยัดประสาน ซึ่งผสมร่วมกับดินเหนียว ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น ความเป็นผลึกภายในและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน วิเคราะห์โดยใช้เทคนิควิธี SEM, SBD และ EDX วิเคราะห์โครงสร้างภายใน โดยใช้ตัวอย่างอบแห้ง ที่อายุ 28 วัน พบว่า เมื่อวิเคราะห์โดย SEM อนุภาคภายในของดินเหนียวจะถูกล้อมรอบด้วยผลึก แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (C-S-H gel) เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของปูนไลม์ กากตะกอนเตาถลุง และน้ำ กลายเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน และเริ่มเกิดแท่งผลึกเข็ม (Ettringite) ยึดเกาะโดยรอบอนุภาค ดินเหนียว เมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบหลักของตัวอย่าง ทดสอบโดย SBD และ EDX ยังพบอีกว่า ปริมาณสารที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วย แคลไซต์ (CaCO₃) ควอร์ต (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และผลึกของโวลาสโตไนต์ (CaSiO₃) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่มี ช่วยพัฒนากำลังอัดของอิฐดินอัดก้อนในช่วงอายุการบ่มที่สูงขึ้น

ในปี ค.ศ. 2010 J.E.Oti et al. ได้ทำการศึกษาออกแบบและวัดค่าเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐดินเหนียวอัดก้อน โดยใช้วัสดุดินเหนียวผสมร่วมกับปูนไลม์ และกากตะกอนเตาถลุง อัดก้อนตัวอย่างทดสอบด้วยแรงดันไฮดรอลิก แบ่งชุดทดสอบออกเป็น 2 ชุด คือ อิฐดินเหนียวอัดก้อนปกติและอิฐดินเหนียวอัดก้อนที่ผ่านการเผา เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากการทดสอบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 1200 – 1700 kg/m³ และ 1250 – 1750 kg/m³ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.24 – 0.27 W/m²K และ 0.37 – 0.43 W/m²K ของชุดที่อัดก้อนปกติและชุดอัดก้อนที่ผ่านการเผา จากผลการเปรียบเทียบยังพบอีกว่าผลของปริมาณความชื้นภายในอิฐดินเหนียวอัดก้อนมีผลทำให้ค่าการ

ต้านทานความร้อนซึมผ่านได้ต่ำ และผลของการเปลี่ยนเฟสภายในของดินเหนียวทำให้ค่าการซึมผ่านความร้อนของชุดที่ผ่านการเผามีค่าสูงกว่าเนื่องจากถ่ายเทความร้อนได้เร็วกว่า นอกจากนี้ผลของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ ความพรุน มีผลต่อความต้านทานความร้อนให้มีค่าต่ำได้

ในปี พ.ศ. 2555 รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์และเอกรัตน์ รวยรวย ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ด้วยปูนขาวชนิดละลายน้ำผสมเกล็ดลอยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมโดยใช้อัตราส่วนปูนขาวละลายน้ำต่อเกล็ดลอยเท่ากับ 35:65 โดยน้ำหนัก มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อทรายเท่ากับ 1:1 และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปูนดิบร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปูนขาวละลายน้ำผสมเกล็ดลอยเพิ่มขึ้น ค่ากำลังมีค่าสูง และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ค่าการนำความร้อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปูนขาวละลายน้ำผสมเกล็ดลอยเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดมีค่าสูง และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ค่าการนำความร้อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบว่า การลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาวละลายน้ำและเกล็ดลอยเป็นไปอย่างช้า ทำให้มีค่ากำลังอัดต่ำในช่วง 7 – 14 วันแรก แต่หลังจากนั้นมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน ผลที่ได้คือปูนขาวละลายน้ำผสมกับเกล็ดลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยึดประสานที่สามารถทดแทนสารซีเมนต์ได้ดี

2.15 ข้อสรุปจากปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) การใช้ปริมาณวัสดุอัดแทรกหรือสารปอชโซลานที่ใช้แทนที่ดินเหนียวควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10-80 โดยน้ำหนัก และวัสดุผสมเพิ่มช่วยยึดประสานแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวไฮดรอลิกควรอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 60 โดยน้ำหนัก
- 2) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ผสมอิฐดินเหนียวมวลเบาจะส่งผลโดยตรงต่อความชื้นเหลวและความสามารถทำงานได้ ถ้าใช้วัสดุอัดแทรกผสมรวมควรใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียวที่ร้อยละ 50 – 45 โดยน้ำหนัก หรือใช้ไม่เกินขีดพิักัดเหลวของดินเหนียว
- 3) กำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบามีค่าที่แปรผกผันกับปริมาณวัสดุอัดแทรกและวัสดุผสมเพิ่ม
- 4) กำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบามีค่าที่แปรผกผันกับลำดับอายุการบ่มและความหนาแน่น

5) ปริมาณการแทนที่ของสารปอชโซลานและวัสดุประสานผสมเพิ่มที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่สูง การหดตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นต่ำ และช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ

6) ความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวมวลเบาเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับความพรุนหรือสารเพิ่มฟองที่เติมเข้าไป และวัสดุอัดแทรกในส่วนผสม

7) การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแปรผกผันกับปริมาณวัสดุอัดแทรก วัสดุผสมเพิ่มและลำดับอายุการบ่ม

8) ค่าการซึมผ่านน้ำและค่าการนำความร้อนของอิฐดินเหนียวจะแปรผกผันกับปริมาณวัสดุอัดแทรก วัสดุผสมเพิ่มและความพรุน

2.16 กรอบแนวคิดงานวิจัย

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้แนวทางในการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา โดยใช้หลักการแทนที่โดยปริมาตรในการกำหนดและออกแบบส่วนผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุดินเหนียวด้านเกวียนที่ผ่านการบดละเอียดนำมาผสมกับเถ้าลอยและวัสดุผสมเพิ่ม โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวในอัตราส่วน 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักของดินเหนียว ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วน 5%, 10%, 15% และ 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว เป็นวัสดุช่วยประสานในส่วนผสม กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียวที่เหมาะสมเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนักดินเหนียว และใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผสมเข้าไปในส่วนผสมเพื่อช่วยให้อิฐดินเหนียวน้ำหนักเบา บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องทดลองโดยใช้พลาสติกใสคลุมให้มิดชิด จนได้อายุทดสอบที่ 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก การหดตัวเชิงปริมาตรรวม ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ และทดสอบการนำความร้อน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของวัสดุ คือ ดินเหนียวดานเกวียน, วัสดุปอชโซลาน (เถ้าลอย) และวัสดุผสมเพิ่ม (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2))

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเหนียวมวลเบา เช่น คุณสมบัติด้านกำลังอัด

ส่วนที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวมวลเบา เช่น ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม, การดูดซึมน้ำ, การซึมผ่านของน้ำ และการนำความร้อน

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

- 1) ดินเหนียวตากแห้งนำมาบดให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เป็นดินเหนียวจากแหล่งดินเหนียวตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา
- 2) เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 3) วัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หรือปูนขาวชนิดละลายน้ำ (Hydrate Lime) GRADE A จากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งใน จ.สระบุรี
- 4) สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent) สูตร SUT 1 เป็นสารชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ ใช้ผสมในสัดส่วนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์เจือจางน้ำในอัตราส่วน 1 : 40
- 5) น้ำประปาสำหรับใช้ผสม

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

- 1) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

- 2) เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Laser Particle Size Analyzer
- 4) ชุดทดสอบหาคูณสมบัติพื้นฐานของอนุภาคเม็ดดิน (Sieve Analysis Apparatus)
- 5) ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักของดินเหนียวบดละเอียดและวัสดุ

ปอชโซลาน

- 6) เครื่องทดสอบกำลังอัดอ่านค่าแบบตัวเลข (Universal Testing Machine 500 Ton)
- 7) เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Bossen Water Permeability Testing)
- 8) เครื่องทดสอบการนำความร้อน (Thermal Conductivity Testing)
- 9) แบบเหล็กมาตรฐานสำหรับหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 215 มม x 103 มม x 65 มม
- 10) แบบหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบการนำความร้อนอย่างรูปทรงกระบอก

ขนาด $\varnothing$ 50 x 100 มม

- 11) แบบหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบการซึมผ่านของน้ำรูปทรงกระบอกบาง

ขนาด $\varnothing$ 100 x 50 มม

- 12) ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM
- 13) เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม
- 14) เครื่องมือวัดความยาวเวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดได้ละเอียด 0.05 มม
- 15) เครื่องบดวัสดุอนุภาคเม็ดหยาบ (Crushing Machine)
- 16) เครื่องบดวัสดุอนุภาคเม็ดละเอียด (Fine Machine)
- 17) ตู้อบปรับอุณหภูมิ 105 °C - 110 °C
- 18) ปัมลม ขนาดแรงดัน 6 บาร์
- 19) เครื่องกำเนิดโฟมเหลว (Foaming Generator)
- 20) เครื่องผสมคอนกรีต (Mixing Machine)



รูปที่ 3.1 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาดมาตรฐาน 215 x 103 x 65 มม



รูปที่ 3.2 เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องกำเนิดโฟมเหลว (Foaming generator) และปั๊มลม



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำและชุดทดสอบการนำความร้อน

3.3 การเตรียมวัสดุดินเหนียวและหล่อก้อนตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบ

3.3.1 การเตรียมวัสดุดินเหนียว

- 1) นำดินเหนียวจากกองเก็บไปตากให้เมล็ดดินแห้งโดยการพิ้งแดดไล่ความชื้น เป็นเวลาประมาณ 2 วัน ถ้าก้อนดินเหนียวมีขนาดใหญ่ใช้ก้อนยางทุบให้มีขนาดเล็กลง
- 2) หรือนำดินเหนียวที่มีความชื้นไปไล่ความชื้นให้แห้งโดยใช้ความร้อน ด้วยการอบในตู้อบ (Oven) อบที่อุณหภูมิ 105-115 °C เป็นเวลา 1 วัน ก่อนการนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ และเครื่องบดละเอียด
- 3) นำดินเหนียวที่ผ่านการตากแห้งหรือผ่านการอบแห้ง ไปบดให้เมล็ดดินมีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดหยาบ (Crusher Machine) และตามด้วยการบดส่วนหยาบด้วยเครื่องบดละเอียด (Fine Machine) ตามลำดับ
- 4) เม็ดดินที่บดละเอียดผ่านเครื่องบดละเอียด (Fine Machine) ให้นำมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อคัดสิ่งแปลกปลอมออกจากเม็ดดินในส่วนที่บดละเอียด
- 5) นำดินเหนียวในส่วนที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ไปใช้งาน โดยบรรจุเก็บไว้ในถังภาชนะที่ป้องกันความชื้นให้มิดชิด

3.3.2 การผสมส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบาสำหรับหล่อก้อนตัวอย่าง

- 1) จัดเตรียมส่วนผสมสำหรับก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบา เช่น ดินเหนียวบดละเอียด เถ้าลอย แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีผสมชนิดเพิ่มฟองอากาศ ทำการตวงซึ่งส่วนผสมตามตารางที่ 3.1
- 2) เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับผสมอิฐดินเหนียวมวลเบา ประกอบด้วยเครื่องผสมคอนกรีตแบบใบพัดแบบเกลียว ส่วนมือติดหัวเกลียวสำหรับปั่นส่วนผสม (ใช้ในกรณีที่ส่วนผสมยังไม่เข้ากันดี) ปั่นลมและเครื่องกำเนิดโฟมเหลว เจือจางสารเคมีผสมเพิ่ม สูตร SUT 1 กับน้ำในอัตราส่วน 1 : 40 โดยน้ำหนัก ใส่สารเพิ่มฟองเจือจางน้ำลงในเครื่องกำเนิดโฟมเหลว ในปริมาณที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้งตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบไว้
- 3) ใส่ดินเหนียวบดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงในเครื่องผสม แล้วเปิดเครื่องผสมให้ส่วนผสมทั้งหมดคลุกเคล้ากันดีจนเป็นสีเดียวกัน
- 4) เมื่อส่วนผสมที่ได้เข้ากันดีแล้ว ใส่ปริมาณน้ำที่ได้เตรียมไว้ลงไปเครื่องผสมในช่วงระหว่างเติมน้ำลงไปในส่วนผสมให้เดินเครื่องผสมตามปกติ เพื่อให้ใบพัดตีส่วนผสมกับน้ำที่เติมลงไปให้เข้ากันดี

5) เมื่อน้ำกับส่วนผสมเข้ากันดีและเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการฉีดโฟมเหลวลงไป โดยระหว่างการฉีดโฟมเหลวก็เดินเครื่องตามปกติ

6) เมื่อส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบากับโฟมเหลวคลุกเคล้ากันดีจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงทำการหยุดเดินเครื่องผสม การผสมในแต่ละครั้งไม่ควรใช้เวลาเกิน 5 นาที แต่ถ้าผสมเกินเวลา ก็อาจจะทำให้ฟองอากาศที่อยู่ในส่วนผสมแตกตัวได้ นำส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบาเทลงในแบบหล่อขึ้นรูป ทั้งไว้ประมาณ 24 – 48 ชั่วโมง

7) เมื่อครบเวลากำหนดถอดแบบ ทำการถอดแบบหล่อ นำตัวอย่างไปทำการบ่มก่อนตัวอย่าง โดยทำการบ่มอากาศภายใต้อุณหภูมิห้องทดลอง ใช้พลาสติกใสคลุมให้มีชื้นและทดสอบก่อนตัวอย่างตามอายุการบ่มในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.4 วัสดุที่ใช้ทำวิจัย ดินเหนียวบด เถ้าลอย แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีผสมเพิ่ม

3.4 สัญลักษณ์แสดงสัดส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบา

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ของส่วนผสมต่างๆ ของงานวิจัยไว้ดังนี้

$$\underline{AA} \text{ DCL } \underline{BB} \text{ FA} + \underline{XX} \text{ CH } \underline{E} \quad (3.1)$$

เมื่อ	AA	หมายถึง	ร้อยละของวัสดุดินเหนียวที่ใช้ผสมโดยน้ำหนัก
	BB	หมายถึง	แทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยโดยน้ำหนักดินเหนียว

DCL	หมายถึง	ดินเหนียวคานาเกวียนบดละเอียด
FA	หมายถึง	เถ้าลอยแม่เมาะ
F	หมายถึง	สารเคมีผสมเพิ่มชนิดเพิ่มฟองอากาศ
CH	หมายถึง	วัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์
XX	หมายถึง	ร้อยละของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ผสมโดยน้ำหนักดินเหนียว

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น 80DCL20FA+10CHF หมายถึง ใช้ดินเหนียวบดละเอียดร้อยละ 80 แทนที่ดินเหนียวบดละเอียดด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและผสมสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ

สัญลักษณ์สำหรับอัตราส่วนผสมของอิฐดินเหนียวมวลเบา จะถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ของแต่ละอัตราส่วนผสม

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (kg/m ³)					w/cl
		Binder			Foaming Agent	Water	
		DCL	FA	CH			
M-1	100DCL-Control	1301.0(100%)	-	-	-	845.7	0.65
M-2	100DCL+5CH-Cont.	1301.0(100%)	-	65.0 (5%)	-	845.7	0.65
M-3	100DCL0FA+5CHF	1301.0(100%)	-	65.0 (5%)	0.33	845.7	0.65
M-4	90DCL10FA+5CHF	1170.9 (90%)	129.9 (10%)	65.0 (5%)	0.33	845.5	0.65
M-5	80DCL20FA+5CHF	1040.8 (80%)	259.8 (20%)	65.0 (5%)	0.33	845.4	0.65
M-6	70DCL30FA+5CHF	910.7 (70%)	389.7 (30%)	65.0 (5%)	0.33	845.3	0.65
M-7	60DCL40FA+5CHF	780.6 (60%)	519.6 (40%)	65.0 (5%)	0.33	845.3	0.65
M-8	100DCL+10CH-Cont.	1301.0(100%)	-	130 (10%)	-	845.7	0.65
M-9	100DCL0FA+10CHF	1301.0(100%)	-	130 (10%)	0.65	845.7	0.65
M-10	90DCL10FA+10CHF	1170.9 (90%)	129.9 (10%)	130 (10%)	0.65	845.5	0.65
M-11	80DCL20FA+10CHF	1040.8 (80%)	259.8 (20%)	130 (10%)	0.65	845.4	0.65
M-12	70DCL30FA+10CHF	910.7 (70%)	389.7 (30%)	130 (10%)	0.65	845.3	0.65
M-13	60DCL40FA+10CHF	780.6 (60%)	519.6 (40%)	130 (10%)	0.65	845.3	0.65

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ของแต่ละอัตราส่วนผสม (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (kg/m ³)					w/cl
		Binder			Foaming Agent	Water	
		DCL	FA	CH			
M-14	100DCL+15CH-Cont.	1301.0(100%)	-	195 (15%)	-	845.7	0.65
M-15	100DCL0FA+15CHF	1301.0(100%)	-	195 (15%)	0.98	845.7	0.65
M-16	90DCL10FA+15CHF	1170.9 (90%)	129.9 (10%)	195 (15%)	0.98	845.5	0.65
M-17	80DCL20FA+15CHF	1040.8 (80%)	259.8 (20%)	195 (15%)	0.98	845.4	0.65
M-18	70DCL30FA+15CHF	910.7 (70%)	389.7 (30%)	195 (15%)	0.98	845.3	0.65
M-19	60DCL40FA+15CHF	780.6 (60%)	519.6 (40%)	195 (15%)	0.98	845.3	0.65
M-20	100DCL+20CH-Cont.	1301.0(100%)	-	260 (20%)	-	845.7	0.65
M-21	100DCL0FA+20CHF	1301.0(100%)	-	260 (20%)	1.30	845.7	0.65
M-22	90DCL10FA+20CHF	1170.9 (90%)	129.9 (10%)	260 (20%)	1.30	845.5	0.65
M-23	80DCL20FA+20CHF	1040.8 (80%)	259.8 (20%)	260 (20%)	1.30	845.4	0.65
M-24	70DCL30FA+20CHF	910.7 (70%)	389.7 (30%)	260 (20%)	1.30	845.3	0.65
M-25	60DCL40FA+20CHF	780.6 (60%)	519.6 (40%)	260 (20%)	1.30	845.3	0.65

หมายเหตุ : Cont. = Control mix, DCL = Dan kwian clay, FA = Fly ash, CH = Calcium hydroxide หรือ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, w / cl = water-to-clay ratio

3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดินเหนียวและวัสดุโปชโซลาน

3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดินเหนียว

การทดสอบหาขนาดผลของอนุภาคเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน

การทดสอบหาขนาดผลของอนุภาคเม็ดดินจากกองเก็บตัวอย่างก่อนการนำไปบดละเอียด ทำการทดสอบหาขนาดผลของอนุภาคเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis) เป็นตัวคั่นขนาดของอนุภาคเม็ดดินที่ข้างบนตะแกรงมาตรฐาน หากความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ค้ำสะสมของเม็ดดินเทียบกับขนาดของรูเปิดตะแกรงมาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422 (2007)

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ทำการทดสอบโดยใช้ขวดทดลองมาตรฐาน (Volume Flask) 500 ml ตามมาตรฐาน ASTM D 854 (2010) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเม็ดดินต่อค่าความหนาแน่นของน้ำ

การทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว, ขีดจำกัดพลาสติก และดัชนีความเป็นพลาสติก

การทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติกและดัชนีความเป็นพลาสติกของเม็ดดินทำการทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบแบบพิกัดอัติเตอร์เบิร์ก (Atterberg Limit) ซึ่งใช้ค่าความชื้นเหลวของเม็ดดินเป็นตัวบอกสถานะต่างๆ ของอนุภาคเม็ดดินตามมาตรฐาน D 4318 (2010)

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวแห้งบดละเอียด

การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวแห้งผ่านการบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ทดสอบโดยใช้ถังโลหะทรงกระบอกขนาด 3L และเหล็กกระทุ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C29 / C29M (2007) แบ่งการกระทุ้งแน่นให้เป็น 3 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุที่กระทุ้งแน่นต่อปริมาตรของถังโลหะทรงกระบอก โดยปริมาตรของถังเหล็กทรงกระบอกหาได้จากการแทนที่น้ำในถังโลหะทรงกระบอกเทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่ 4 °C เท่ากับ 1000 kg/m³

3.5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทดสอบโดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2009) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น โดยปริมาตรของ เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด



รูปที่ 3.5 ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask)

การทดสอบความละเอียด

โดยทดสอบหาค่าความละเอียดของ เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยวิธีของเบลน (Blaine method) เพื่อพิจารณาค่าความละเอียดสัมพัทธ์ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ (เป็นค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดมีหน่วยเป็น $\text{cm}^2/\text{กรัม}$) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 (2011)



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness)

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทดสอบโดยใช้ถังโลหะทรงกระบอกขนาด 3L และเหล็กกระทุ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C29 / C29M (2007) แบ่งการกระทุ้งแน่นให้เป็น 3 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุที่กระทุ้งแน่นต่อปริมาตรของถังโลหะทรงกระบอก โดยปริมาตรของถังเหล็กทรงกระบอกหาได้จากการแทนที่น้ำในถังโลหะทรงกระบอกเทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่ 4°C เท่ากับ 1000 kg/m^3

การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของอนุภาคของดินเหนียวบดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และขนาดคละของวัสดุ (Fill Effect) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analysis)

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย โดยการนำผงตัวอย่างมาบดในครกบดสาร เพื่อให้ตัวอย่างเป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้ฟู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเทคนิคของเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence Analysis (XRF))

การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อทราบลักษณะ โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียว บดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทองเหลือง ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้าไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติด แผ่นกาวเป็นแผ่นบางๆ จากนั้นไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกเหลือเพียงชั้น เดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำ หลังจากนั้นนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูง (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของอิฐดินเหนียวมวลเบา

3.6.1 การทดสอบหาค่ากำลังอัด

การทดสอบหาค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวควบคุมและอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้า ลอย แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีผสมเพิ่ม โดยการหล่อก้อนตัวอย่างเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม ตัน ขนาด 215 มม x 103 มม x 65 มม อ้างอิงตามมาตรฐาน BS 3921 (2003) ทำการทดสอบกำลัง รับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ตำแหน่งด้านแบนราบ (Flat-wise) ด้านแนวขวาง (Edge-wise) และ ด้านแนวยาว (Length-wise) โดยวิธี Bearing Plate จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ด้าน ที่อายุการ บ่ม 7, 28 และ 60 วัน ใช้ก้อนตัวอย่างในการทดสอบไม่น้อยกว่า 6 ก้อนตัวอย่างต่ออายุการบ่ม การ ทดสอบกำลังอัดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C67 (2011) คำนวณได้จากสมการที่ 3.2 (สิทธิชัย, 2540)

$$f = P / A \quad (3.2)$$

เมื่อ	f	=	กำลังอัดสูงสุด (kg / cm ² หรือ ksc)
	P	=	แรงกด (kgf)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบด้านที่รับแรงกด (cm ²)

3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐดินเหนียวมวลเบา

3.7.1 การทดสอบการหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรแบบขึ้นและแบบแห้ง

การทดสอบเพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรรวมของอิฐดินเหนียวมวลเบา ทดสอบโดยการวัดขนาดความกว้าง ความยาว ความหนาและปริมาตรของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ใช้ตัวอย่างในการทดสอบไม่น้อยกว่า 3 ก้อนตัวอย่างต่ออายุการบ่ม ค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรทั้งแบบขึ้นและแบบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ 3.3 (วรินทร์, 2552)

$$T.S.V. = [(V_M - V_F) / V_M] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ	T.S.V	=	ร้อยละของการหดตัวรวมเชิงปริมาตร
	V_M	=	ปริมาตรเดิมของก้อนตัวอย่างเทียบกับขนาดแบบหล่อมาตรฐาน
	V_F	=	ปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่หดตัวในสภาพขึ้นและแห้ง

3.7.2 การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

การทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมน้ำของตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบาแห้ง ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ใช้ตัวอย่างในการทดสอบไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง นำก้อนตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอบแห้งที่อุณหภูมิ 110±5 °C ไปแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือ 1 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซึมน้ำคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 ตามมาตรฐาน ASTM C67 (2011) โดยเป็นค่าเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อน

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = [(W_{\text{sat}} - W_{\text{dry}}) / (W_{\text{dry}})] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ	$W.A$	=	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
	W_{dry}	=	น้ำหนักก้อนตัวอย่างอบแห้งก่อนการแช่น้ำ (kg)

$$W_{\text{sat}} = \text{น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (kg)}$$

3.7.3 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบา ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน โดยการนำก้อนตัวอย่างขนาดมาตรฐาน ขนาด $215 \times 103 \times 65$ มม จำนวน 3 ก้อนตัวอย่าง เข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตร ซึ่งหน่วยน้ำหนักคืออัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็น kg/m^3 การทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C138/138M (2012)

3.7.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของตัวอย่างอิฐดินเหนียวควมและอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ผสมเกล็ดลอย แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีผสมเพิ่ม โดยคัดเลือกตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการทดสอบการดูดซึมน้ำมาทำการทดสอบ ยกเว้นตัวอย่างที่เปื่อยยุ่ยจากการทดสอบ โดยใช้อัตราของแรงดันน้ำเท่ากับ 0.3 – 0.5 เมกะปาสกาล (MPa) หรือ 3 - 5 บาร์ (Bar) (ตามคำแนะนำของ Anand, K.B, et al. (2003)) ปรับแรงดันน้ำให้เหมาะสมตามสภาพตัวอย่างเตรียมตัวอย่างที่ใช้ทดสอบโดยหล่อเป็นแผ่นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม x 50 มม อายุการบ่มที่ 28 และ 60 วัน หลังจากได้อายุการบ่มครบกำหนด ผึ่งก้อนตัวอย่างให้แห้งและนำก้อนตัวอย่างไปหล่อเข้ากับเรซิน ชนิดแข็งหล่อกับที่ ให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 มม (เมื่อรวมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง) ใช้ตัวอย่างในการทดสอบไม่น้อยกว่า 2 ตัวอย่าง ในส่วนของการทดสอบจะอาศัยหลักการให้น้ำไหลผ่านก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวด้วยแรงดันน้ำคงที่อย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณน้ำสะสมที่ไหลซึมผ่านก้อนตัวอย่าง เมื่ออัตราการไหลของน้ำซึมผ่านก้อนตัวอย่าง (กราฟเป็นเส้นตรง) นำค่าความชันซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลของน้ำ มาแทนในสมการการไหลผ่านของดาร์ซี (Darcy) (สมการ 3.5) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (รัฐพล, 2554)

$$k = (r \times L \times g \times P) / (P \times A) \quad (3.5)$$

โดยที่	k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านตัวอย่างทดสอบ (m/s)
	r	=	ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
	g	=	ค่าคงที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

Q	=	ค่าอัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)
L	=	ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)
P	=	แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ N/m^2 หรือ ($\text{kg/m}^2/\text{s}^2$)
A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ (m^2)

3.7.5 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity ใช้สัญลักษณ์ k หรือ λ) คือ คุณสมบัติภายในของวัสดุอย่างหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ การนำความร้อน (heat conductivity) เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัสดุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัสดุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางปราศจากการเคลื่อนที่

การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ คล้ายกับการนำไฟฟ้าในของเหลวและของแข็งที่เกิดการสั่นของโมเลกุลข้างเคียงในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโมเลกุล กล่าวคือ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน วัสดุใดจะนำความร้อนได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาทำได้โดยการหล่อหรือเจาะเอาจากก้อนตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม ความยาว 100 มม ผิวหน้าสัมผัสเรียบทั้งสองด้าน มีอายุการบ่ม 28 วัน และ 60 วัน จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน โดยให้ความร้อน (Q) ด้วยการจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนบนผิวสัมผัสด้านหนึ่งที่มีอุณหภูมิมากกว่า 50°C และด้านผิวสัมผัสอีกด้านที่อยู่ตรงกันข้ามจะถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำการวัดค่าอุณหภูมิทั้งสองจุด โดยใช้เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิแบบ Data logger ค่าความละเอียด 0.5°C ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดที่วัดคือ ΔT นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 3.6 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 (2004)

$$k = (Q \times L) / (A \times \Delta T) \quad (3.6)$$

เมื่อ	k	=	Thermal conductivity ($\text{W/m}^\circ\text{K}$ หรือ $\text{W/m}^\circ\text{C}$)
	Q	=	ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ (Watt หรือ W)

$$\begin{aligned}
 L &= \text{ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)} \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดขวาง (m}^2\text{)} \\
 \Delta T &= \text{ผลต่างระหว่างจุดที่วัดอุณหภูมิ (°K หรือ °C)}
 \end{aligned}$$

3.8 สรุปจำนวนของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.8.1 ก่อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่ากำลังอัด, ดูดซึมน้ำ, หน่วงน้ำหนัก, หดตัวแบบชื้นและแบบแห้ง, การซึมผ่านของน้ำ และการนำความร้อน ของอิฐดินเหนียวมวลเบา

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน

Mix No.	Symbol	Specimen Description (ก่อนตัวอย่าง)				Total
		Compressive Strength	Absorption Density Shrinkage	Permeability	Thermal Conductivity	
M-1	100DCL-Control	12	9	4	4	27
M-2	100DCL+5CH-Cont.	12	9	4	4	27
M-3	100DCL0FA+5CHE	12	9	4	4	27
M-4	90DCL10FA+5CHE	12	9	4	4	27
M-5	80DCL20FA+5CHE	12	9	4	4	27
M-6	70DCL30FA+5CHE	12	9	4	4	27
M-7	60DCL40FA+5CHE	12	9	4	4	27
M-8	100DCL+10CH-Cont.	12	9	4	4	27
M-9	100DCL0FA+10CHE	12	9	4	4	27
M-10	90DCL10FA+10CHE	12	9	4	4	27
M-11	80DCL20FA+10CHE	12	9	4	4	27
M-12	70DCL30FA+10CHE	12	9	4	4	27
M-13	60DCL40FA+10CHE	12	9	4	4	27
M-14	100DCL+15CH-Cont.	12	9	4	4	27

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติทาง
วิศวกรรม ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Specimen Description (ก้อนตัวอย่าง)				Total
		Compressive Strength	Absorption Density Shrinkage	Permeability	Thermal Conductivity	
M-15	100DCL0FA+15CHE	12	9	4	4	27
M-16	90DCL10FA+15CHE	12	9	4	4	27
M-17	80DCL20FA+15CHE	12	9	4	4	27
M-18	70DCL30FA+15CHE	12	9	4	4	27
M-19	60DCL40FA+15CHE	12	9	4	4	27
M-20	100DCL+20CH-Cont.	12	9	4	4	27
M-21	100DCL0FA+20CHE	12	9	4	4	27
M-22	90DCL10FA+20CHE	12	9	4	4	27
M-23	80DCL20FA+20CHE	12	9	4	4	27
M-24	70DCL30FA+20CHE	12	9	4	4	27
M-25	60DCL40FA+20CHE	12	9	4	4	27
Total		300	225	100	100	725

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

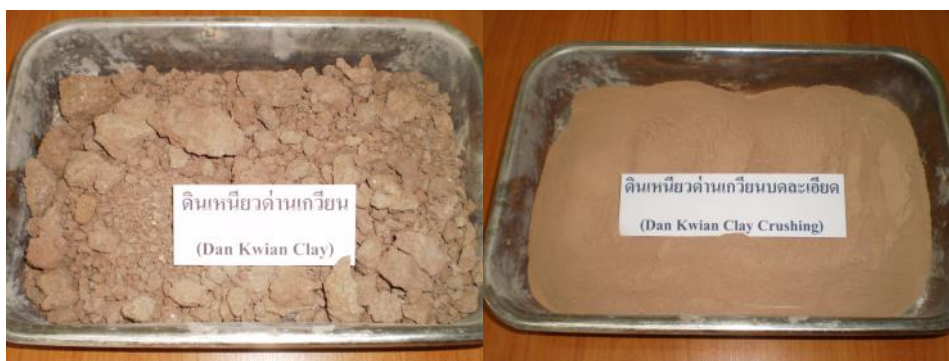
4.1 บทนำ

อิฐดินเหนียวมวลเบาในงานวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุดินเหนียวด้านเกวียนที่ผ่านการบดละเอียดนำมาผสมกับเถ้าลอยและวัสดุผสมเพิ่ม โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวในอัตราส่วน 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักของดินเหนียว ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วน 5%, 10%, 15% และ 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว เป็นวัสดุช่วยประสานในส่วนผสม กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียวที่เหมาะสมเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนักดินเหนียว และใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผสมเข้าไปในส่วนผสมเพื่อช่วยให้อิฐดินเหนียวมีน้ำหนักเบา บ่มตัวอย่างให้ได้อายุทดสอบที่ 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก การหดตัวเชิงปริมาตรรวม ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ และทดสอบการนำความร้อน ดังนี้

4.2 ลักษณะทางกายภาพวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

4.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด้านเกวียน

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด้านเกวียน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ผลการทดสอบของดินเหนียวด้านเกวียน มีค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.81 ค่าขีดพิกต์เหลว (Liquid Limit, LL) มีค่าเท่ากับร้อยละ 66.21 ค่าขีดพิกต์พลาสติก (Plastic Limit, PL) มีค่าเท่ากับร้อยละ 39.22 และค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic Index, PI) มีค่าเท่ากับร้อยละ 26.99 เมื่อทำการจำแนกประเภทของดินเหนียวด้านเกวียนตามวิธีจำแนกของระบบเอกภาพ (USCS) จัดเป็นดินเหนียวประเภทดินตะกอนที่มีความเป็นพลาสติกสูง ในกลุ่ม MH ลักษณะของเม็ดดินมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะอนุภาคของเม็ดดินตามธรรมชาติและผ่านการบดละเอียด

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด่านเกวียน

Physical Properties	Classification	Atterberg Limit			Specific
	USCS	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Gravity
Dan Kwian Clay (DCL)	MH	66.21	39.22	26.99	2.81

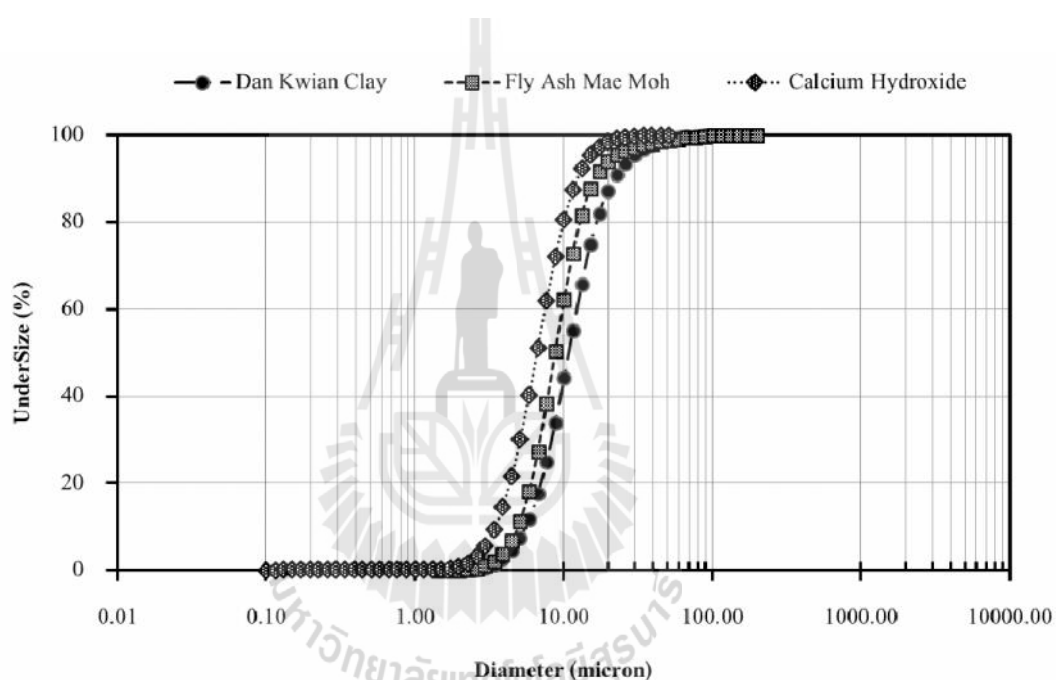
4.2.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด่านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอย และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดินเหนียวด่านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอย และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ดินเหนียวด่านเกวียนบดละเอียด มีค่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักที่สูงกว่าเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.81 2.34 และ 2.02 ตามลำดับ และค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1301.4 kg/m^3 1299.6 kg/m^3 และ 495.2 kg/m^3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำสุด

จากผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Laser Particle Size และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ดินเหนียวด่านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าอนุภาคเฉลี่ย (Median Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 10.88 8.80 และ 6.63 micron (ไมครอน) ตามลำดับ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ $4310 \text{ cm}^2/\text{g}$ และ $5747 \text{ cm}^2/\text{g}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน และลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินเหนียวด่านเกวียนบดละเอียด เถ้าลอย และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 4.2 มีลักษณะการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะ

Physical Properties	Dan Kwian Clay (DCL)	Fly Ash (FA)	Calcium Hydroxide (CH)
Specific Gravity (sp.gr)	2.81	2.34	2.02
Dry Unit Weight (kg/m ³)	1301.4	1299.6	495.2
Mean Particle Size (micron)	10.88	8.80	6.63
Blaine Fineness (cm ² /g)	-	4310	5747



รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด ถ้าวลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด ถ้าวลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด ถ้าวลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C618 (2008) ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์ พบว่า

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดินเหนียวบดละเอียด เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

Chemical Composition (%)	Dan Kwian Clay (DCL)	Fly Ash (FA)	Calcium Hydroxide (CH)
Silicon Dioxide (SiO_2)	51.34	35.75	4.18
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	23.37	18.88	1.07
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	5.38	11.43	0.13
Calcium Oxide (CaO)	0.16	14.38	88.15
Magnesium Oxide (MgO)	3.82	6.03	6.32
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.01	4.22	0.14
Loss On Ignition (LOI)	8.42	1.79	6.93
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	80.09	66.06	5.38

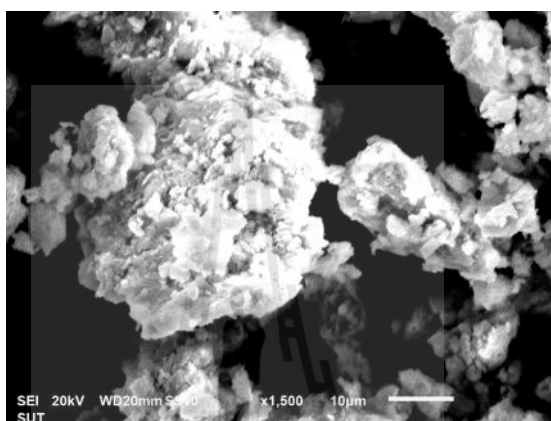
4.3.1 ดินเหนียวด้านเหนียวบดละเอียด มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2 = 53.34\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 = 23.37\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5.38\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 80.09\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 8.42% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ดินเหนียวด้านเหนียวที่ยังไม่ผ่านการเผา จัดเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ Class N

4.3.2 เถ้าลอย มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2 = 35.75\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18.88\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 11.43\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 66.06\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 1.79% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยจัดเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ Class C

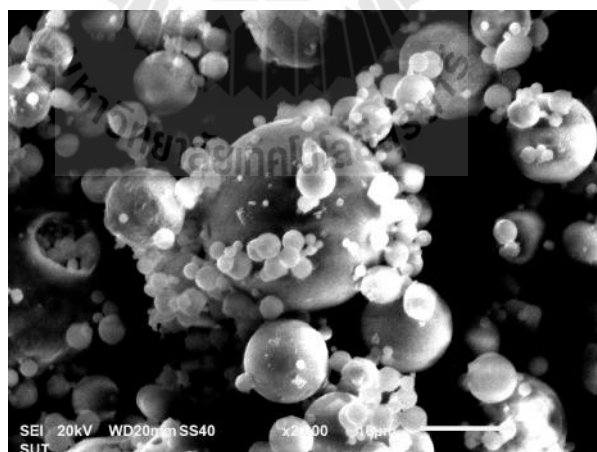
4.3.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2 = 4.18\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.07\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.13\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 5.38\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 6.93% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ แต่จัดเป็นวัสดุสังเคราะห์จำพวกวัสดุช่วยยึดประสาน ที่มี CaO ในปริมาณสูง

4.4 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด ถั่วลันเตา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

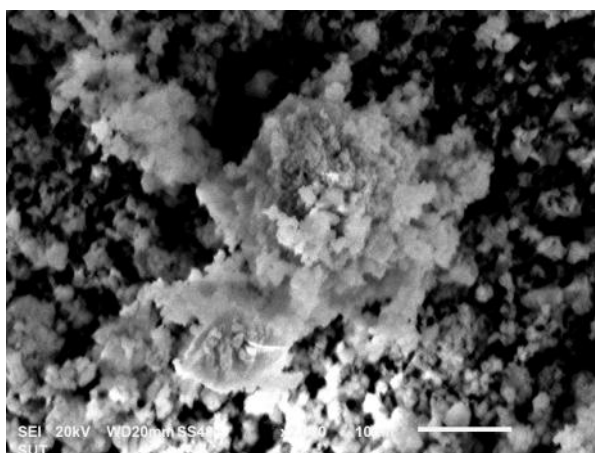
จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุวิจัย อันได้แก่ ดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด ถั่วลันเตา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูป 4.3 – 4.5



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยาย 1500 เท่า ของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายขยาย 2000 เท่า ของถั่วลันเตาแม่เกาะ



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายขยาย 2000 เท่า ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ดินเหนียวด้านเหนียวบดละเอียด มีลักษณะอนุภาคเป็นผลึกแผ่นเปลือกบาง ซ้อนเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม พื้นที่ผิวมากและมีความพรุน จากรูปที่ 4.4 พบว่า เถ้าลอย มีรูปร่างลักษณะอนุภาคที่กลมมน ผิวภายนอกเรียบเสมอ เนื้อภายในแน่น การกระจายตัวของอนุภาคมีอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.5 พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นผลึกเล็กๆ คล้ายก้อนสำลีและปุยนุ่ม จับเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีทั้งกลุ่มเล็กและกลุ่มใหญ่ ขนาดอนุภาคมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ

4.5 ลักษณะทางกายภาพของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบาหลังการหล่อขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลสำรวจเชิงกายภาพพื้นผิวภายนอกของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศช่วยเพิ่มความพรุนภายใน พบว่า สีพื้นผิวภายนอกมีสีที่เปลี่ยนไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยในดินเหนียวและผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผสมที่มีดินเหนียวปริมาณสูงมีสีผิวออกสีน้ำตาลเข้มแกมแดง และส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณสัดส่วนที่สูงขึ้น สีผิวของก้อนตัวอย่างมีสีผิวออกไปทางสีเทาแก่ไปจนถึงสีเทาอ่อน และยังพบอีกว่า สีผิวที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการผสม นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวและผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะพื้นผิวภายนอกโดยรวมมีลักษณะผิวของก้อนตัวอย่างเรียบเสมอกัน รูพรุน รอยแตกร้าวและการหดตัวที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างมีขนาดลดลง และจากการผสมโพลีเมอร์เหลวที่ได้จากสารเคมีผสมเพิ่มยังทำให้น้ำหนักมวลของก้อนตัวอย่างมี

แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมออลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการพัฒนากำลัง โดยกำลังอัดที่อายุการบ่ม 60 วัน ของอัตราส่วนผสมจะอยู่ที่ 60DCL40FA+5CHE, 60DCL40FA+10CHE, 60DCL40FA+15CHE และ 60DCL40FA+20CHE มีค่าเท่ากับ 17.16, 21.99, 24.43 และ 25.98 ksc ตามลำดับ และค่ากำลังอัดสูงสุดในอัตราส่วนควบคุมที่อายุ 60 วัน คือ 100DCL+20CH-Cont. เท่ากับ 19.72 ksc การแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 20 (60DCL40FA+20CHE) มีค่ากำลังอัดที่ดีกว่าอัตราส่วนผสมที่แทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5, 10 และ 15 คือ 3.84 ksc, 13.10 ksc และ 25.98 ksc ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน โดยคิดเป็น 82%, 84% และ 132% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมควบคุมของชุดดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวควบคุม

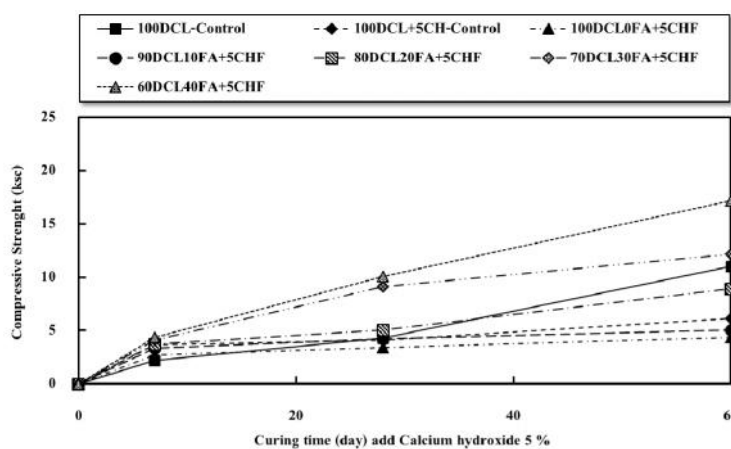
Mix No	สัญลักษณ์	กำลังอัด, กก/ซม ² (ร้อยละเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม)		
		7 วัน	28 วัน	60 วัน
M-1	100DCL-Control	2.21 (100)	4.28 (100)	11.01 (100)
M-2	100DCL+5CH-Cont.	3.66 (165)	4.10 (96)	6.12 (56)
M-3	100DCL0FA+5CHE	2.69 (73)	3.40 (83)	4.33 (71)
M-4	90DCL10FA+5CHE	3.35 (92)	4.21 (103)	5.08 (83)
M-5	80DCL20FA+5CHE	3.74 (102)	5.04 (123)	8.91 (146)
M-6	70DCL30FA+5CHE	4.11 (112)	9.10 (222)	12.15 (198)
M-7	60DCL40FA+5CHE	4.33 (118)	10.03 (245)	17.16 (280)
M-8	100DCL+10CH-Cont.	3.65 (165)	12.67 (296)	17.96 (163)
M-9	100DCL0FA+10CHE	3.63 (99)	4.94 (39)	11.69 (65)
M-10	90DCL10FA+10CHE	3.29 (90)	5.20 (41)	13.67 (76)
M-11	80DCL20FA+10CHE	3.78 (104)	5.65 (45)	14.79 (82)
M-12	70DCL30FA+10CHE	3.97 (109)	6.54 (52)	16.23 (90)
M-13	60DCL40FA+10CHE	4.57 (125)	7.17 (57)	21.99 (122)
M-14	100DCL+15CH-Cont.	4.21 (190)	10.25 (240)	14.18 (129)
M-15	100DCL0FA+15CHE	2.83 (67)	4.24 (41)	7.54 (53)

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวควม (ต่อ)

Mix No	สัญลักษณ์	กำลังอัด, กก/ซม ² (ร้อยละเปรียบเทียบกับตัวอย่างควม)		
		7 วัน	28 วัน	60 วัน
M-16	90DCL10FA+15CHF	3.44 (82)	5.34 (52)	9.26 (65)
M-17	80DCL20FA+15CHF	2.92 (69)	4.52 (44)	12.33 (87)
M-18	70DCL30FA+15CHF	3.93 (93)	5.80 (57)	15.74 (111)
M-19	60DCL40FA+15CHF	3.94 (94)	9.46 (92)	24.43 (172)
M-20	100DCL+20CH-Cont.	4.74 (214)	15.65 (366)	19.72 (179)
M-21	100DCL0FA+20CHF	2.05 (43)	5.69 (36)	11.28 (57)
M-22	90DCL10FA+20CHF	3.08 (65)	5.28 (34)	10.44 (53)
M-23	80DCL20FA+20CHF	2.77 (58)	8.02 (51)	11.95 (61)
M-24	70DCL30FA+20CHF	3.08 (65)	8.14 (52)	15.92 (81)
M-25	60DCL40FA+20CHF	3.87 (82)	13.10 (84)	25.98 (132)

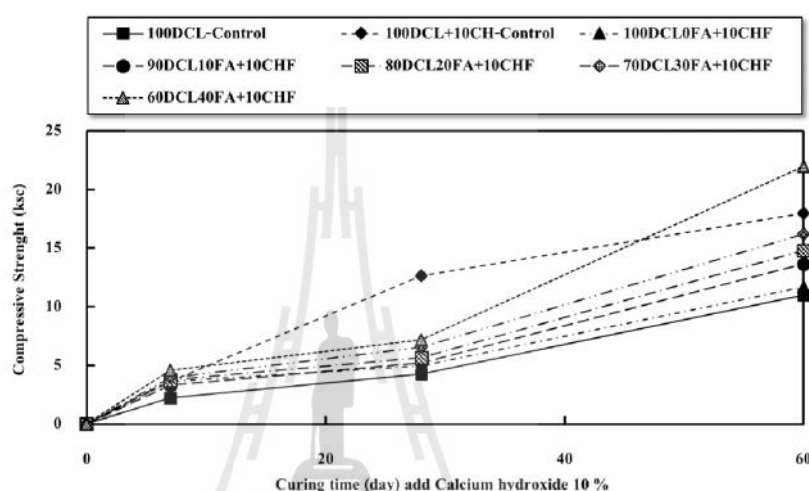
4.6.2 กำลังอัดเปรียบเทียบกับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 40 ทุกอายุการบ่ม มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าอิฐดินเหนียวควมและชุดควม การเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยช่วยให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น



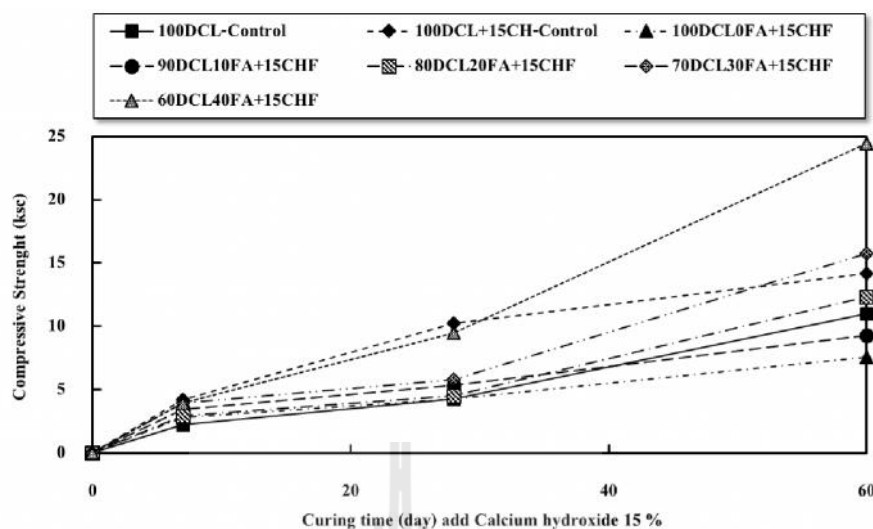
รูปที่ 4.7 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 กับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยนำนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 7 วันและ 60 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าอิฐดินเหนียวชุดควบคุม แต่มีกำลังอัดน้อยกว่าที่อายุ 28 วัน ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่เติมลงไป มีผลทำให้กำลังอัดในช่วงแรก มีค่าที่ต่ำ แต่จะสูงขึ้นในระยะปลาย



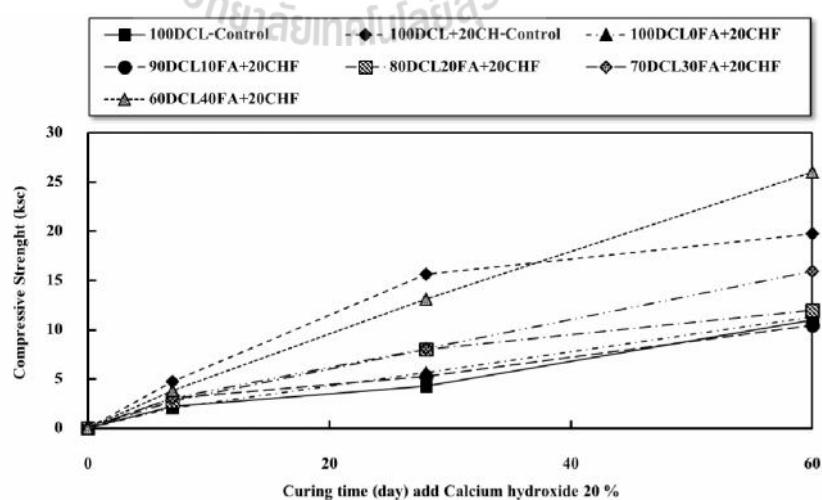
รูปที่ 4.8 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 โดยนำนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 60 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าอิฐดินเหนียวชุดควบคุม แต่ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันและ 60 วัน มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่เติมลงไป ซึ่งแปรผันไปตามน้ำหนักวัสดุผสมเพิ่ม มีส่วนทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าที่ลดต่ำลง ในช่วงระยะแรก



รูปที่ 4.9 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 กับอายุการบ่ม

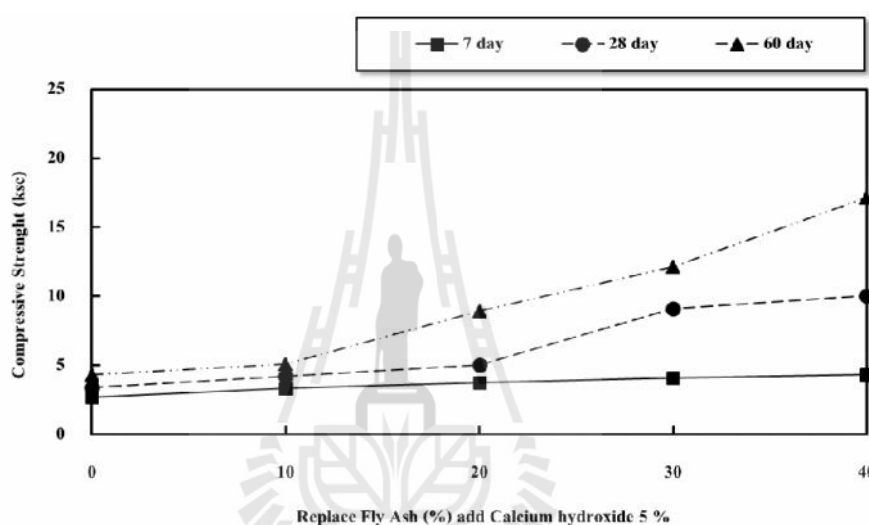
จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 โดยนำนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อายุการบ่ม 60 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าอิฐดินเหนียวชุดควบคุม แต่ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันและ 60 วัน มีค่าที่ต่ำกว่าและมีค่าที่สูงกว่าอิฐดินเหนียวควบคุมทุกอายุการบ่ม ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่ผสมลงไปมีส่วนที่ทำให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำในช่วงอายุ 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 4.10 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 กับอายุการบ่ม

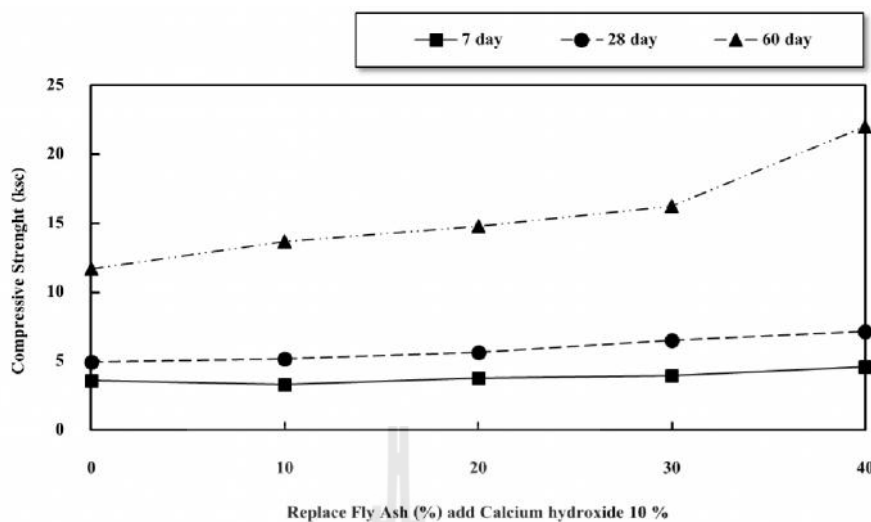
4.6.3 กำลังอัดเปรียบเทียบกับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่ม กำลังอัดในระยะแรกมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่กำลังอัดมีค่าสูงชัดเจนที่อายุ 60 วัน



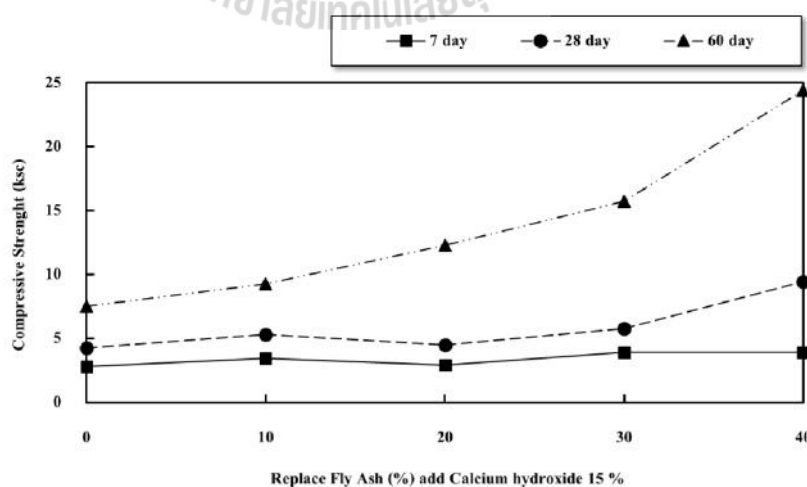
รูปที่ 4.11 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่ม กำลังอัดในระยะแรกมีค่าค่อนข้างต่ำที่อายุ 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระยะกลางที่อายุ 28 วันและค่ากำลังอัดมีค่าสูงชัดเจนที่อายุ 60 วัน



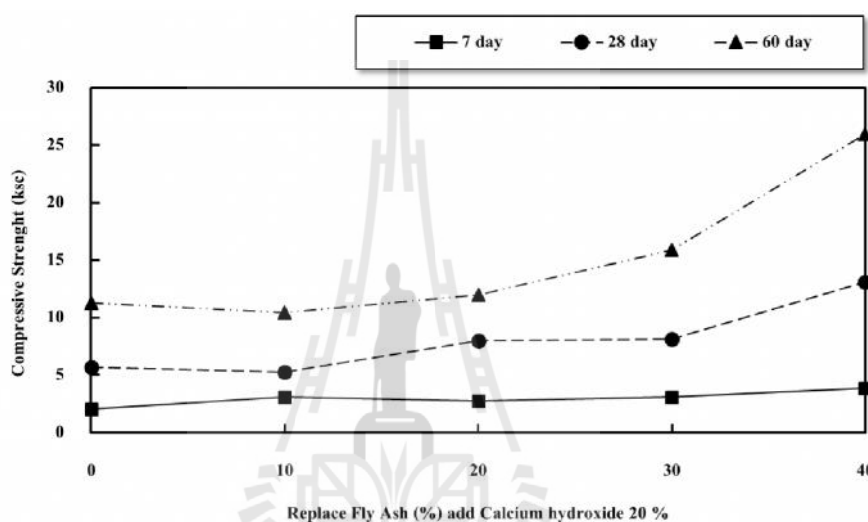
รูปที่ 4.12 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่ม กำลังอัดในระยะแรกมีค่าค่อนข้างต่ำที่อายุ 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระยะกลางที่อายุ 28 วันและค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นชัดเจนที่อายุ 60 วัน



รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว มีค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่ม กำลังอัดในระยะแรกมีค่าค่อนข้างต่ำที่อายุ 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระยะกลางที่อายุ 28 วันและค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นชัดเจนในช่วงระยะปลายที่อายุ 60 วัน



รูปที่ 4.14 การพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุช่วยประสานที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว แต่กำลังอัดในช่วงระยะ 7 วันแรกมีค่ากำลังอัดต่ำ หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีการพัฒนากำลังเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะกลางที่อายุ 28 วัน และพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะปลายที่อายุ 60 วัน ค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นไปอย่างช้าในช่วงระยะแรก แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเป็นไปอย่างสมบูรณ์ที่ช่วงระยะกลางและระยะปลายที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน

4.7 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

4.7.1 การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียวชุดควบคุม

จากตารางที่ 4.5 ผลของการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวล้วนชุดควบคุม 100DCL-Cont., 100DCL+5CH-Cont. และ 100DCL0FA+5CHF, 90DCL10FA+5CHF, 80DCL20FA+5CHF ไม่สามารถหาค่าการดูดซึมน้ำได้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเปื่อยยุ่ยเมื่อแช่น้ำ ไม่สามารถทนน้ำได้ถึง 24 ชั่วโมง ซึ่งจะละลายเป็นกองดิน สาเหตุที่ตัวอย่างเปื่อยยุ่ยขณะทดสอบเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ผสมมีปริมาณที่น้อยเกินไปทำให้การยึดประสานระหว่างเม็ดดินและสารปอซโซลานเกาะตัวกันหละหลวม ทำให้แตกตัวเวลาแช่น้ำ อิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่มีการดูดซึมน้ำ คือ 100DCL+10CH-Cont., 100DCL+15CH-Cont. และ 100DCL+20CH-Cont. มีค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 23.9%, 27.5% และ 25.52 % ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 21.6%, 29.6% และ 22.4% ตามลำดับ ที่อายุ 60 วัน เท่ากับ 22.7%, 25.6% และ 21.5% ตามลำดับ และอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผสมวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เดิมโฟมเหลว พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าการดูดซึมลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผสมวัสดุผสมเพิ่ม ค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วันอยู่ในช่วง 16.1% - 32.9% ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 20.0% - 29.6% และที่อายุ 60 วันอยู่ในช่วง 21.5% - 28.9 % นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผลของปริมาณสารเพิ่มฟองอากาศและอายุการบ่ม มีผลทำให้ค่าการดูดซึมมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม เนื่องจากการเกิดรูพรุน คาปิลลารีและโพรงอากาศภายใน การที่บ่มน้ำต่ำลงส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม

Mix No	สัญลักษณ์	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)		
		7 วัน	28 วัน	60 วัน
M-1	100DCL-Control	-	-	-
M-2	100DCL+5CH-Cont.	-	-	-
M-3	100DCL0FA+5CHF	-	-	-
M-4	90DCL10FA+5CHF	-	-	-
M-5	80DCL20FA+5CHF	-	-	-
M-6	70DCL30FA+5CHF	32.89	28.32	26.31

ตารางที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวหุคความคุม (ต่อ)

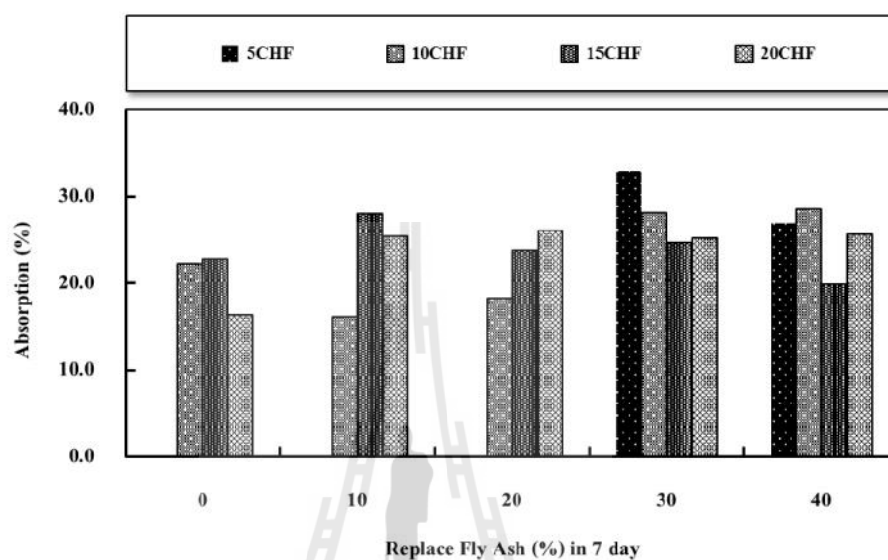
Mix No	สัญลักษณ์	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)		
		7 วัน	28 วัน	60 วัน
M-7	60DCL40FA+5CHF	26.88	24.62	26.50
M-8	100DCL+10CH-Cont.	23.86	21.64	22.70
M-9	100DCL0FA+10CHF	22.19	19.99	28.65
M-10	90DCL10FA+10CHF	16.09	23.99	25.49
M-11	80DCL20FA+10CHF	18.22	22.18	27.11
M-12	70DCL30FA+10CHF	28.15	29.13	27.92
M-13	60DCL40FA+10CHF	28.54	27.05	28.47
M-14	100DCL+15CH-Cont.	27.48	29.57	25.56
M-15	100DCL0FA+15CHF	22.77	25.63	28.90
M-16	90DCL10FA+15CHF	27.97	24.69	25.05
M-17	80DCL20FA+15CHF	23.79	25.26	24.28
M-18	70DCL30FA+15CHF	24.65	25.07	25.04
M-19	60DCL40FA+15CHF	19.89	24.21	24.60
M-20	100DCL+20CH-Cont.	25.52	22.40	21.49
M-21	100DCL0FA+20CHF	16.31	25.87	27.66
M-22	90DCL10FA+20CHF	25.45	25.40	24.42
M-23	80DCL20FA+20CHF	26.03	24.53	26.35
M-24	70DCL30FA+20CHF	25.02	24.94	24.65
M-25	60DCL40FA+20CHF	25.68	23.29	24.81

หมายเหตุ : ส่วนผสมที่ M-1 ถึง M-5 ตัวอย่างทดสอบเปื่อยยุ่ยเมื่อแช่น้ำ ทำให้หาค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างดังกล่าวไม่ได้

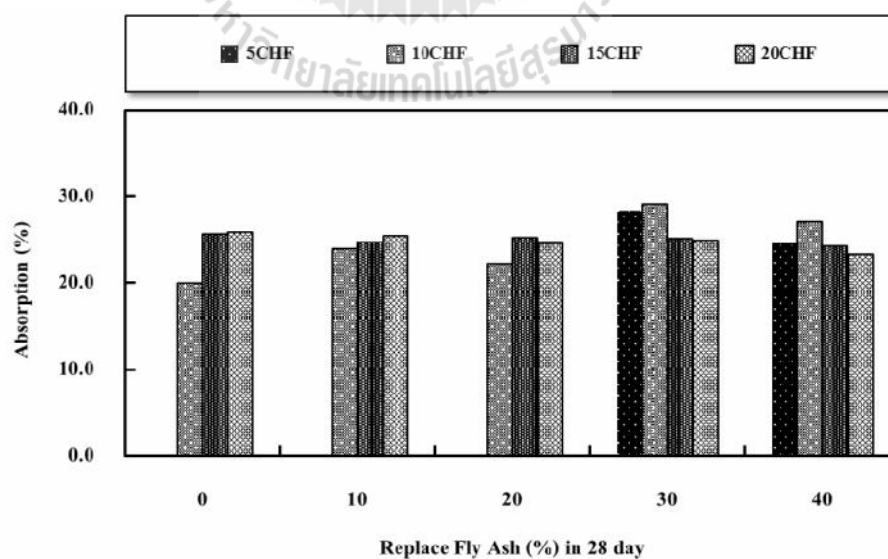
4.7.2 การดูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 – 40 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วันแรกมีค่าที่ไม่สูงมาก แต่ค่าการดูดซึมน้ำจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน

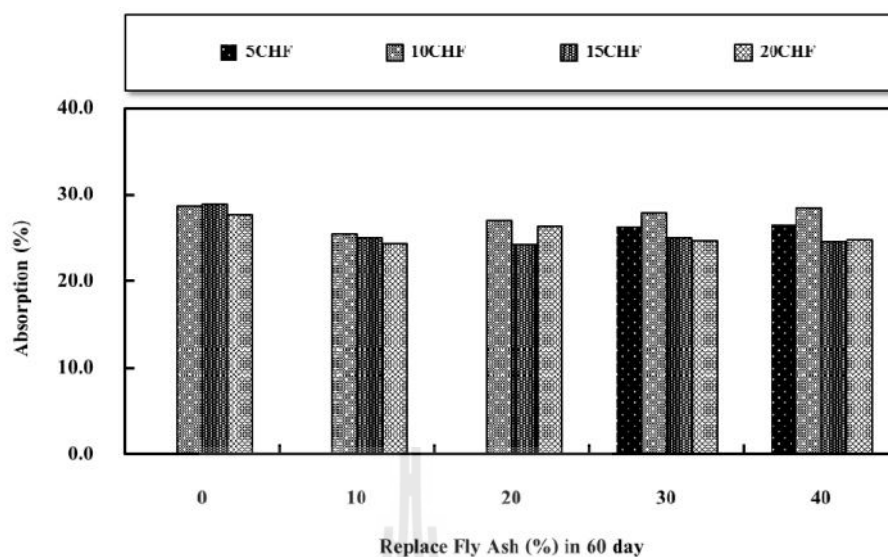
และ 60 วัน ค่าการดูดซึมที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มสมบูรณ์ในระยะกลางและระยะปลาย มีความต้องการน้ำทำปฏิกิริยาสูง ทำให้เห็นผลการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.15 การดูดซึมน้ำของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7 วัน



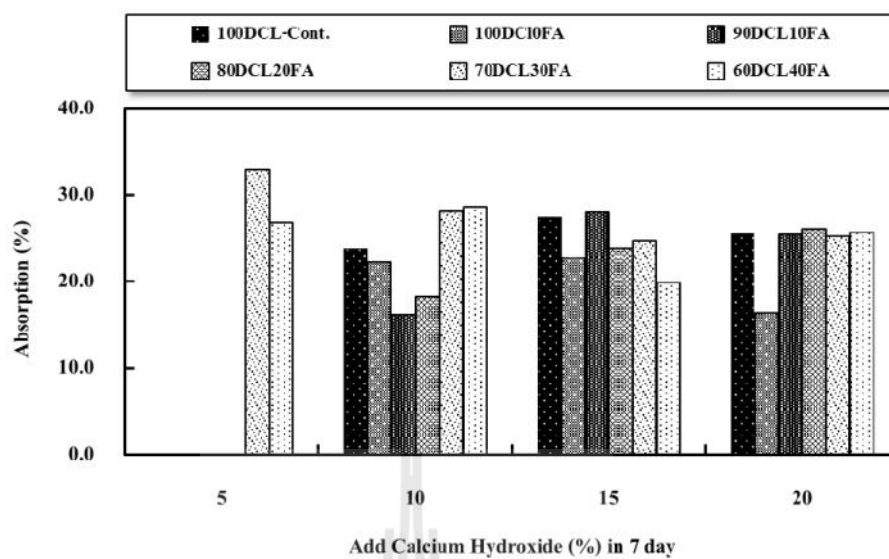
รูปที่ 4.16 การดูดซึมน้ำของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน



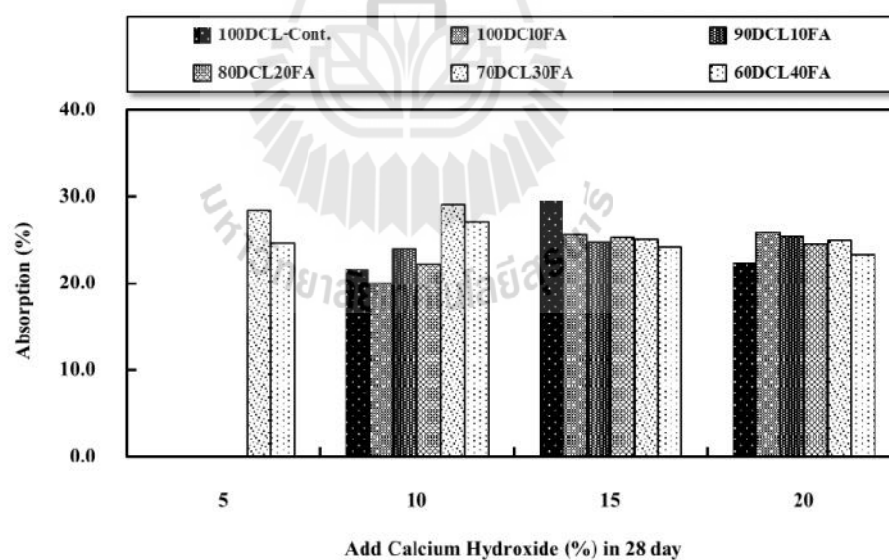
รูปที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

4.7.2 การดูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับปริมาณการเพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

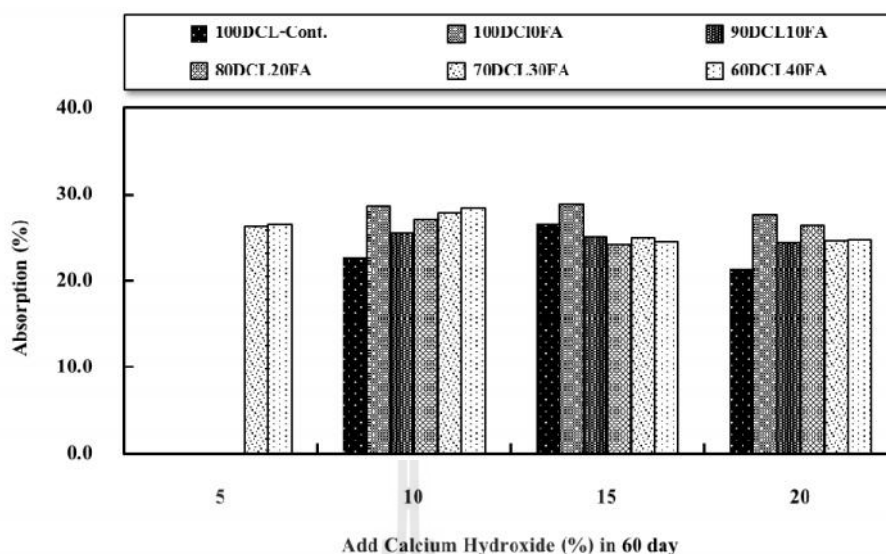
จากรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่ต่ำ เมื่อผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบมีการเปื่อยยุ่ยที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 – 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ทั้งนั้นเป็นผลจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินเหนียวและปอชโซลานมีวัสดุเชื่อมประสานน้อย ทำให้เกิดการแยกตัวเมื่อถูกน้ำ แต่ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาปอชโซลานในช่วงระยะกลางและระยะปลาย ซึ่งมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.19 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน

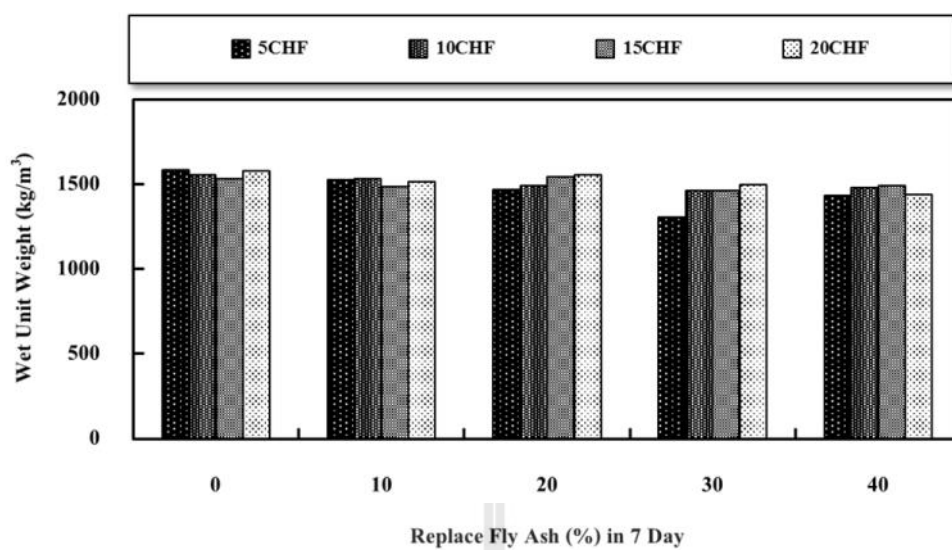


รูปที่ 4.20 การดูดซึมน้ำของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

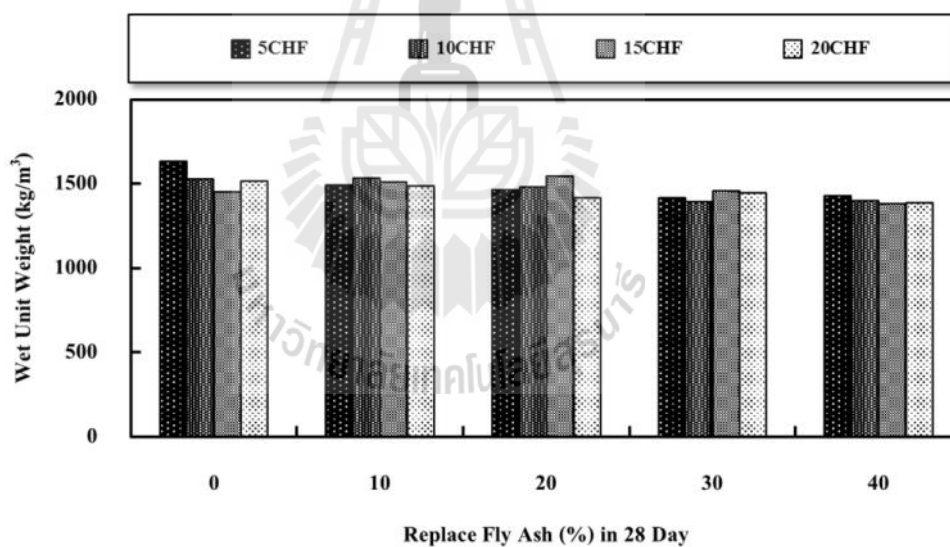
4.8 หน่วยน้ำหนัก (Unit weight)

4.8.1 หน่วยน้ำหนักขึ้น (Wet unit weight)

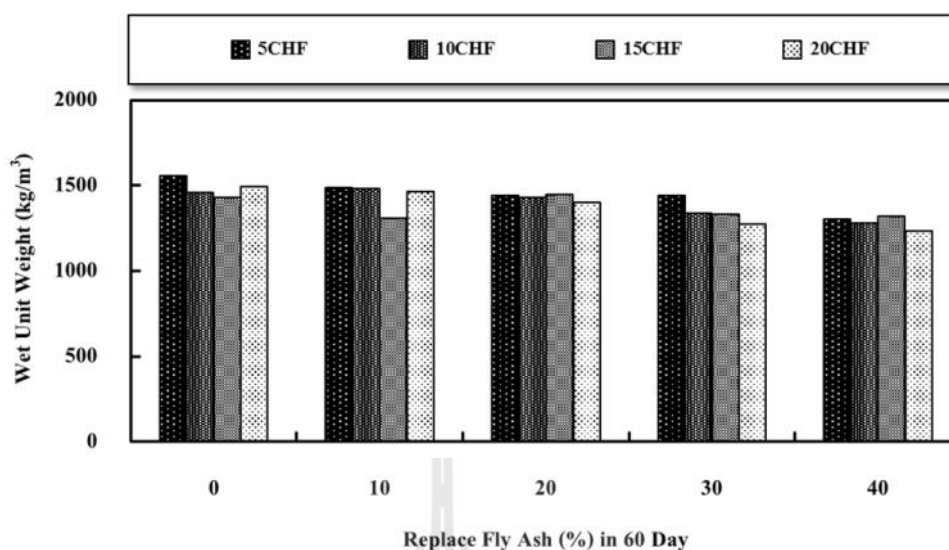
จากรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ภายหลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 – 40 โดยน้ำหนักและตามลำดับอายุการบ่ม ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นที่ลดลงเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ช่วยลดน้ำหนัก เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานกับอนุภาคดินเหนียวก็ช่วยลดความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ เพราะต้องใช้น้ำที่อยู่ภายในทำปฏิกิริยา ทำให้ความหนาแน่นระยะกลางและระยะปลายมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับอายุการบ่มที่ 7 วันแรก และผลของการเติมสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming Agent) ก็มีส่วนทำให้น้ำหนักลดลง เพราะมีส่วนทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างของอากาศภายในเนื้อวัสดุ ทำให้น้ำหนักเบา ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1307.1 - 1584.6 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1388.1 - 1631.9 \text{ kg/m}^3$ และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1322.2 - 1554.8 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7 วัน

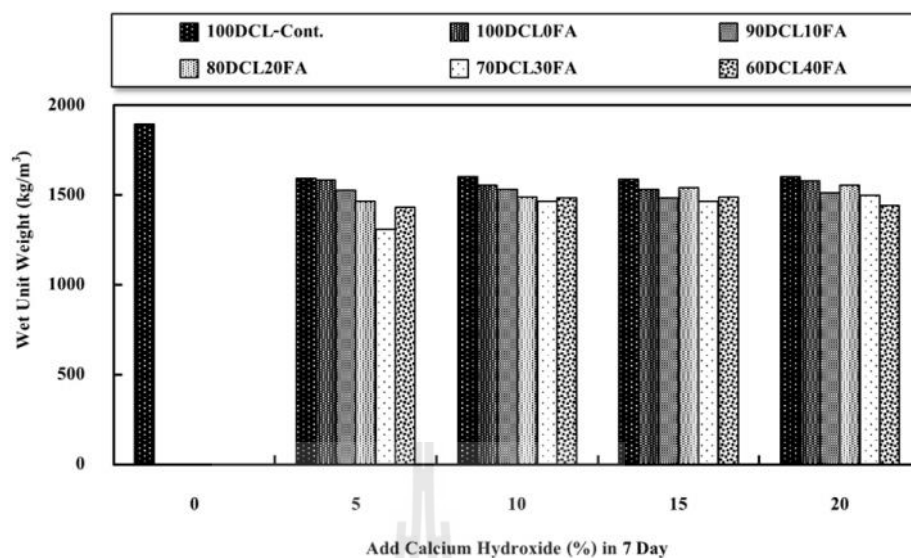


รูปที่ 4.22 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน

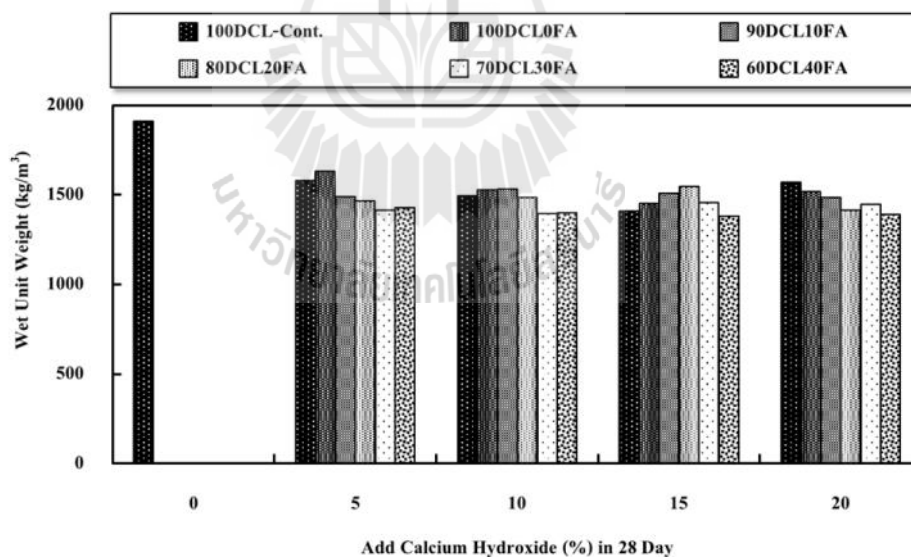


รูปที่ 4.23 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

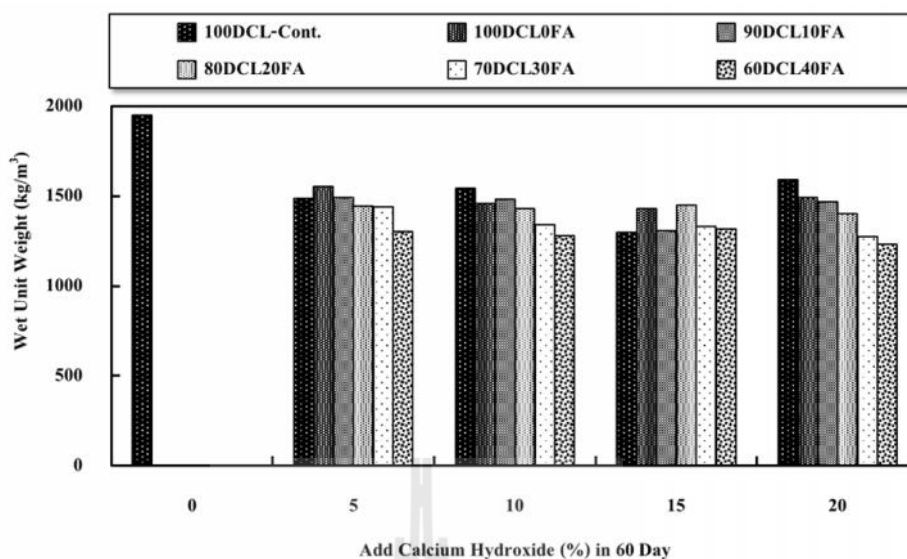
จากรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุมภายหลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้เห็นค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐดินเหนียวชุดควบคุม นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผลของคุณสมบัติของวัสดุเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ผลของสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming Agent) ที่แปรผันตามปริมาณน้ำหนักรวมวัสดุผสมเพิ่มและผลของอายุการบ่ม มีผลที่ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าที่ลดลงและมีค่าน้ำหนักต่อมวลที่มีขนาดเบา ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 1585.7 - 1896.3 kg/m³ ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 1411.0 - 1912.3 kg/m³ และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 1296.7 - 1950.1 kg/m³ ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน



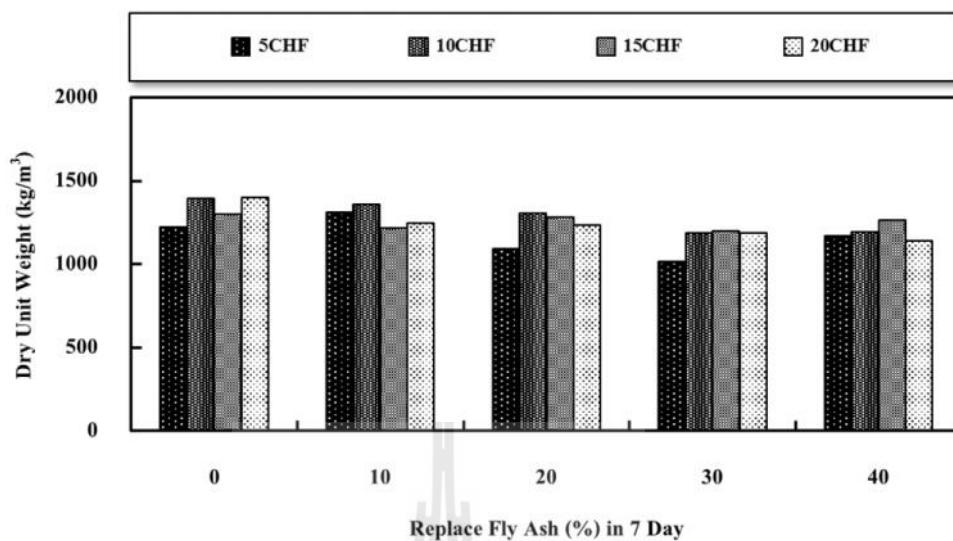
รูปที่ 4.25 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน



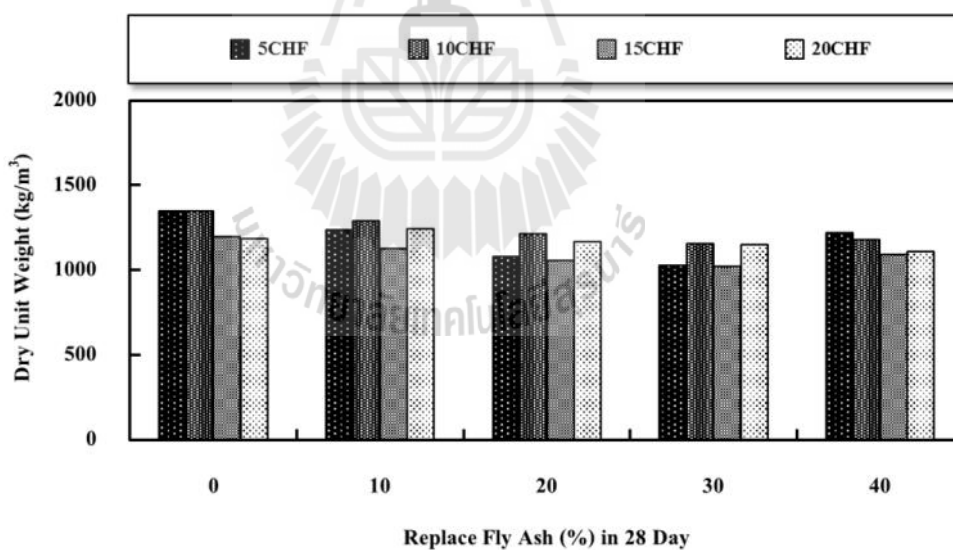
รูปที่ 4.26 หน่วยน้ำหนักขึ้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

4.8.2 หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight)

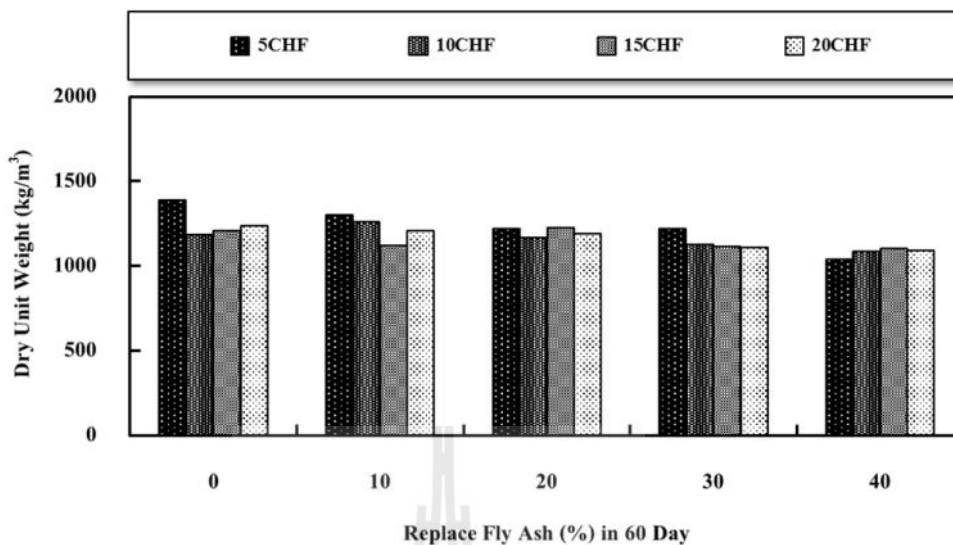
จากรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม โดยการอบแห้งไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่ร้อยละ 0 – 40 โดยน้ำหนักและตามลำดับอายุการบ่ม ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งที่ลดลงเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ช่วยลดน้ำหนัก เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุอิฐดินเหนียวมวลเบา มีส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่ามากกว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและเมื่อเปรียบเทียบกัน ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีค่าหน่วยน้ำหนักที่เบาและต่ำกว่า และผลของการเติมสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming Agent) ก็มีส่วนทำให้น้ำหนักลดลง เพราะมีส่วนทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างของอากาศภายในเนื้อวัสดุ ทำให้มีน้ำหนักเบา ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1012.9 - 1398.9 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1110.4 - 1347.8 \text{ kg/m}^3$ และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1037.8 - 1387.0 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7 วัน

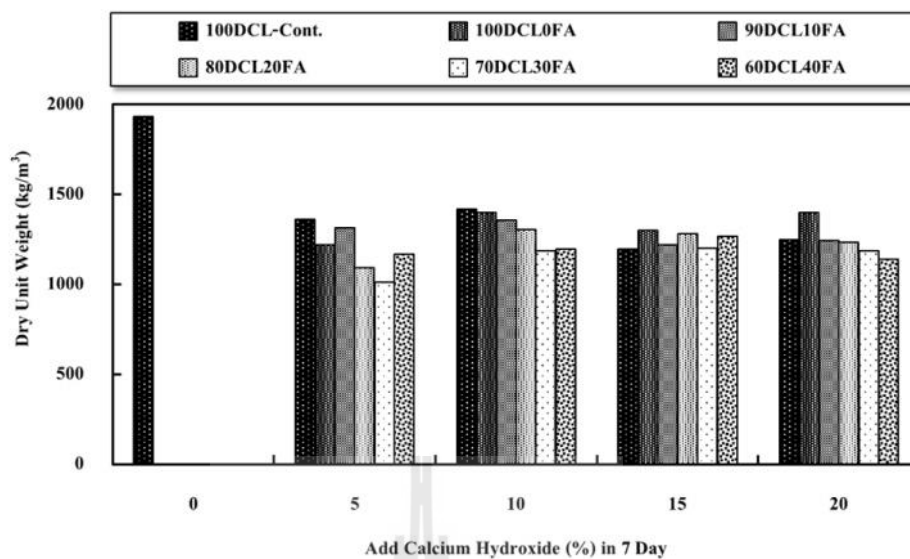


รูปที่ 4.28 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน

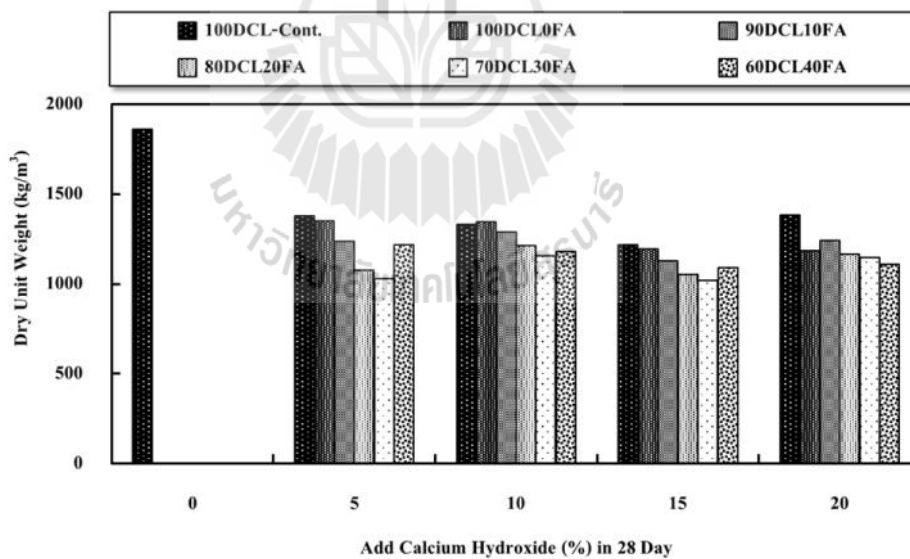


รูปที่ 4.29 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

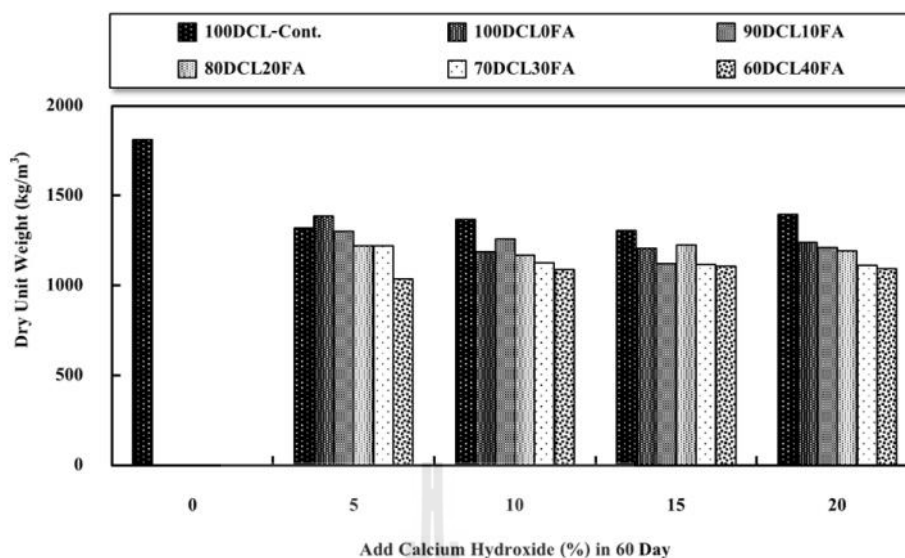
จากรูปที่ 4.33, 4.34 และ 4.35 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ภายหลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง โดยการอบแห้งไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ที่ 24 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้เห็นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐดินเหนียวชุดควบคุม นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผลของคุณสมบัติของวัสดุเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ผลของสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming Agent) ที่แปรผันตามปริมาณน้ำหนักรวมวัสดุผสมเพิ่มและผลของอายุการบ่ม มีผลที่ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าที่ลดลงและมีค่าน้ำหนักต่อมวลที่มีขนาดเบา ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1197.0 - 1933.8 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1215.8 - 1859.6 \text{ kg/m}^3$ และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1305.8 - 1813.4 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.31 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน

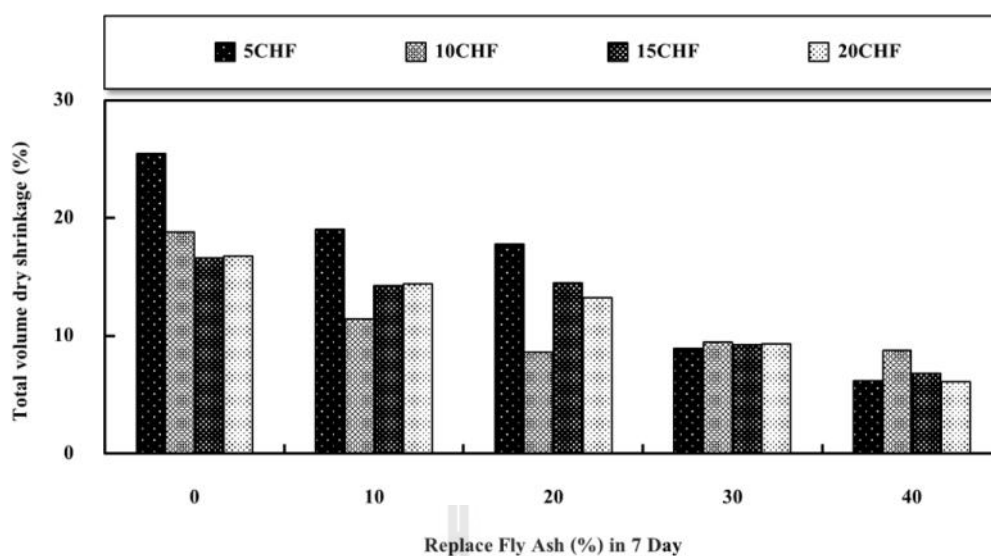


รูปที่ 4.32 หน่วยน้ำหนักแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

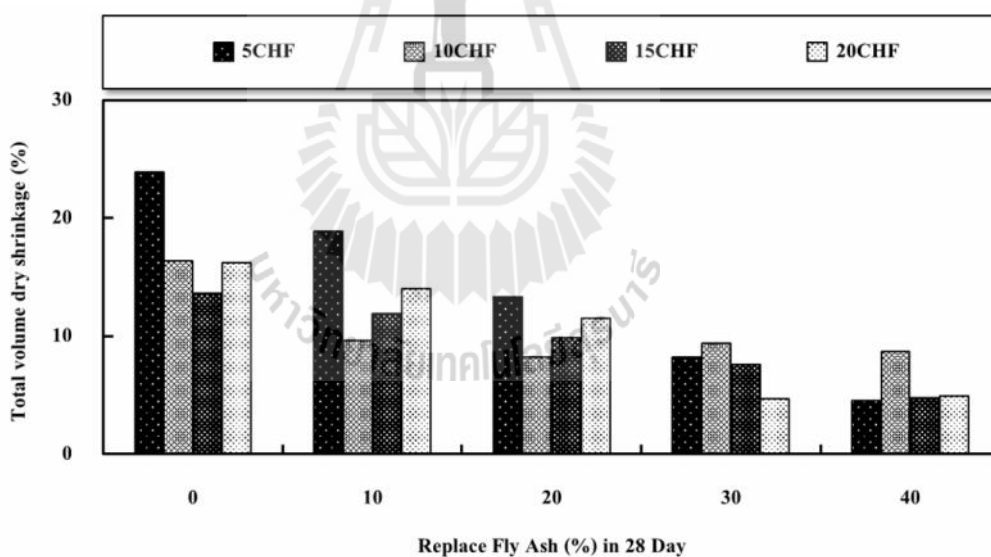
4.9 การหดตัวเชิงปริมาตรรวม (Total volume shrinkage)

4.9.1 การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้น (Total volume wet shrinkage)

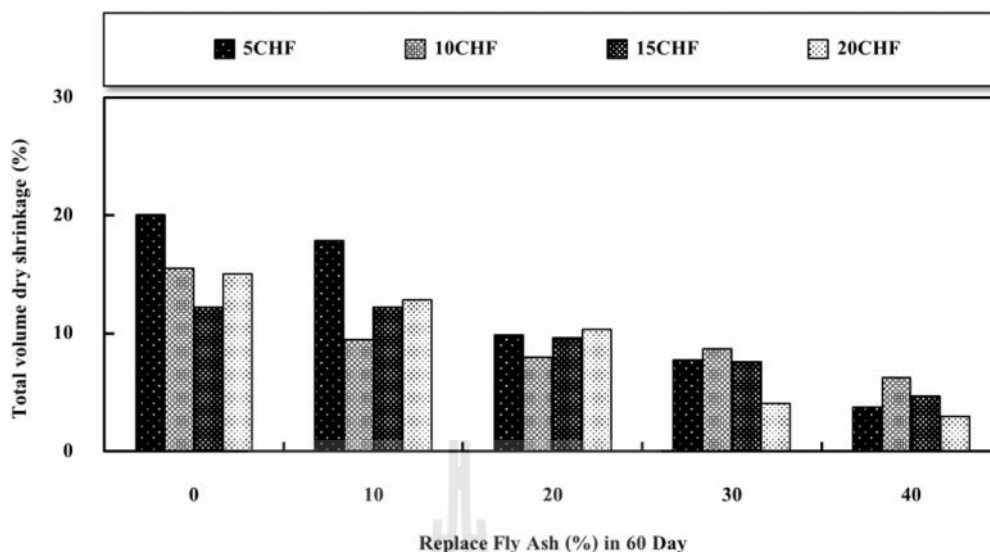
จากรูปที่ 4.32, 4.33 และ 4.34 กราฟแสดงร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ภายหลังจากบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรแบบชื้นมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งข้อมูลจะสอดคล้องกับข้อมูลของกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบา ค่าการหดตัวต่ำลงและค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามลำดับอายุการบ่ม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และเห็นผลอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น ค่าการหดตัวจะหดตัวค่อนข้างสูงที่ระยะต้นแต่จะมีค่าที่ลดต่ำลงในระยะปลาย ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.53 – 13.49 ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.99 – 10.15 และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.57 – 8.76



รูปที่ 4.33 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7 วัน

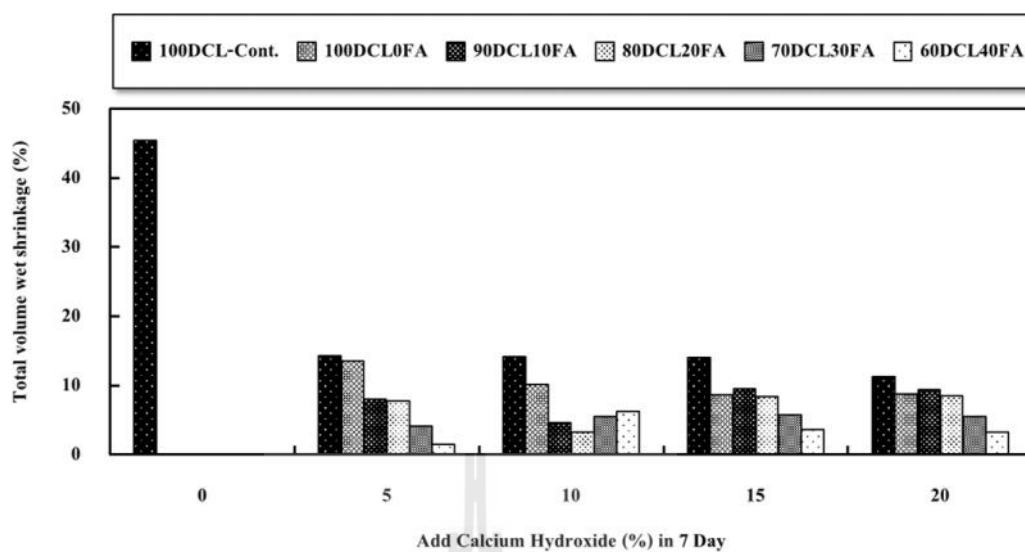


รูปที่ 4.34 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน

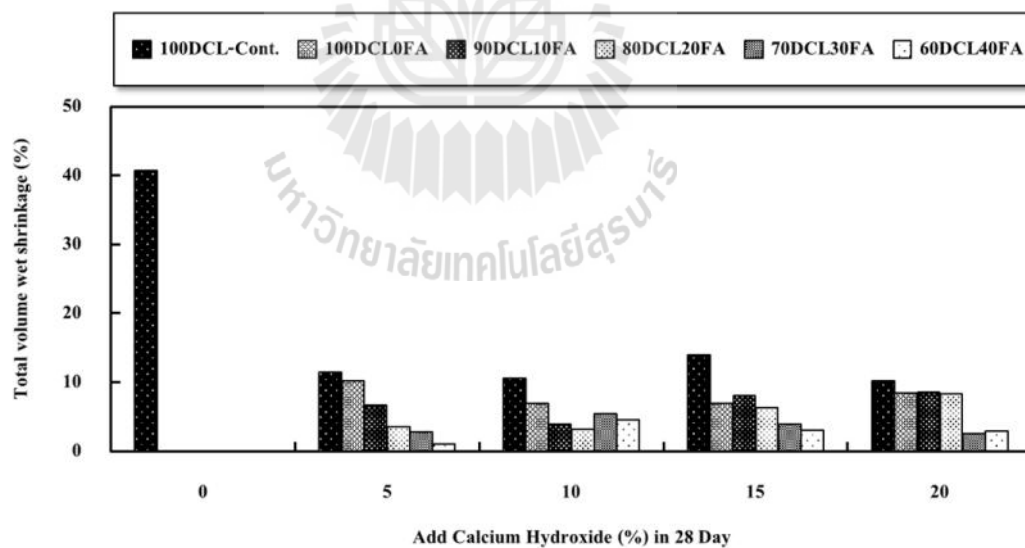


รูปที่ 4.35 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

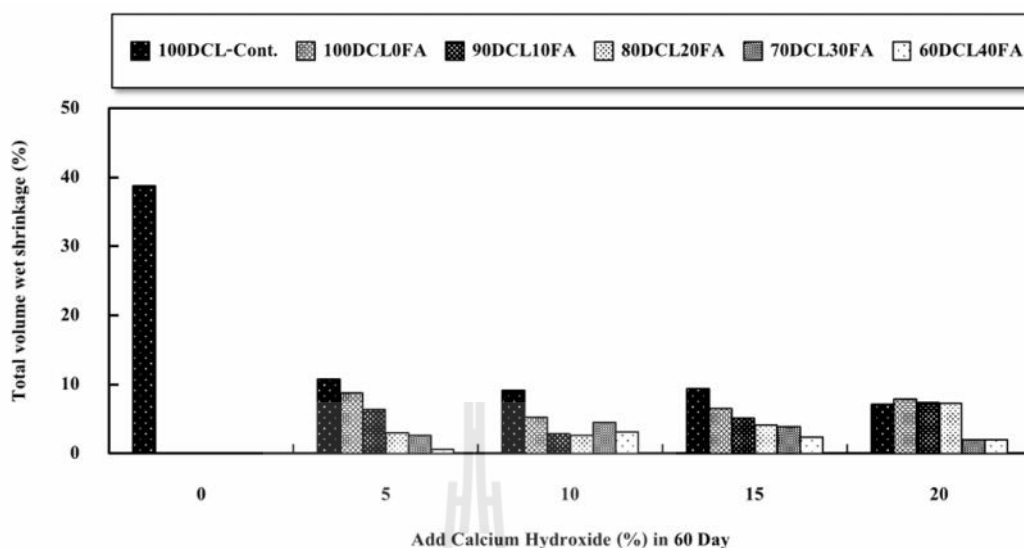
จากรูปที่ 4.36, 4.37 และ 4.38 กราฟแสดงค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ภายหลังจากการบ่มชื้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้น มีค่าการหดตัวลดลง ตามปริมาณการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และผลจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming agent) ที่เติมลงในส่วนผสมมีผลต่อค่าร้อยละการหดตัวน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของคุณสมบัติของวัสดุเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious) ทำให้เนื้อวัสดุภายในมีการยึดเกาะกันดี ส่งผลให้ค่าร้อยละของการหดตัวมีสัดส่วนที่ลดน้อยลงตามอัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการหดตัวของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมจะเห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่อายุ 7 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 11.32 – 45.46 ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 10.21 – 40.73 และที่อายุ 60 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 7.17 – 38.78 ตามลำดับ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นสูงสุดและต่ำสุดของชุดส่วนผสมมวลเบาอยู่ที่ 100DCL0FA+5CHF มีค่าเท่ากับ 13.49, 10.15 และ 8.76 ตามลำดับ และในส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่ 60DCL40FA+5CHF มีค่าเท่ากับ 1.53, 0.99 และ 0.57 ตามลำดับ ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 4.36 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน



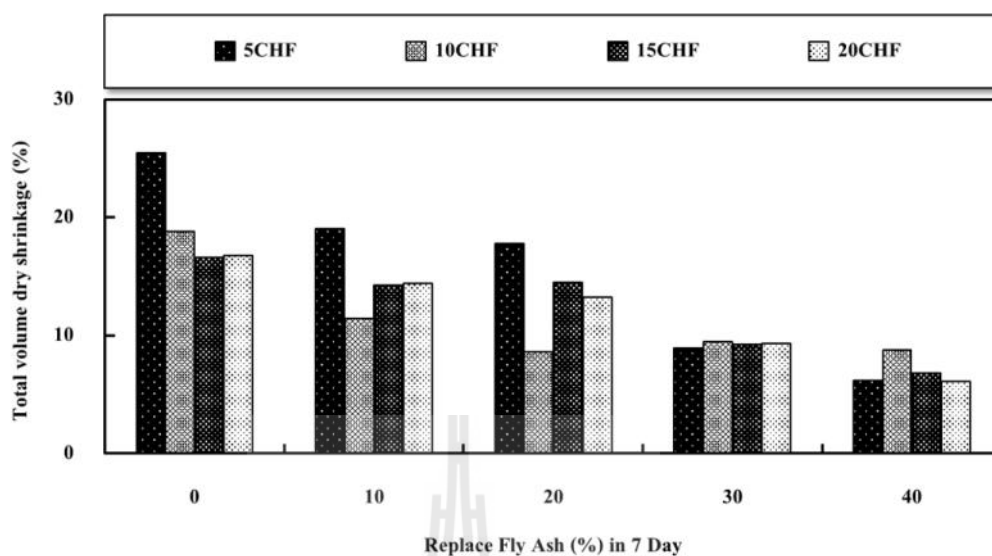
รูปที่ 4.37 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน



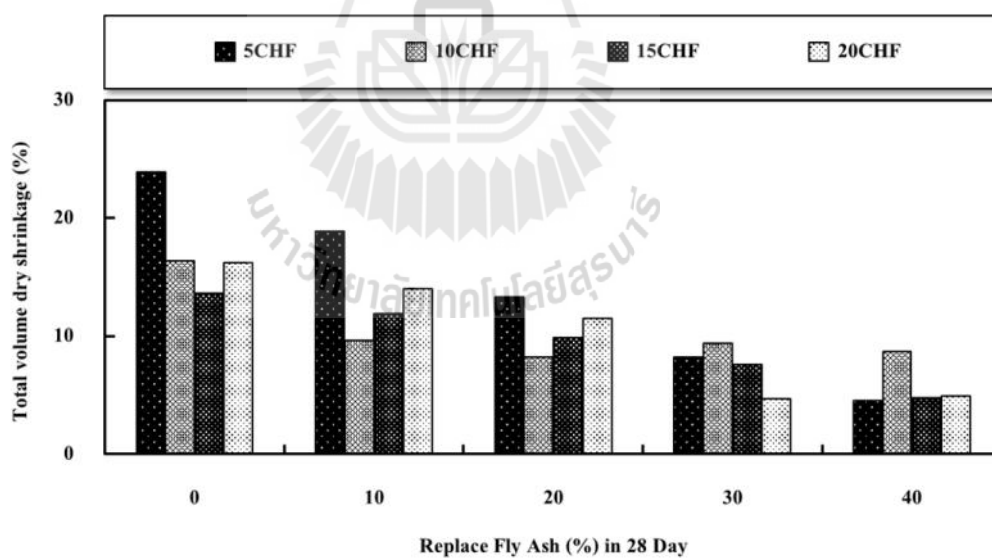
รูปที่ 4.38 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบชื้นของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

4.9.2 การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง (Total volume dry shrinkage)

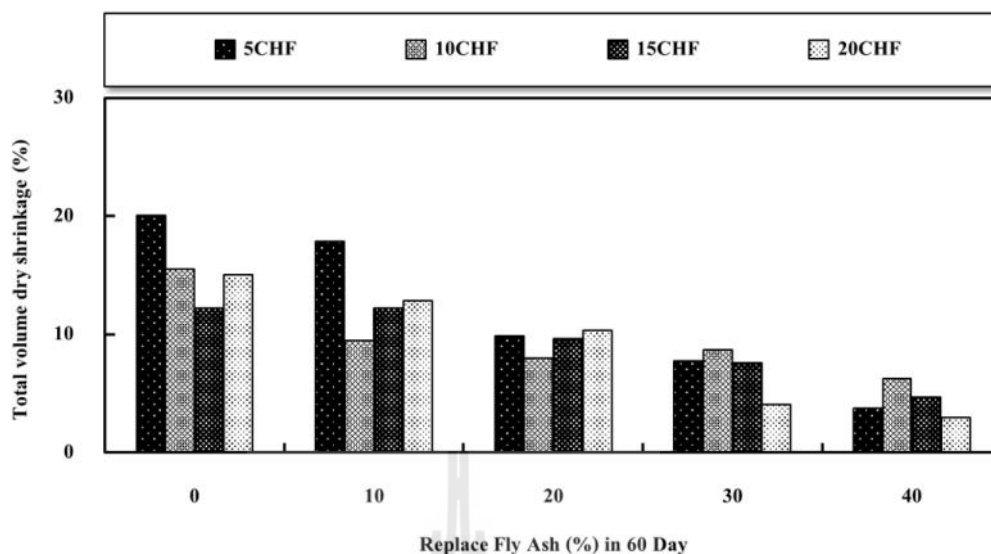
จากรูปที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 กราฟแสดงร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ภายหลังจากการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง โดยการอบแห้งไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ที่ 24 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งข้อมูลจะสอดคล้องกับข้อมูลของกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาค่าการหดตัวต่ำลงและค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามช่วงอายุการบ่ม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และเห็นผลอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น ค่าการหดตัวจะหดตัวค่อนข้างสูงที่ระยะต้นแต่จะมีค่าที่ลดต่ำลงในระยะปลาย ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งที่อายุ 7 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.11 – 25.44 ที่อายุ 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 4.53 – 23.90 และที่อายุ 60 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.96 – 20.05



รูปที่ 4.39 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 7 วัน



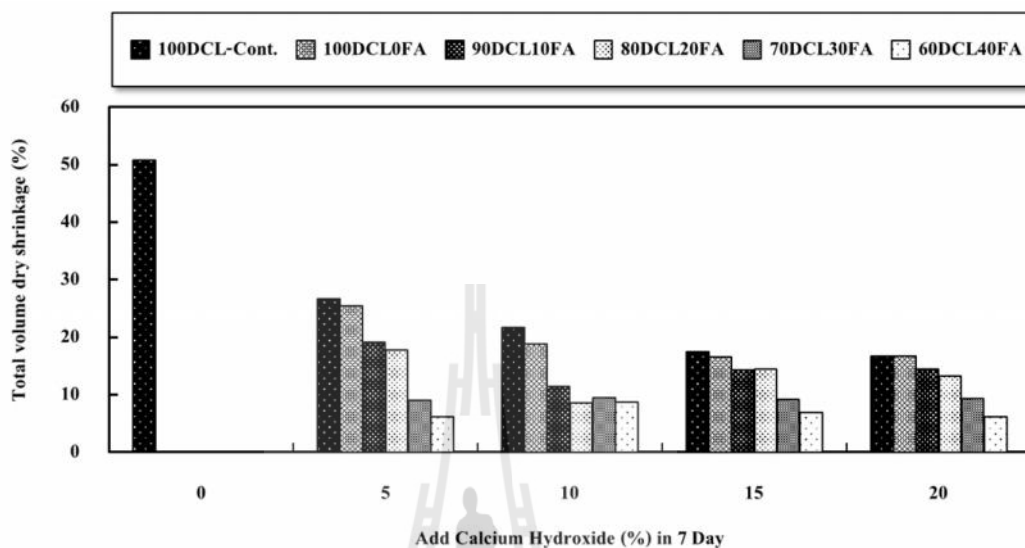
รูปที่ 4.40 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน



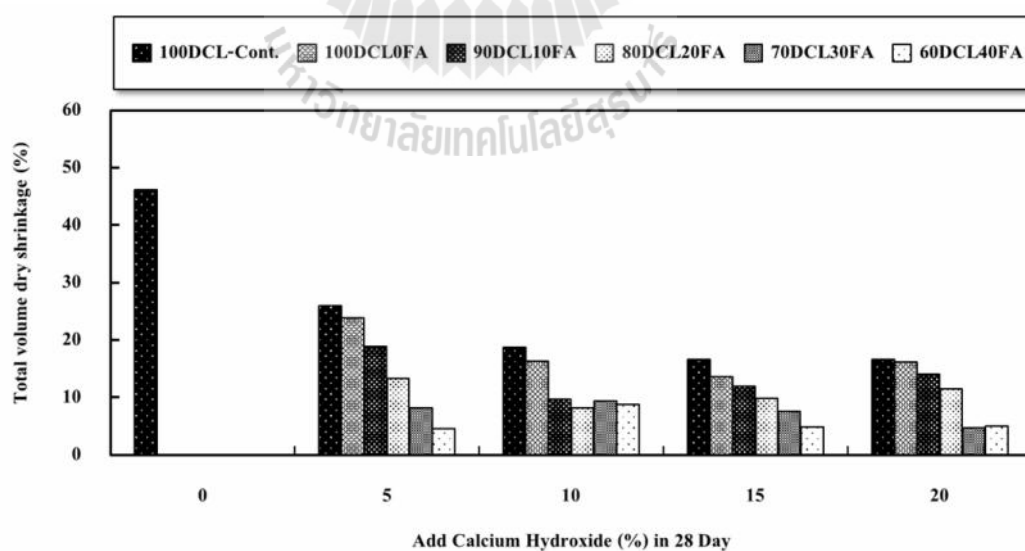
รูปที่ 4.41 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

จากรูปที่ 4.42, 4.43 และ 4.44 กราฟแสดงค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวหุคควบคุม ภายหลังจากการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง โดยการอบแห้งไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ที่ 24 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง มีค่าการหดตัวลดลง ตามปริมาณการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และผลจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming agent) ที่เติมลงในส่วนผสมมีผลต่อค่าร้อยละการหดตัวน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของคุณสมบัติของวัสดุเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious) ทำให้เนื้อวัสดุภายในมีการยึดเกาะกันดี ส่งผลให้ค่าร้อยละของการหดตัวมีสัดส่วนที่ลดน้อยลงตามอัตราส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการหดตัวของอิฐดินเหนียวหุคควบคุมจะเห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นของอิฐดินเหนียวหุคควบคุมที่อายุ 7 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 16.64 – 50.80 ที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 16.63 – 46.10 และที่อายุ 60 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 14.31 – 45.40 ตามลำดับ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งสูงสุดและต่ำสุดของชุดส่วนผสมมวลเบาอยู่ที่ 100DCL0FA+5CHF มีค่าเท่ากับ 25.44, 23.90 และ 20.05

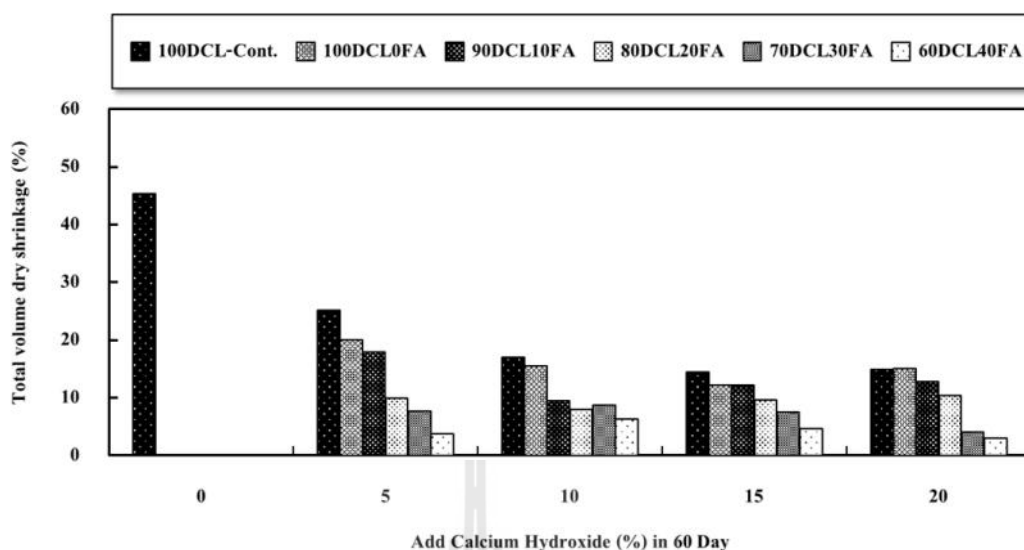
ตามลำดับ และในส่วนค่าต่ำสุดอยู่ที่ 60DCL40FA+20CHE มีค่าเท่ากับ 6.11, 4.94 และ 2.96 ตามลำดับ ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 4.42 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.43 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.44 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

4.10 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability, K)

4.10.1 ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

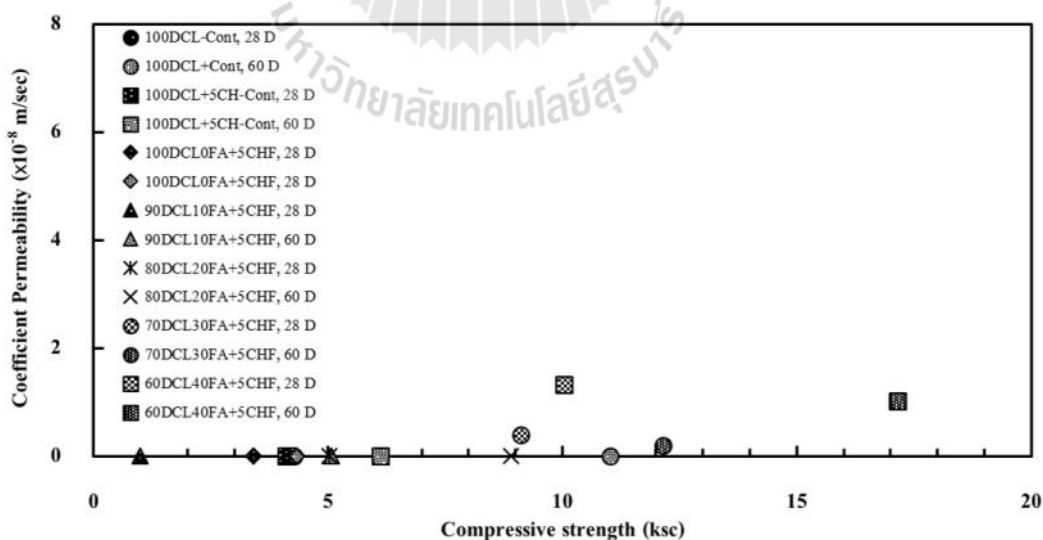
จากตารางที่ 4.6 แสดงค่ากำลังอัดเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วันและ 60 วัน และพิจารณา รูปที่ 4.44, 4.45, 4.46 และ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาชุดเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักพบว่าอัตราส่วนที่ M-1 ถึง M-5 ไม่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำได้ เนื่องจากตัวทางทดสอบพังทลายเมื่อถูกน้ำแรงดันน้ำทดสอบ อัตราส่วนผสมอิฐดินเหนียวชุดควบคุม 100DCL+10CH-Cont., 100DCL+15CH-Cont. และ 100DCL+20CH-Cont. มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วันและ 60 วัน เท่ากับ 5.153×10^{-8} , 3.095×10^{-8} , 0.959×10^{-8} , 0.214×10^{-8} , 5.638×10^{-8} และ 5.353×10^{-8} m/sec ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังอัดเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบา
กับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ที่อายุ 28 วันและ 60 วัน

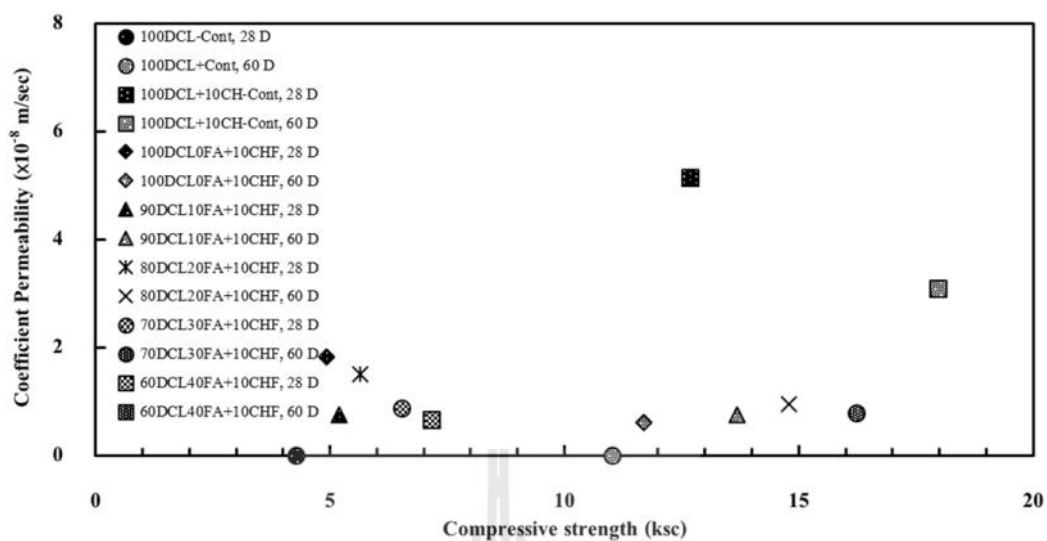
Mix No.	สัญลักษณ์	กำลังอัด (กก/ซม ²)		K, x 10 ⁻⁸ (ม/วินาที)	
		28 วัน	60 วัน	28 วัน	60 วัน
M-1	100DCL-Control	4.28	11.01	-	-
M-2	100DCL+5CH-Cont.	4.10	6.12	-	-
M-3	100DCL0FA+5CHF	3.40	4.33	-	-
M-4	90DCL10FA+5CHF	4.21	5.08	-	-
M-5	80DCL20FA+5CHF	5.04	8.91	-	-
M-6	70DCL30FA+5CHF	9.10	12.15	0.397	0.207
M-7	60DCL40FA+5CHF	10.03	17.16	1.331	1.022
M-8	100DCL+10CH-Cont.	12.67	17.96	5.153	3.095
M-9	100DCL0FA+10CHF	4.94	11.69	1.830	0.606
M-10	90DCL10FA+10CHF	5.20	13.67	0.748	0.748
M-11	80DCL20FA+10CHF	5.65	14.79	1.499	0.956
M-12	70DCL30FA+10CHF	6.54	16.23	0.880	0.780
M-13	60DCL40FA+10CHF	7.17	21.99	0.665	0.392
M-14	100DCL+15CH-Cont.	10.25	14.18	0.959	0.214
M-15	100DCL0FA+15CHF	4.24	7.54	3.312	1.789
M-16	90DCL10FA+15CHF	5.34	9.26	3.769	2.778
M-17	80DCL20FA+15CHF	4.52	12.33	2.690	1.606
M-18	70DCL30FA+15CHF	5.80	15.74	1.368	0.446
M-19	60DCL40FA+15CHF	9.46	24.43	4.935	0.870
M-20	100DCL+20CH-Cont.	15.65	19.72	5.638	5.353
M-21	100DCL0FA+20CHF	5.69	11.28	7.459	2.177
M-22	90DCL10FA+20CHF	5.28	10.44	1.397	1.140
M-23	80DCL20FA+20CHF	8.02	11.95	3.887	3.275
M-24	70DCL30FA+20CHF	8.14	15.92	1.554	1.195
M-25	60DCL40FA+20CHF	13.10	25.98	1.586	0.347

หมายเหตุ : ส่วนผสมที่ M-1 ถึง M-5 ตัวอย่างทดสอบพังทลายเมื่อถูกแรงดันน้ำ ทำให้หาค่า
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดังกล่าวไม่ได้

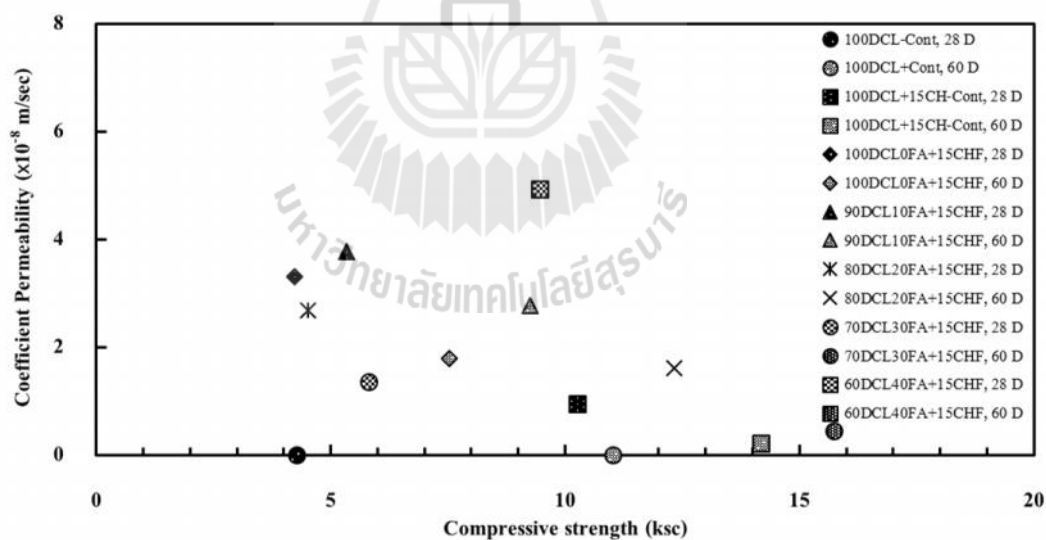
ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมควบคุมผสมเพียงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน ทำให้เนื้อวัสดุภายในมีช่องว่างน้อย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของอิฐดินเหนียวควบคุมมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อิฐดินเหนียวที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเพิ่มสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming Agent) สามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของอิฐดินเหนียวดังกล่าวมีค่าที่ลดลง แนวโน้มของกำลังอัดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เมื่อพิจารณาพิจารณารูปที่ 4.45, 4.46, 4.47 และ 4.48 ยังพบว่า ค่ากำลังอัดที่สูงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำ มีความทึบน้ำสูงขึ้นได้ เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งทำปฏิกิริยาปอซโซลานและได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) นอกจากจะช่วยให้เพิ่มกำลังและยังช่วยลดช่องว่างภายใน ส่งผลให้อิฐดินเหนียวมีความแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำลดลงตามไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน 100DCL0FA+20CHF มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วันและ 60 วัน เท่ากับ 7.459×10^{-8} m/sec และ 2.177×10^{-8} m/sec ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่อัตราส่วน 70DCL30FA+5CHF มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วันและ 60 วัน เท่ากับ 0.397×10^{-8} m/sec และ 0.207×10^{-8} m/sec ตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้ได้อิฐดินเหนียวมวลเบาแทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และโฟมเหลวที่มีคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดและคุณสมบัติการทึบน้ำที่ดี อัตราส่วน 60DCL40FA+20CHF ถือเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด



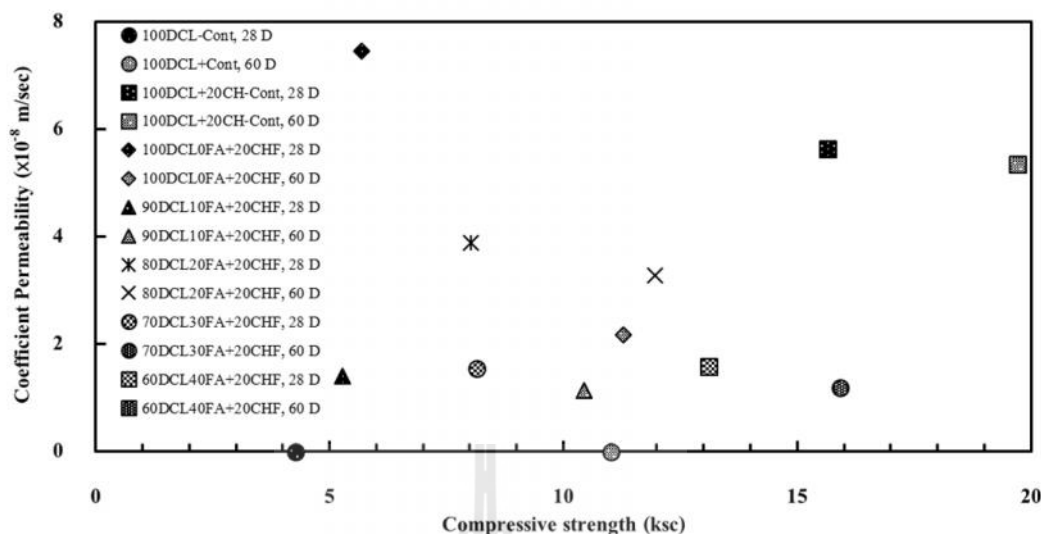
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาชุดเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาชุดเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 10



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาชุดเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 15



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับกำลังอัดของอิฐดินเหนียวมวลเบาชุดเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20

4.11 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k)

4.11.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียว

ควบคุม

จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐดินเหนียวที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว และผสมวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว และผสมสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming agent) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม พบว่า ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม การแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเติมโฟมเหลวมีส่วนทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง เพราะเถ้าลอยมีคุณสมบัติการดูดซับความร้อนต่ำและฟองอากาศภายในที่เกิดขึ้นจากโฟมเหลวกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ มีผลทำให้การนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุได้ช้าลง จึงทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดี อิฐดินเหนียวที่แทนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว และผสมวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักดินเหนียวผสมโฟมเหลว มีค่าการ

นำความร้อนที่อายุ 28 วันและ 60 วันอยู่ในช่วง $0.177 - 0.244 \text{ W/m.}^{\circ}\text{K}$ และ $0.179 - 0.267 \text{ W/m.}^{\circ}\text{K}$ ตามลำดับ และค่าการนำความร้อนของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่อายุ 28 วันและ 60 วันอยู่ในช่วง $0.181 - 0.375 \text{ W/m.}^{\circ}\text{K}$ และ $0.183 - 0.359 \text{ W/m.}^{\circ}\text{K}$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวชุดควบคุม

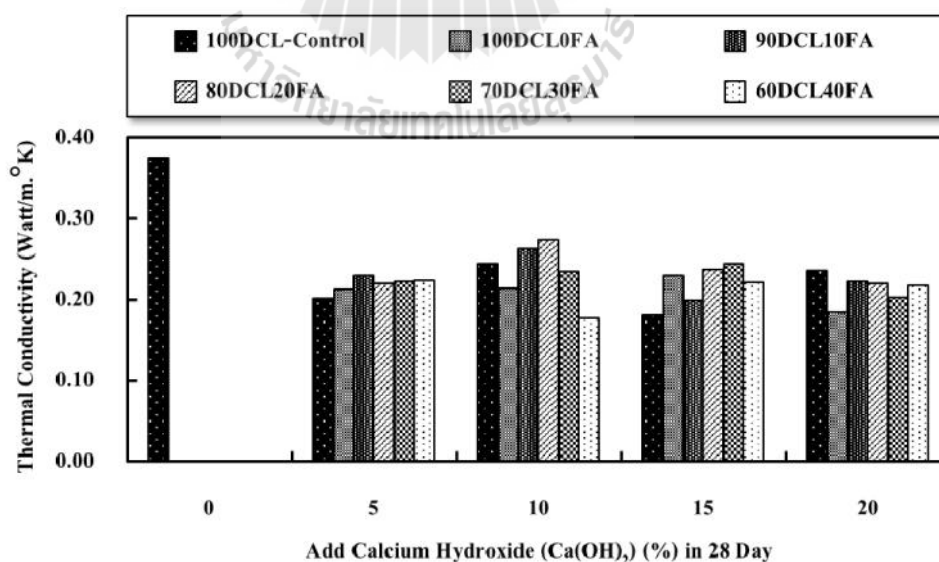
Mix No	สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, k (W/m.°K)	
		28 วัน	60 วัน
M-1	100DCL-Control	0.375	0.359
M-2	100DCL+5CH-Cont.	0.202	0.196
M-3	100DCL0FA+5CHF	0.213	0.221
M-4	90DCL10FA+5CHF	0.230	0.204
M-5	80DCL20FA+5CHF	0.220	0.201
M-6	70DCL30FA+5CHF	0.222	0.221
M-7	60DCL40FA+5CHF	0.224	0.199
M-8	100DCL+10CH-Cont.	0.244	0.253
M-9	100DCL0FA+10CHF	0.214	0.198
M-10	90DCL10FA+10CHF	0.263	0.267
M-11	80DCL20FA+10CHF	0.274	0.266
M-12	70DCL30FA+10CHF	0.235	0.220
M-13	60DCL40FA+10CHF	0.177	0.215
M-14	100DCL+15CH-Cont.	0.181	0.183
M-15	100DCL0FA+15CHF	0.230	0.210
M-16	90DCL10FA+15CHF	0.199	0.247
M-17	80DCL20FA+15CHF	0.237	0.213
M-18	70DCL30FA+15CHF	0.244	0.221
M-19	60DCL40FA+15CHF	0.221	0.224
M-20	100DCL+20CH-Cont.	0.236	0.233
M-21	100DCL0FA+20CHF	0.185	0.179

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของอิฐดินเหนียวมวลเบากับอิฐดินเหนียวหุคควบคุมที่อายุ 28 วันและ 60 วัน (ต่อ)

Mix No	สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, k (W/m. °K)	
		28 วัน	60 วัน
M-22	90DCL10FA+20CHF	0.222	0.194
M-23	80DCL20FA+20CHF	0.220	0.209
M-24	70DCL30FA+20CHF	0.203	0.189
M-25	60DCL40FA+20CHF	0.218	0.217

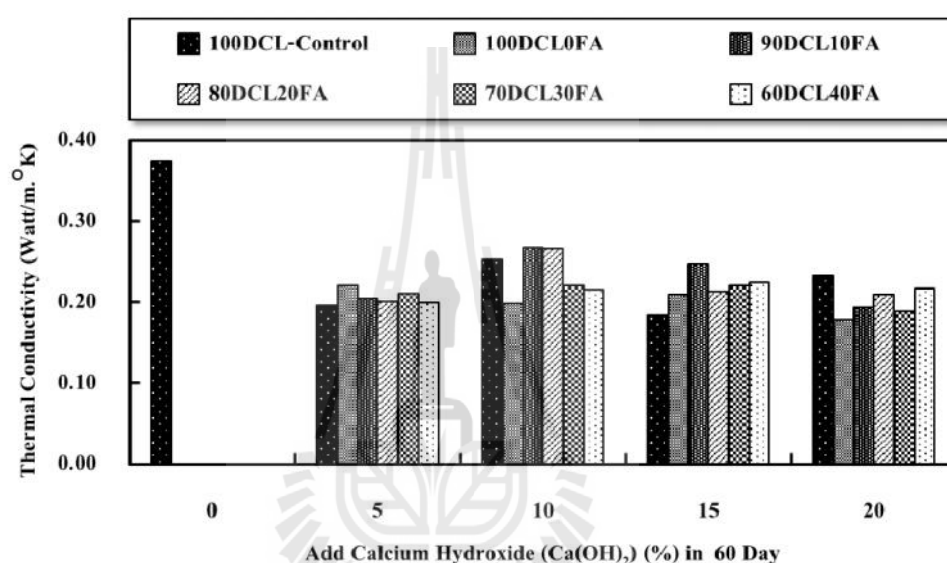
4.11.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปรียบเทียบกับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน พบว่า อัตราส่วนผสมเพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5 – 20 เปรียบเทียบสัดส่วนกับปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในดินเหนียวที่ร้อยละ 0 – 40 มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่มาก



รูปที่ 4.49 ค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน

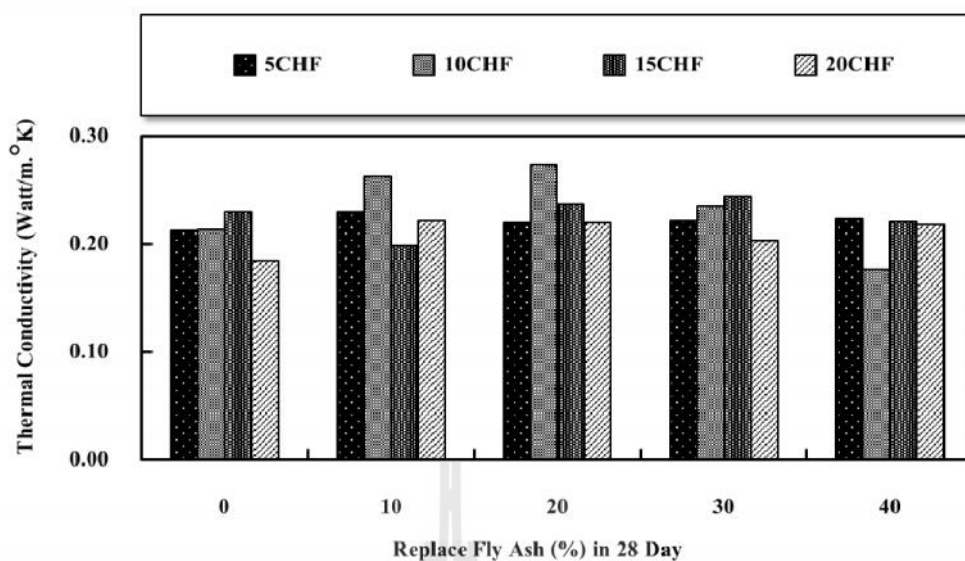
จากรูปที่ 4.50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่อายุ 28 วัน พบว่า อัตราส่วนผสมเพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5 – 20 เปรียบเทียบสัดส่วนกับปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในดินเหนียวที่ร้อยละ 0 – 40 มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อายุ 60 วันมีค่าที่ลดลง ผลของอายุการบ่มมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าที่ลดต่ำลง



รูปที่ 4.50 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อายุ 60 วัน

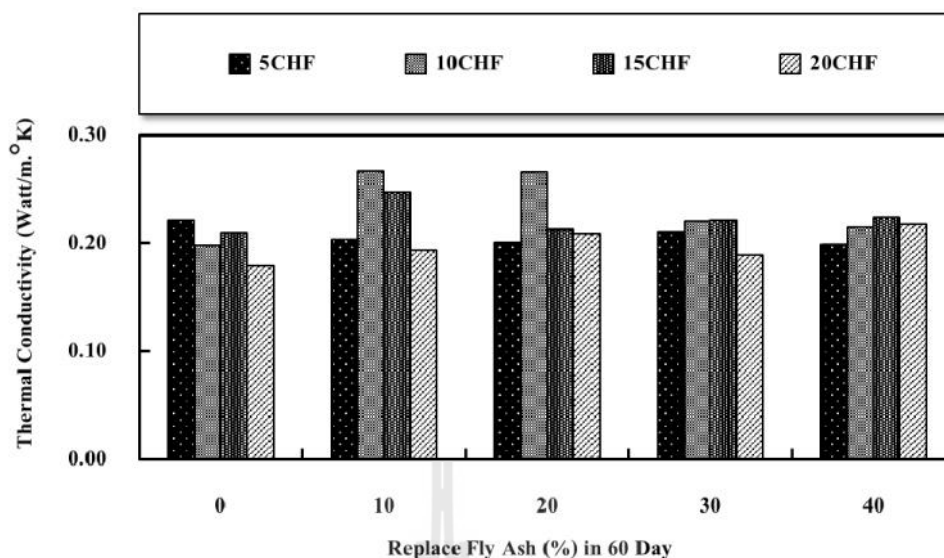
4.11.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปรียบเทียบกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดต่ำลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลของปริมาณฟองอากาศภายในที่แปรผันไปตามน้ำหนักวัสดุผสมเพิ่มซึ่งมีผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าที่ไม่สูงและแตกต่างกันมาก กล่าวคือคุณสมบัติการดูดซับความร้อนต่ำของเถ้าลอยและขนาดฟองอากาศภายในมีส่วนทำให้การนำความร้อนได้ต่ำลง



รูปที่ 4.51 ค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน

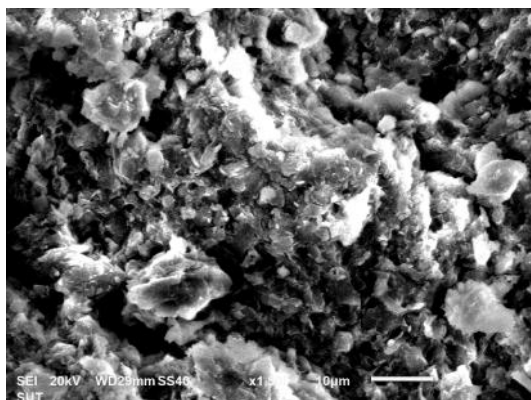
จากรูปที่ 4.52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยกับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดต่ำลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและอัตราส่วนการเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลของปริมาณฟองอากาศภายในที่แปรผันไปตามน้ำหนักวัสดุผสมเพิ่มซึ่งมีผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าที่ไม่สูงและแตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.17 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อายุ 60 วันมีค่าที่ลดลง ผลของอายุการบ่มมีผลทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าที่ลดต่ำลงตามไปด้วย



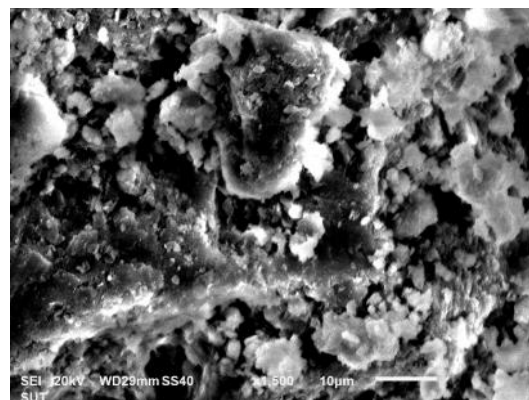
รูปที่ 4.52 ค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของปริมาณแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับปริมาณผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 60 วัน

4.12 โครงสร้างทางจุลภาคจากภาพถ่าย SEM ของอิฐดินเหนียวมวลเบา

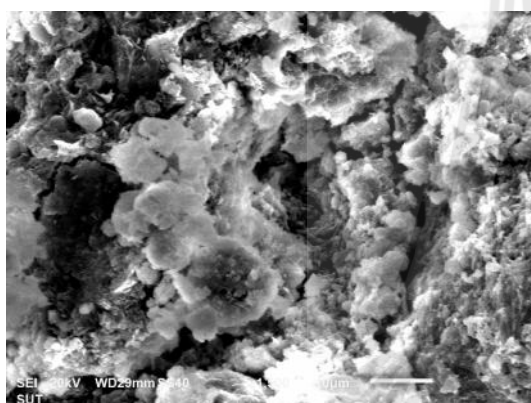
โครงสร้างทางจุลภาคโดยการถ่ายภาพ SEM ของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ที่อายุ 28 วันและ 60 วัน จากจำนวนตัวอย่างทดสอบ 14 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.53 จากรูปที่ 4.53 (a) – 4.53 (d) แสดงภาพถ่าย SEM ของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่ใช้ดินเหนียวล้วนและชุดผสมวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ภาพพบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอิฐดินเหนียวล้วนมีโครงสร้างที่ค่อนข้างทึบ เกิดการซ้อนทับของอนุภาคดินเหนียวที่มีลักษณะเป็นแผ่นๆ ยึดเกาะเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ในส่วนชุดควบคุมที่ผสมวัสดุผสมเพิ่มมีลักษณะโครงสร้างของปริมาณของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เกิดขึ้นค่อนข้างมากที่อายุ 28 วันและ 60 วัน เอทิงไกต์หรือผลึกเข็มยังเกิดขึ้นไม่มาก เกิดการอัดแน่นของเนื้อโครงสร้างภายใน จากรูปที่ 4.53 (e) – 4.53 (n) แสดงภาพถ่าย SEM อิฐดินเหนียวมวลเบาที่แทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยในปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก และผสมวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ตามลำดับและเติมโฟมเหลว จากการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างจุลภาคของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้มีช่องว่างที่เกิดจากรูพรุนของฟองอากาศจากการเติมโฟมเหลว การใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวในปริมาณ 0 % - 10 % โดยน้ำหนักและผสมวัสดุผสมเพิ่ม เนื้อภายในมีช่อง



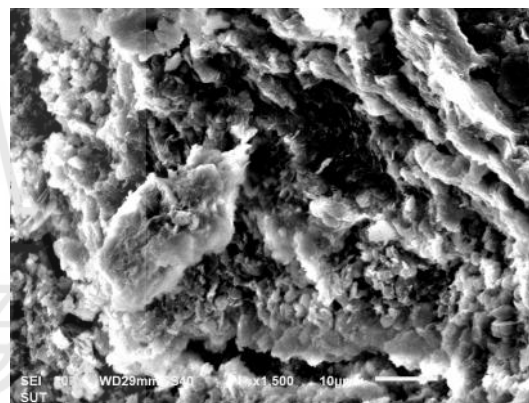
(a) 100DCL-Cont. อายุ 28 วัน (1500X)



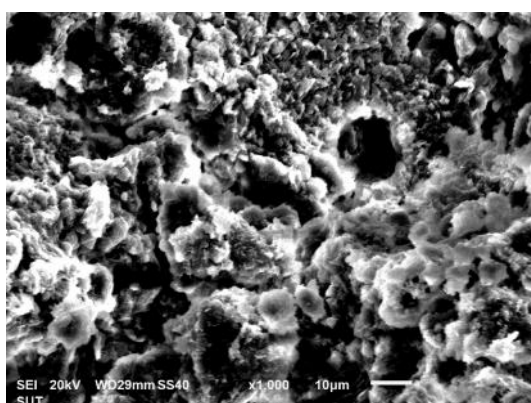
(b) 100DCL-Cont. อายุ 60 วัน (1500X)



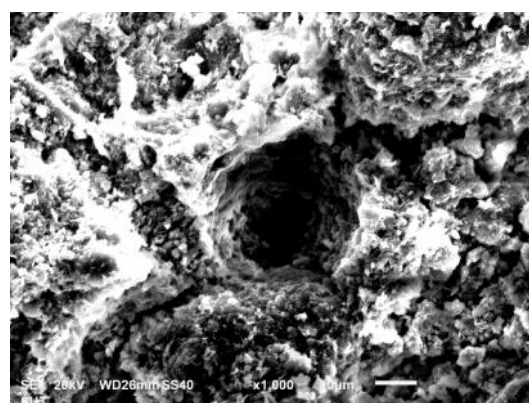
(c) 100DCL+xCH-Cont. อายุ 28 วัน (1500X)



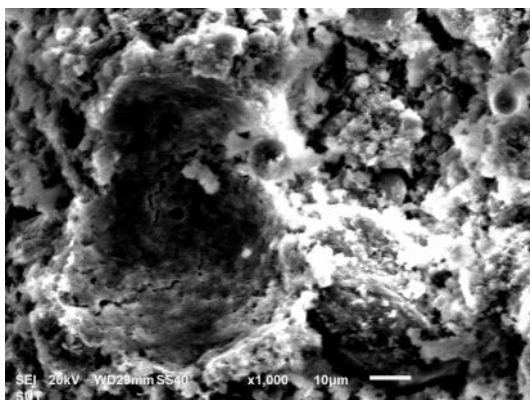
(d) 100DCL+CH-xCont. อายุ 60 วัน (1500X)



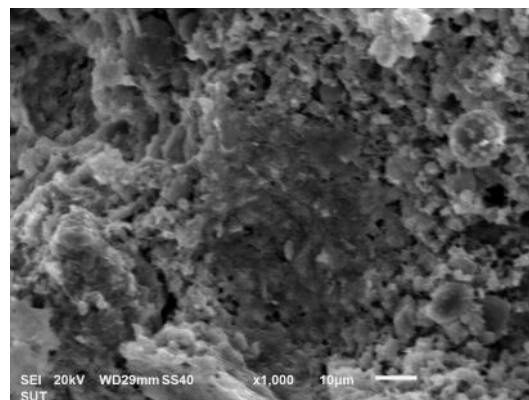
(e) 100DCL0FA+xCHF อายุ 28 วัน (1000X)



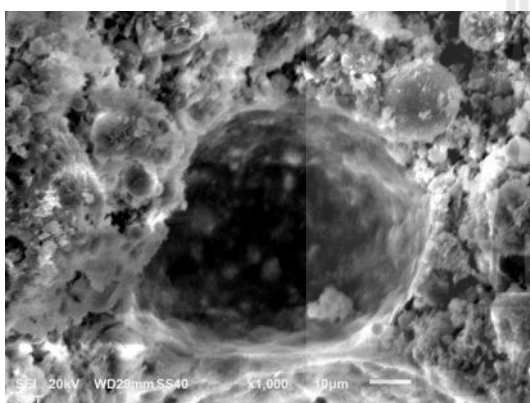
(f) 100DCL0FA+xCHF อายุ 60 วัน (1000X)



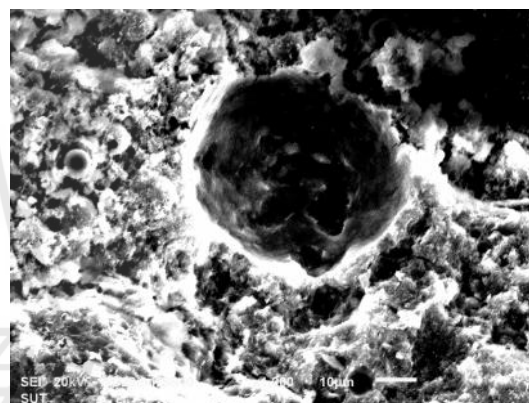
(g) 90DCL10FA+xCHF อายุ 28 วัน (1000X)



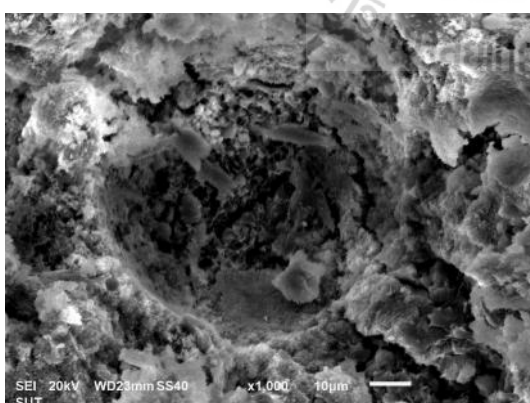
(h) 90DCL10FA+xCHF อายุ 60 วัน (1000X)



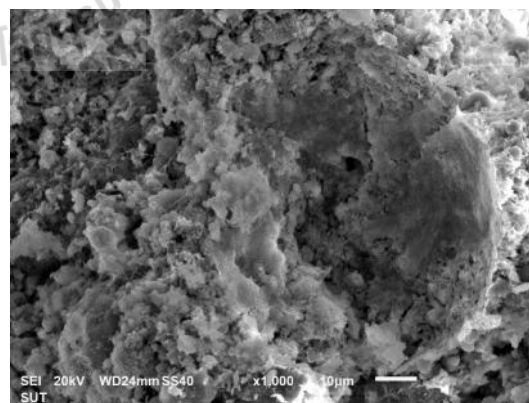
(i) 80DCL20FA+xCHF อายุ 28 วัน (1000X)



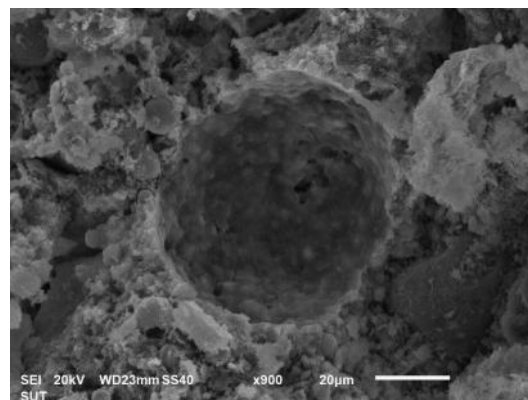
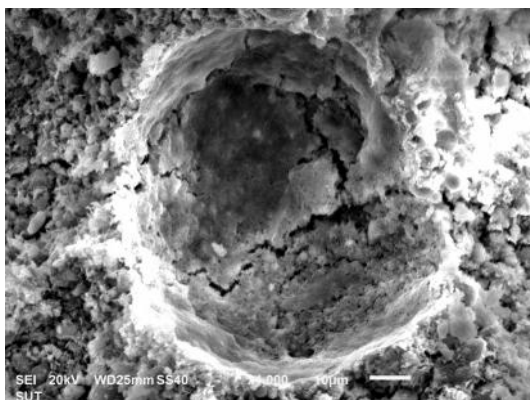
(j) 80DCL20FA+xCHF อายุ 60 วัน (1000X)



(k) 70DCL30FA+xCHF อายุ 28 วัน (1000X)



(l) 70DCL30FA+xCHF อายุ 60 วัน (1000X)



(m) 60DCL40FA+xCHF อายุ 28 วัน (1000X)

(n) 60DCL40FA+xCHF อายุ 60 วัน (1000X)

รูปที่ 4.53 ภาพ SEM ของอิฐดินเหนียวมวลเบาและอิฐดินเหนียวชุดควบคุม อายุ 28 วันและ 60 วัน

ของฟองอากาศมีความพรุนเกิดขึ้นแต่มีไม่มาก ปริมาณของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และสารแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารพัฒนากำลังยังเกิดขึ้นไม่มาก เอททิงไกต์หรือผลึกเข็มยังไม่รวมกันเป็นโครงสร้าง เกิดขึ้นในปริมาณน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยเพียงปริมาณ 10 % มีปริมาณ SiO_2 จากสารปอซโซลานน้อย ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่าและช่องว่างภายในยังเกิดขึ้นมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปริมาณ 20% - 40% โดยน้ำหนักและผสมวัสดุผสมเพิ่ม เนื้อภายในมีความเป็นเนื้อเดียวกันความพรุนและช่องว่างจากฟองอากาศน้อยลง ปริมาณของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และสารแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น เอททิงไกต์หรือผลึกเข็มจะเริ่มเข้าไปแทรกในช่องว่างและเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยแทนที่ในปริมาณสูง มีสารประกอบ SiO_2 จากสารปอซโซลานมาก จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ส่งผลต่อการพัฒนากำลังในระยะปลาย ทำให้การกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นและลดการซึมผ่านของน้ำได้ดี

4.13 การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาจากการวิจัย

จากตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้จากการวิจัยกับงานวิจัยของต่างประเทศของนักวิจัยทั้ง 4 ท่าน พบว่า ค่าคุณสมบัติด้านกำลังอัด ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร และค่าการดูดซึมน้ำ ที่ได้จากงานวิจัยอิฐดินเหนียวมวลเบา

ค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าที่น้อยกว่า ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรรวมและค่าการดูดซึมของน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยรวมยังพบอีกว่า ค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาจากการวิจัยมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับงานวิจัยของต่างประเทศ ซึ่งค่าคุณสมบัติที่ได้มีค่าที่แตกต่างกันไม่มากและผลลัพธ์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Type of brick and dry density	Materials Composition	Compressive strength (MPa)	Volume shrinkage (%)	Water absorption (%)
Kumar (2002)	Solid unfire brick (1230-1772 kg/m ³)	Fly ash – lime - phosphogypsum	3.50 – 5.90	-	28.9 – 37.2
Xu et al. (2004)	Solid burn brick (1430-1510 kg/m ³)	Clay – fly ash	25.4 – 37.1	-	23.6 - 27.2
Cultrone And Sebastian (2005)	Solid burn brick (1480-1650 kg/m ³)	Clay – fly ash	2.30 – 8.02	-	16.7 – 29.4
Oti et al. (2009)	Solid unfire brick (< 1790 kg/m ³)	Clay – lime Clay - Ca(OH) ₂	1.75 – 7.25	-	17 - 22
Present study	Light weight clay brick (1100-1200 kg/m ³)	Clay – fly ash – Ca(OH) ₂ – foaming agent	1.28 - 2.55	2.3-4.9	23.3 - 24.8

จากตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้จากการวิจัยกับงานวิจัยภายในประเทศของนักวิจัยทั้ง 4 ท่าน ที่ได้ทำการวิจัยคุณสมบัติของอิฐดินดิบและอิฐดินเหนียวที่ผ่านมา พบว่า ค่าคุณสมบัติด้านกำลังอัด ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร และค่าการนำความร้อน ที่ได้จากงานวิจัยอิฐดินเหนียวมวลเบา มีค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันค่ากำลังอัดแตกต่างกันไม่มาก ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าที่น้อยกว่า ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรรวมมีค่าที่หดตัวน้อยกว่า และค่าการนำความร้อนมีค่าที่ต่ำกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบ

โดยรวมยังพบอีกว่า ค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาจากการวิจัยมีคุณสมบัติที่ดีกว่าและผลการทดสอบของงานวิจัยที่ได้ก็ให้ผลลัพธ์ในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบากับงานวิจัยภายในประเทศ

นักวิจัย	ชนิดของอิฐและความหนาแน่น	วัสดุประกอบหลัก	กำลังอัด (kg / cm ²)	หดตัวเชิงปริมาตร (%)	การนำความร้อน (W/m.°K)
ประชุม (2547)	อิฐดินดิบ (< 1650 kg/m ³)	ดินเหนียว-เถ้าลอย-ฟางข้าว	0.96 – 1.44	8 - 11	> 0.45
ภูษิตและจตุพร (2550)	อิฐดินดิบ (< 1650 kg/m ³)	ดินเหนียว-แกลบดินเหนียว-ขุยมะพร้าว	24.9 - 29.2	6.2 – 10.5	0.70–0.90
วรินทร์ (2552)	อิฐดินเหนียวมวลเบา (990 – 1900 kg/m ³)	ดินเหนียว-กากซีเมนต์	> 26	15-27	-
พานทอง (2553)	อิฐดินเหนียว (< 1650 kg/m ³)	ดินเหนียว-เถ้าลอย-ยิปซัม	15.6 – 55.3	< 5	0.23–0.34
งานวิจัย	อิฐดินเหนียวมวลเบา (1100-1200 kg/m ³)	ดินเหนียว-เถ้าลอย-วัสดุผสมเพิ่ม-โฟมเหลว	13.5 – 25.9	2.3-4.9	0.22

จากตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้จากการวิจัยกับคุณสมบัติวัสดุก่อผนังชนิดอื่นอีก 4 ประเภท เช่น อิฐมวลเบาแบบตัน คอนกรีตบล็อก คอนกรีตมวลเบา และอิฐดินดิบทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลัง ด้านกายภาพ และการนำไปใช้งานพบว่า อิฐดินเหนียวมวลเบาที่ได้จากการวิจัย มีคุณสมบัติเทียบเท่าวัสดุก่อผนัง 4 ประเภทและดีกว่าในบางประเภท และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติตามมาตรฐานการทดสอบอิฐดินเหนียว อิฐดินเหนียวมวลเบาเข้าข่ายเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C67 (1997) ที่กำหนดค่าด้านทานกำลังอัดอยู่ในช่วง 15 – 40 kg/cm² และค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่า 25 % ในส่วนการบำรุงรักษาและการใช้งานอยู่ในระดับง่าย ดังนั้น ผลทดสอบจากงานวิจัยยังใช้อ้างอิงในทางปฏิบัติในระดับที่ยอมรับได้ และกรณี

ต้องการทดสอบเปรียบเทียบวัสดุก่อประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ ก็ยังสามารถอ้างอิงกระบวนการวิจัยนี้เป็นแนวทางได้

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบา กับวัสดุก่อผนังชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	ชนิดวัสดุก่อผนัง				
	อิฐมอญ แบบตัน*	คอนกรีต บล็อก*	คอนกรีต มวลเบา*	อิฐดินดิบ ทั่วไป*	อิฐดินเหนียว มวลเบา
จำนวนต่อ ตร.ม. (ก้อน)	130-145	14	8.33	33	45
ขนาด (ก*ข*ส) (ซม)	7*16*3.5	7*19*39	7.5*20*60	10*20*30	21.5*10.3*6.5
ความหนาแน่น (กก/ม ³)	1615-1650	765	550-640	1693	1100-1200
น้ำหนักต่อ ตรม. (กก/ม ²)	130	90	46.5	335	78
ค่ากำลังอัด (กก/ซม ²)	10-24	20-25	35-80	17.6-21.1	13.5-25.9
อัตราการดูดซึมน้ำ (%)	30-35	25-45	30-32	-	23.3-24.8
หดตัวเมื่อแห้ง (ร้อยละ)	1.8	0.8	0.2	< 1	0.22 – 0.49
ค่านำความร้อน (W/m.°K)	1.15–1.32	-	0.11–0.18	< 0.90	0.22
การนำไปใช้งาน	ง่าย	ง่าย	เฉพาะทาง	ง่าย	ง่าย
การบำรุงรักษา	ง่าย	ง่าย	ง่าย	ไม่ทนน้ำ	ง่าย

หมายเหตุ : *เปรียบเทียบกับคุณสมบัติวัสดุอุตสาหกรรมของกรมส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ออนไลน์)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวบางส่วนผสมร่วมกับวัสดุผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุยึดประสานในปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ หน่วงน้ำหนัก การหดตัวเชิงปริมาตรรวม สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เปรียบเทียบกับกำลังอัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิฐดินเหนียวมวลเบาโดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวในอัตราส่วน 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักของดินเหนียว ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วน 5%, 10%, 15% และ 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว เป็นวัสดุช่วยประสานในส่วนผสม กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียวที่เหมาะสมเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนักดินเหนียว และใช้สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารเพิ่มฟองอากาศที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวมวลเบา

จากการศึกษาพบว่า อิฐดินเหนียวมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นและผสมสารเคมีผสมเพิ่ม (Foaming agent) มีผลทำให้ผิวภายนอกของก้อนตัวอย่างมีลักษณะผิวเรียบสม่ำเสมอ เนื้อแน่น ปราศจากรอยแตกร้าว การหดตัวต่ำ มีน้ำหนักเบา และลักษณะสีผิวภายนอกเป็นสีเทาแก่ถึงสีเทาอ่อน สีผิวที่เปลี่ยนไปเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้สีผิวมีลักษณะที่จางลง เมื่อเปรียบเทียบ

กับลักษณะทางกายภาพของอิฐดินเหนียวชุดควบคุม ทำให้เห็นชัดเจนว่า ลักษณะทางกายภาพอิฐดินเหนียวมวลเบาจากการวิจัยลักษณะทางกายภาพโดยรวมที่ดีกว่าอิฐดินเหนียวชุดควบคุม

5.1.2 กำลังอัด

จากการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวบางส่วนผสมร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้กำลังอัดค่อนข้างดี ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณวัสดุที่ใช้ แต่การพัฒนาำลังที่ระยะแรกที่อายุ 7 วันมีการพัฒนาำลังค่อนข้างช้า กำลังอัดเริ่มมีการพัฒนาำลังอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุ 28 วันและ 60 วัน เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานนิกะหว่างเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์สารที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการพัฒนากำลัง การพัฒนากำลังจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะต้น แต่เริ่มเห็นผลการพัฒนากำลังในช่วงระยะปลายเมื่อระยะเวลาอายุการบ่มเพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ผสมสารเคมีผสมเพิ่ม (Foaming agent) ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วันและ 60 วัน ซึ่งค่ากำลังอัดที่อายุ 60 วัน มีค่าสูงกว่าส่วนผสมชุดควบคุมเท่ากับ 132 %

5.1.3 การดูดซึมน้ำ

จากการศึกษาพบว่า การดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่มีค่าที่เพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและปริมาณการผสมเพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว ที่แปรผันตามน้ำหนักวัสดุผสมเพิ่ม และผลของปริมาณสารเพิ่มฟองอากาศ และอายุการบ่มมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเกิดรูพรุนคาปิลลารีและโพรงอากาศภายใน ทำให้เกิดการต้องการน้ำสูง การดูดซึมน้ำจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.4 หน่วยน้ำหนัก

จากการศึกษาพบว่า หน่วยน้ำหนักขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่มีค่าที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming agent) และตามลำดับอายุการบ่ม โดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 40 % โดยน้ำหนักและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 20 % ให้ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าที่ต่ำและน้ำหนักเบาที่สุด

5.1.5 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม

จากการศึกษาพบว่า ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นและแบบแห้งของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่มีค่าที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยผสมรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming agent) และตามลำดับอายุการบ่ม การหดตัวแบบขึ้นมีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การหดตัวแบบแห้ง เพราะการหดตัวแบบแห้งมีปริมาณความชื้นที่อยู่ในเนื้อวัสดุทำให้มีค่าการหดตัวที่น้อยกว่าแบบแห้ง โดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 40% โดยน้ำหนักผสมรวมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 5% ให้ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบขึ้นสูงสุด และโดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 40% โดยน้ำหนักผสมรวมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 20% ให้ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งต่ำสุด

5.1.6 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

จากการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวบางส่วน (ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักดินเหนียว) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักดินเหนียว) ผสมรวมกับสารเคมีผสมเพิ่มหรือโฟมเหลว (Foaming agent) สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของอิฐดินเหนียวมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่มีค่าสูง อัตราส่วนที่ดีที่สุดที่มีคุณสมบัติด้านกำลังอัดและคุณสมบัติการกักน้ำที่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดี คือ อัตราส่วนผสมอิฐดินเหนียวมวลเบาที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 40 % โดยน้ำหนัก ผสมรวมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 20 % โดยน้ำหนัก

5.1.7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และผลจากการผสมสารเคมีผสมเพิ่มมีส่วนทำให้การซึมผ่านของกระแสน้ำร้อนทำได้ช้าลง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับอิฐดินเหนียวชุดควบคุมที่มีค่าการนำความร้อนที่สูง โดยส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ 0 % โดยน้ำหนัก ผสมรวมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 20 % โดยน้ำหนัก ให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุด

5.1.8 โครงสร้างทางจุลภาค

จากการศึกษาพบว่า ช่องว่างที่เกิดจากรูพรุนของฟองอากาศของอิฐดินเหนียวมวลเบาที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเติมสารเพิ่มฟองอากาศมีปริมาณที่ลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้โครงสร้างภายในมี

ลักษณะแน่นและทึบ ปริมาณของสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น เอทิงไกต์หรือผลึกเข็มเริ่มเกิดขึ้นและแทรกเข้าไปในช่องว่างทำให้เนื้อภายในเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากฟองอากาศมีปริมาณที่เล็กลง ดังนั้นอิฐดินเหนียวมวลเบาที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยผสมเพิ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเติมสารฟองอากาศในปริมาณที่เหมาะสม จึงมีปริมาณของช่องว่างความพรุนภายในน้อยกว่าส่วนผสมควบคุม

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดของอิฐดินเหนียวมวลเบาจากงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้งานและใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติกับงานวิจัยของต่างประเทศ ภายในประเทศ และวัสดุก่อผนังประเภทอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติด้านกำลังอัด หน่วยน้ำหนักแห้ง การหดตัวเชิงปริมาตร การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ระดับที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง ผลของกำลังอัดและการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับของมาตรฐานการทดสอบอิฐดินเหนียว ASTM C67 (1997) ที่กำหนดค่าด้านทานกำลังอัดอยู่ในช่วง 15-40 kg/cm² และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยกว่า 25 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีออกแบบส่วนผสมให้คล้ายคลึงกับวิธีการออกแบบคอนกรีตมวลเบา โดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD เพื่อให้การออกแบบส่วนผสมมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และง่ายต่อการคำนวณอัตราส่วนผสม

2) ศึกษาการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เช่น ร้อยละ 50, 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนัก

3) ควรศึกษาค่ากำลังอัดที่อายุมากกว่า 60 วัน เช่น 90 วัน, 120 วัน และ 180 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังในระยะยาว

4) ศึกษาวัสดุทดแทนที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เช่น กากตะกรันเตาถลุงเหล็ก หรือวัสดุจิโอโพลีเมอร์ เป็นต้น

5) ศึกษาวิธีทดสอบเพิ่มเติม เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคในเชิงลึก, ค่าความพรุนภายใน, ความทนทานต่อการชะล้าง และความทนทานต่อซัลเฟต เป็นต้น

รายการอ้างอิง

กรมส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. **เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุอุตสาหกรรม10 ชนิด.**

[ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www2.dede.go.th/new-omesafe/webban/book/material%20table.htm>.

จันทนา สุขุมนานท์. (2550). **INSEE Concrete Handbook**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท เซอร์คัสเพรส จำกัด. กรุงเทพฯ.

จิรัฐติ์ บรรจงศิริและจักรี ตียะวงศ์สุวรรณ. (2546). **การทดสอบคุณสมบัติของอิฐดินดิบที่ใช้ก่อสร้างบ้านดิน** : เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐและอินทรชัย หอวิจิตร. (2528). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าถ่านหินแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2549). **Cement Pozzolan and Concrete**. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

ปณชัย โตวิชา. (2551). **ผลของสารกักกระจายฟองอากาศต่อสภาพนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ประชุม คำพุฒ. (2547). **การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอิฐดินดิบ** : เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี.

ประชุม คำพุฒและคณะ. (2551). **การปรับปรุงคุณสมบัติของอิฐดินดิบด้วยน้ำยางธรรมชาติ**. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. หน้า 262 – 268

พันพรรณ Center for self reliance. (2015). **แบบดินฉาบบนโครงไม้**. [ออนไลน์]. ได้จาก : http://thai.punpunthailand.org/indexf2af.html?page_id=81.

พรพจน์ ดันเส็ง. (2554). **เอกสารประกอบการสอนวิชาปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics)**. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- พานทอง อินทรชัย. (2553). คุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย และยิปซัมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชาและคณะ. (2555). การใช้ประโยชน์จากหลุมฝังกลบและวัสดุธรรมชาติเพื่อเป็น วัสดุก่อสร้างต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. วารสารวิชาการ สมาคมคอนกรีตไทย.
- รัฐพล สมณาและชัย จตุรพิทักษ์กุล. (2554). การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษ คอนกรีตเก่า. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่34. ฉบับที่ 4. หน้า 369 - 381.
- รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์และเอกรัตน์ รวยรวย. (2555). การใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยถ่านหินแทนที่ ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากฝุ่นอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์. วิศวกรรมสาร มข.ปีที่39. ฉบับที่ 2. หน้า 139-145.
- วรารณณ์ คุณวานากิจ. (2536). คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่าย ผลิตแห่งประเทศไทย. : 2-1 ถึง 2-15.
- วรินทร์ บัญชาพัฒนศักดิ์และคณะ. (2552). พฤติกรรมการหดตัวและกำลังรับแรงอัดของอิฐดิน เหนียวเมื่อผสมกากซีเมนต์. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 36. ฉบับที่ 4. หน้า 283-292.
- สุภสันต์ หอพิบูลสุขและรุ่งลาวัลย์ ราชัน. (2554). ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : แมคกอฮิลล์
- สุรพงษ์ ดาราม. (2558). ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการก่อสร้างบ้านดินด้วยอิฐดินดิบ. รายงานการวิจัย. ภาควิชาการออกแบบและบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปราจีนบุรี.
- สมชัย กกกำแหง. (2542). การใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยใน พระบรมราชูปถัมภ์.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2543). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 410 214 Materials Testing. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2551). การเปรียบเทียบการใช้โคะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวล เบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์และคณะ. (2545). การศึกษาคุณสมบัติดินในจังหวัดนครราชสีมาเพื่อใช้ในการงาน
 เชมรามิก. รายงานการวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศูนย์กิจกรรมธรรมชาติบ้านบุญ. (2558). คนติดดิน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการส่งเสริม
 สุขภาพ. [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.banboon.org/pdf/06_home.pdf.
- อนุสรณ์ อินทร์ชัย. (2552). การออกแบบโครงสร้างงานก่อ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
 ปอชโซลาน. [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzolan.pdf.
- Anand, K. B.. et al. (2003). **Water permeability assessment of alternative masonry systems.**
 Building and Environment. 38(7), pp 947-957.
- American Society for Testing and Materials. (2007). **ASTM C 29/C 29M: Standard Test
 Method for Unit Weight of Aggregate.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials. (2010). **ASTM C62 – 10 : Standard Specification
 for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale).** Annual Book of
 ASTM Standards. Vol.04.10.
- American Society for Testing and Materials. (2011). **ASTM C67-11 : Standard Test Methods
 For Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.** Annual Book of ASTM
 Standards. Vol.04.11.
- American Society for Testing and Materials. (2012). **ASTM C138/C138M-12 : Standard Test
 Method for Density(Unit Weight). Yield and Air Content (Gravimetric) of Concrete.**
 Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.12.
- American Society for Testing and Materials. (2009). **ASTM C188-09 : Standard Test Method
 for Density of Hydraulic Cement.** Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.09.
- American Society for Testing and Materials. (2011). **ASTM C204-11: Standard Test Method
 for Fineness of Hydraulic Cement by Air – Permeability Apparatus.** Annual Book of
 ASTM Standards. Vol.04.11.

- American Society for Testing and Materials. (2001). **ASTM C618-00 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02.
- American Society for Testing and Materials. (2007). **ASTM D422-07 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.07.
- American Society for Testing and Materials. (2010). **ASTM D854-10 : Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.10.
- American Society for Testing and Materials. (2010). **ASTM D4318-10 : Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.10.
- American Society for Testing and Materials. (2004). **ASTM E1225-04 : Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique** Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.04.
- British Standard Institute. (2003). **BS 3921-03 : Specification for clay bricks**. UK.
- British Standard Institute. (1990). **BS 4729-90 : Specification for dimensions of brick of specials shape and size**. UK.
- Cultrone, G. and Sebastian, E. (2009). **Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks**. Construction and Building Materials. 23(1), pp 1178-1184.
- Davidovit, J. (1991). **Geopolymers : inorganic polymeric new materials**. Journal of thermal analysis. 37(8). pp 1633-1656.
- Dabaieh, M. (2015). **Building with rammed earths**. [Online]. Available : <http://lup.lup.lu.se/record/4864840/file/4864854.pdf>.
- Dondi, M. et al. (2003). **Water vapour permeability of clay bricks**. Construction and Building Materials. 17(4).pp 253-258.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright (2002). **Ash content for optimum strength of foamed concrete**. Cement and Concrete Research 32(2). pp 241-246.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright (2002). **The effect of porosity on the strength of foamed concrete**. Cement and Concrete Research 32(2). pp 233-239.

- Kumar, S. (2000). **Fly ash-lime-phosphogypsum cementitious binder: A new trend in brick.** Materials and Structures. 33(1). pp 59-61.
- Kumar, S. (2002). **A perspective study on fly ash – lime – gypsum bricks and hollow bricks for low cost housing development.** Construction and Building Materials. 16(8). pp 519-525.
- Kumar, S. (2003). **Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for wall and partitions.** Building and Environment. 38(2). pp 291-295.
- Lingling, X. et al. (2005). **Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio.** Construction and Building Materials. 19(1). pp 243 - 247.
- Degirmenci, N. and Baradan, B. (2005). **Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls.** Construction and Building Materials. 19(7). pp 536-542.
- Matthew, H. et al. (2012). **Modern earth buildings: materials. engineering.** Construction and applications. Woodhead publishing limited. pp 1 – 16.
- Oti, J. E. et al. (2009). **Engineering properties of unfired clay masonry bricks.** Engineering Geology. 107(3–4). pp 130-139.
- Oti, J. E. et al. (2009). **Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks.** Engineering Geology. 109(3–4).pp 230-240.
- Oti, J. E. et al. (2010). **Design thermal values for unfired clay bricks.** Materials & Design. 31(1). pp 104-112.
- Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2011). **Eco-efficient Construction and Building Materials.** Springer-Verlag. London. pp 157 - 181.
- Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K. (2008). **A study of fly ash – lime granule unfired brick.** Power Technology. 182(1). pp 33-41.
- Pusit Lertwattanarak and Jatuporn Tungsirisakul. (2007). **Effect to Natural Materials on Properties of Adobe Brick for Earth Construction.** Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 5(1). pp 185-199.
- Solaripedia. (2015). **Cob.** [Online]. Available : solaripedia.com/713/25/materials.html.
- Zhang, L. (2013). **Production of bricks from waste materials – A review.** Construction and Building Materials. 47(0). pp 643-655.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวด้านเควียน เถ้าลอยแม่เมาะ
ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และสารเคมีผสมเพิ่ม (Foaming Agent)

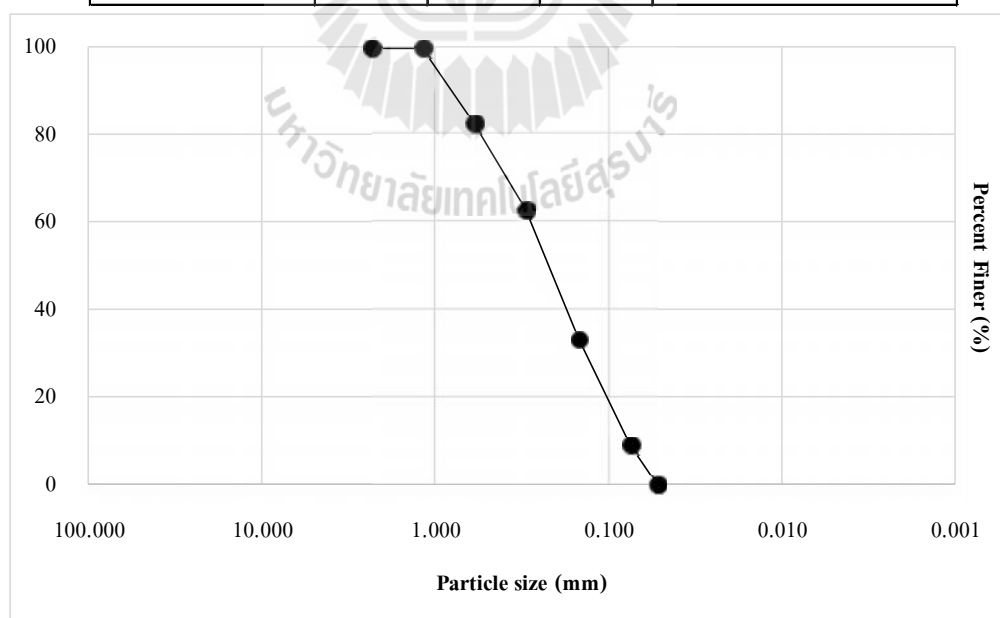
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบค่าการกระจายตัวของเม็ดดิน โดยวิธี SIEVE ANALYSIS

Sieve No.	Sieve opening (mm)	Wt. of Soil Retained (gm)	Cum. Retained (gm)	Cum. Retained (%)	(% Finer)
8	2.360	2.44	2.44	0.24	99.76
16	1.180	2.47	4.91	0.49	99.51
30	0.600	169.27	174.18	17.39	82.61
50	0.300	197.23	371.41	37.07	62.93
100	0.150	298.08	669.49	66.83	33.17
200	0.075	242.58	912.07	91.04	8.96
PAN	0.000	89.76	1001.83	100.00	0.00
SUM		1001.83			

According to USCS

Gravel	Sands			Clay
	C	M	F	



ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวดานเกวียน

No.	Calibration of Flask	
	Wt.Flask + Water (gm)	Temp (°C)
1	649.5	40
2	650.6	35
3	651.6	30
4	652.3	25
5	652.9	20
6		

Remark ; _____

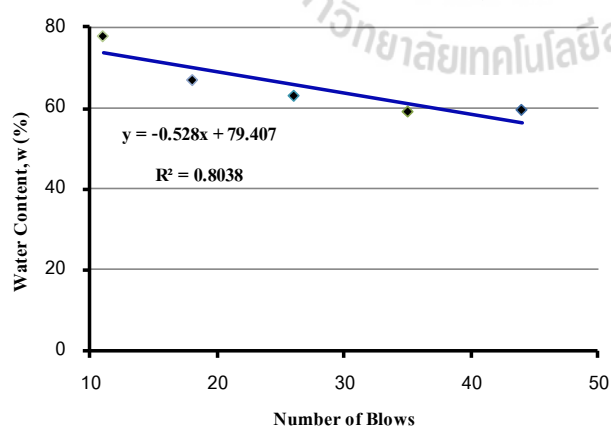
The graph plots 'Wt. of Flask + water, gm' on the y-axis (ranging from 649 to 653) against 'Temperature, °C' on the x-axis (ranging from 20 to 40). Six data points are plotted, showing a clear downward linear trend. A blue line of best fit is drawn through the points, with the equation $y = -0.171x + 656.518$ and $R^2 = 0.987$ displayed on the graph.

Temperature (°C)	Wt. of Flask + water (gm)
20	652.9
25	652.3
30	651.6
35	650.6
40	649.5

Specific Gravity of Soil Solid						
No.	Description	1 st	2 nd	3 rd	Average	Remark
1	Temperature, t °C	29	27	31	29	
2	Weight of Flask + Water + Soil, W ₁ gm.	682.4	682.3	681.9	682.2	
3	Weight of Flask + Water (Calib.), W ₂ gm.	651.6	651.9	651.2	651.6	
4	Container No.	1	2	3		
5	Weight of Dry soil + Container gm.	193.6	436.8	652.3	427.6	
6	Weight of Container gm.	144.9	389.9	605.5	380.1	
7	Weight of Dry soil, W _s gm.	48.7	46.9	46.8	47.5	
8	Sp.gr of Water at t, °C G _T	0.996	0.997	0.995	0.996	
9	Sp.gr of Soil = (7 x 8) / (3+7-2)	2.72	2.83	2.89	2.81	
10	G _s	2.81				

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ PI ของดินเหนียวดานเกวียน

Description		Plastic Limit		Natural Water Content	
Container No.		S1	S2	S3	S4
Weight of Wet Soil + Container		44.49	42.92	217.68	205.34
Weight of Dry Soil + Container		41.48	40.46	208.56	197.21
Weight of Water		3.01	2.46	9.12	8.13
Weight of Container		34.89	32.95	32.71	32.24
Weight of Dry soil		6.59	7.51	175.85	164.97
Water Content, w		45.68	32.76	5.19	4.93
Average		39.22		5.06	
Liquid Limit					
Number of Blows	44	35	26	18	11
Container No.	P1	P2	P3	P4	P5
Weight of Wet Soil + Container	204.28	250.06	205.07	245.31	220.25
Weight of Dry Soil + Container	140.49	171.12	137.63	159.95	140.53
Weight of Water	63.79	78.94	67.44	85.36	79.72
Weight of Container	33.1	37.41	30.41	32.82	38.07
Weight of Dry soil	107.39	133.71	107.22	127.13	102.46
Water Content, w	59.40	59.04	62.90	67.14	77.81



Liquid Limit, W_L 66.21 %

Plastic Limit, W_P 39.22 %

Water Content, W_N 5.06 %

Plastic Index, PI 26.99 %

Liquidity Index, LI -

Remark ;

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยแม่เมาะ

Description	Test No.		
	1	2	Average
Initial flask reading, ml	0.90	0.40	0.65
Initial kerosene temperature, °C	29.00	29.00	29.00
Initial weight of sample and pan, gm	470.80	470.60	470.70
Final flask reading, ml	21.80	21.10	21.45
Final kerosene temperature, °C	28.80	28.50	28.65
Final weight of sample and pan, gm	422.70	421.70	422.20
Weight of sample used, (Wc) gm	48.10	48.90	48.50
Volume displaced, (Vc) ml	20.90	20.70	20.80
Density of water at temperature, (R) gm/cm ³	1.00	1.00	1.00
Specific gravity, SP.GR = Wc/(Vc*R)	2.31	2.37	2.34

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

Description	Test No.		
	1	2	Average
Initial flask reading, ml	0.75	0.50	0.63
Initial kerosene temperature, °C	29.00	29.00	29.00
Initial weight of sample and pan, gm	410.20	410.20	410.20
Final flask reading, ml	21.90	21.00	21.45
Final kerosene temperature, °C	29.00	29.00	29.00
Final weight of sample and pan, gm	368.00	368.50	368.25
Weight of sample used, (Wc) gm	42.20	41.70	41.95
Volume displaced, (Vc) ml	21.15	20.50	20.83
Density of water at temperature, (R) gm/cm ³	1.00	1.00	1.00
Specific gravity, SP.GR = Wc/(Vc*R)	2.00	2.04	2.02

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวด้านเกวียนบดละเอียด

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m ³)	0.003	0.003	0.00
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	6.81	6.83	6.82
Weight of Sample alone (kg)	3.84	3.86	3.85
Unit Weight of Sample, $\rho = (G-T)/V$ (kg/m ³)	1299.05	1303.82	1301.44

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของถ้ำลอยแม่เมาะ

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m ³)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	6.79	6.84	6.82
Weight of Sample alone (kg)	3.82	3.86	3.84
Unit Weight of Sample, $\rho = (G-T)/V$ (kg/m ³)	1293.64	1305.51	1299.57

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m^3)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	4.45	4.42	4.44
Weight of Sample alone (kg)	1.49	1.44	1.46
Unit Weight of Sample, $\rho = (G-T)/V$ (kg/m^3)	502.37	488.00	495.19

ตารางที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของสารเคมีผสมเพิ่ม (Foaming Agent)

Description	Test No.		
	1	2	Average
Weight of Measuring Cylinder, T (kg)	2.97	2.98	2.97
Weight of Cylinder and Water (kg)	5.92	5.94	5.93
Weight of Water (kg)	2.96	2.96	2.96
Volume of Measuring Cylinder, V (m^3)	0.003	0.003	0.003
Weight of Cylinder + Sample, G (kg)	3.12	3.13	3.12
Weight of Sample alone (kg)	0.15	0.15	0.15
Unit Weight of Sample, $\rho = (G-T)/V$ (kg/m^3)	50.07	51.03	50.55

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ การหดตัว
เชิงปริมาตรรวมแบบชื้นและแบบแห้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	18.20	10.13	5.69	1.96	57.64	120	2.08	2.12
2	7	17.83	10.20	5.40	1.94	55.08	100	1.82	
3	7	18.47	10.11	5.60	1.98	103.43	240	2.32	
4	7	18.70	10.38	5.59	2.05	104.53	230	2.20	
5	7	18.13	10.00	5.27	1.88	181.30	390	2.15	
6	7	17.96	9.83	5.35	1.85	176.55	380	2.15	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	17.62	10.24	5.40	1.92	55.30	230	4.16	4.28
2	28	18.29	10.48	5.52	2.04	57.85	210	3.63	
3	28	18.02	10.25	5.48	2.00	98.75	420	4.25	
4	28	17.72	10.18	5.41	1.96	95.87	400	4.17	
5	28	17.77	10.09	5.39	1.94	179.30	860	4.80	
6	28	17.63	10.02	5.36	1.86	176.65	820	4.64	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	17.55	9.98	5.30	1.81	52.89	580	10.97	11.01
2	60	17.67	10.02	5.30	1.83	53.11	560	10.54	
3	60	17.44	10.12	5.36	1.84	93.48	1120	11.98	
4	60	17.50	10.00	5.34	1.81	93.45	980	10.49	
5	60	17.62	9.70	5.28	1.83	170.91	1980	11.58	
6	60	17.62	10.15	5.35	1.87	178.84	1880	10.51	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL+5CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.00	11.82	6.19	2.47	73.17	230	3.14	3.66
2	7	20.90	11.93	6.32	2.54	75.40	240	3.18	
3	7	20.96	12.04	6.30	2.58	132.05	340	2.57	
4	7	20.45	11.90	6.19	2.42	126.59	530	4.19	
5	7	20.43	11.87	6.15	2.39	242.50	1210	4.99	
6	7	20.52	12.00	6.27	2.46	246.24	960	3.90	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.60	12.05	6.24	2.45	75.19	250	3.32	4.10
2	28	20.76	11.85	6.41	2.48	75.96	270	3.55	
3	28	20.62	11.83	6.20	2.35	127.84	480	3.75	
4	28	20.65	11.99	6.30	2.43	130.10	560	4.30	
5	28	20.82	11.96	6.30	2.50	249.01	1210	4.86	
6	28	20.75	11.81	6.34	2.47	245.06	1170	4.77	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.44	11.60	6.20	2.18	71.92	380	5.28	5.40
2	60	20.74	10.94	6.30	2.36	68.92	380	5.51	
3	60	20.36	11.74	6.14	2.20	125.01	760	6.08	
4	60	20.16	11.65	6.12	2.18	123.38	800	6.48	
5	60	20.40	11.68	6.20	2.17	238.27	1580	6.63	
6	60	20.20	11.79	6.23	2.19	238.16	1600	6.72	

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL0FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.99	12.01	6.38	2.56	76.62	200	2.61	2.69
2	7	20.66	11.72	6.26	2.43	73.37	180	2.45	
3	7	20.78	11.94	6.28	2.47	130.50	370	2.84	
4	7	20.68	12.20	6.30	2.48	130.28	390	2.99	
5	7	20.97	12.00	6.36	2.54	251.64	690	2.74	
6	7	20.62	11.87	6.27	2.44	244.76	610	2.49	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.05	11.90	6.36	2.49	75.68	250	3.30	3.40
2	28	20.98	11.91	6.30	2.43	75.03	270	3.60	
3	28	20.97	11.92	6.40	2.48	134.21	410	3.05	
4	28	20.72	11.84	6.30	2.39	130.54	430	3.29	
5	28	21.07	11.86	6.44	2.49	249.89	870	3.48	
6	28	20.89	11.80	6.40	2.44	246.50	910	3.69	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.06	11.79	6.40	2.48	75.46	330	4.37	4.33
2	60	21.04	10.84	6.40	2.54	69.38	300	4.32	
3	60	20.75	11.80	6.29	2.33	130.52	570	4.37	
4	60	20.92	11.70	6.36	2.46	133.05	510	3.83	
5	60	20.65	11.63	6.22	2.28	240.16	1130	4.71	
6	60	20.80	11.76	6.27	2.46	244.61	1070	4.37	

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 90DCL10FA+5CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.23	12.09	6.50	2.52	78.59	260	3.31	3.35
2	7	21.07	12.07	6.36	2.45	76.77	220	2.87	
3	7	21.09	12.30	6.46	2.55	136.24	430	3.16	
4	7	21.18	12.30	6.42	2.50	135.98	380	2.79	
5	7	20.98	12.21	6.40	2.42	256.17	1080	4.22	
6	7	21.02	11.87	6.49	2.40	249.51	940	3.77	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.15	12.10	6.39	2.95	77.32	290	3.75	4.21
2	28	21.04	11.98	6.30	2.37	75.47	310	4.11	
3	28	21.11	11.92	6.39	2.44	134.89	570	4.23	
4	28	21.21	12.03	6.50	2.51	137.87	550	3.99	
5	28	21.00	12.00	6.39	2.37	252.00	1140	4.52	
6	28	21.12	12.13	6.40	2.51	256.19	1190	4.65	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.39	12.10	6.43	2.54	77.80	400	5.14	5.08
2	60	21.10	12.05	6.36	2.49	76.64	410	5.35	
3	60	21.20	12.24	6.38	2.55	135.26	690	5.10	
4	60	21.00	12.08	6.34	2.43	133.14	660	4.96	
5	60	21.22	12.06	6.39	2.53	255.91	1260	4.92	
6	60	21.16	12.10	6.40	2.51	256.04	1280	5.00	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 80DCL20FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.53	12.06	6.30	2.23	75.98	270	3.55	3.74
2	7	20.50	12.05	6.21	2.28	74.83	280	3.74	
3	7	20.53	12.04	6.28	2.30	128.93	520	4.03	
4	7	20.52	12.10	6.25	2.30	128.25	540	4.21	
5	7	20.60	12.08	6.15	2.29	248.85	840	3.38	
6	7	20.56	12.18	6.34	2.34	250.42	880	3.51	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.01	12.20	6.38	2.35	77.84	340	4.37	5.04
2	28	21.17	12.40	6.42	2.44	79.61	330	4.15	
3	28	21.13	12.16	6.49	2.41	137.13	660	4.81	
4	28	20.95	12.23	6.30	2.40	131.99	620	4.70	
5	28	21.28	12.25	6.44	2.41	260.68	1570	6.02	
6	28	21.16	12.34	6.43	2.37	261.11	1610	6.17	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.18	12.50	6.50	2.31	81.25	690	8.49	8.91
2	60	21.27	12.20	6.44	2.38	78.57	630	8.02	
3	60	21.34	12.32	6.44	2.33	137.43	1250	9.10	
4	60	21.28	12.50	6.46	2.40	137.47	1270	9.24	
5	60	21.40	12.35	6.48	2.42	264.29	2420	9.16	
6	60	21.28	12.50	6.50	2.46	266.00	2520	9.47	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 70DCL30FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.17	12.20	6.40	2.12	78.08	320	4.10	4.11
2	7	21.26	12.35	6.48	2.22	80.03	290	3.62	
3	7	21.28	12.40	6.49	2.25	138.11	610	4.42	
4	7	21.27	12.50	6.50	2.27	138.26	580	4.20	
5	7	21.36	12.47	6.40	2.29	266.36	1020	3.83	
6	7	21.40	12.40	6.50	2.33	265.36	1200	4.52	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.32	12.50	6.41	2.16	80.13	790	9.86	9.10
2	28	21.31	12.40	6.44	2.34	79.86	700	8.77	
3	28	21.28	12.47	6.44	2.27	137.04	1120	8.17	
4	28	21.32	12.28	6.49	2.10	138.37	1250	9.03	
5	28	21.24	12.25	6.45	2.41	260.19	2420	9.30	
6	28	21.20	12.35	6.47	2.34	261.82	2480	9.47	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.35	12.40	6.47	2.38	80.23	980	12.22	12.15
2	60	21.30	12.50	6.41	2.54	80.13	940	11.73	
3	60	21.32	12.50	6.50	2.53	138.58	1600	11.55	
4	60	21.30	12.47	6.50	2.48	138.45	1650	11.92	
5	60	21.36	12.40	6.45	2.40	264.86	3330	12.57	
6	60	21.35	12.35	6.50	2.49	263.67	3400	12.89	

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 60DCL40FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.46	12.46	6.50	2.49	80.99	340	4.20	4.33
2	7	21.43	12.43	6.45	2.41	80.17	370	4.61	
3	7	21.34	12.23	6.45	2.46	137.64	550	4.00	
4	7	21.43	12.33	6.45	2.48	138.22	580	4.20	
5	7	21.40	12.31	6.50	2.51	263.43	1210	4.59	
6	7	21.45	12.50	6.50	2.57	268.13	1180	4.40	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.47	12.50	6.50	2.45	81.25	800	9.85	10.03
2	28	21.50	12.50	6.50	2.51	81.25	850	10.46	
3	28	21.45	12.44	6.48	2.42	139.00	1290	9.28	
4	28	21.40	12.49	6.48	2.46	138.67	1420	10.24	
5	28	21.50	12.32	6.50	2.47	264.88	2590	9.78	
6	28	21.40	12.39	6.50	2.36	265.15	2810	10.60	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.30	12.32	6.38	2.15	78.60	1360	17.30	17.16
2	60	21.40	12.34	6.45	2.23	79.59	1430	17.97	
3	60	21.40	12.37	6.38	2.23	136.53	2250	16.48	
4	60	21.40	12.40	6.50	2.29	139.10	2310	16.61	
5	60	21.23	12.20	6.40	2.22	259.01	4470	17.26	
6	60	21.36	12.40	6.48	2.26	264.86	4590	17.33	

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL+10CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.94	12.15	6.37	2.54	77.40	260	3.36	3.65
2	7	20.82	11.93	6.37	2.51	75.99	290	3.82	
3	7	20.85	12.32	6.36	2.57	132.61	470	3.54	
4	7	20.93	12.46	6.45	2.57	135.00	470	3.48	
5	7	20.98	12.50	6.40	2.61	262.25	990	3.78	
6	7	21.11	12.26	6.40	2.63	258.81	1010	3.90	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.02	11.90	6.14	2.29	73.07	880	12.04	12.67
2	28	20.30	11.91	6.15	2.25	73.25	890	12.15	
3	28	21.04	12.02	6.22	2.33	130.87	1540	11.77	
4	28	20.36	12.05	6.18	2.23	125.82	1500	11.92	
5	28	20.90	11.87	6.10	2.24	248.08	3830	15.44	
6	28	20.15	11.83	6.10	2.19	238.37	3030	12.71	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.54	11.98	6.21	2.32	74.40	1340	18.01	17.96
2	60	20.39	11.77	6.18	2.27	72.74	1270	17.46	
3	60	20.33	12.03	6.24	2.28	126.86	2070	16.32	
4	60	20.39	11.90	6.20	2.25	126.42	2140	16.93	
5	60	20.14	10.98	6.13	2.15	221.14	4340	19.63	
6	60	20.07	11.73	6.10	2.11	235.42	4570	19.41	

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL0FA+10CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.06	12.07	6.43	2.57	77.61	240	3.09	3.62
2	7	21.00	12.13	6.35	2.50	77.03	300	3.89	
3	7	21.00	11.96	6.46	2.54	135.66	480	3.54	
4	7	21.04	12.05	6.40	2.54	134.66	460	3.42	
5	7	21.14	12.14	6.38	2.55	256.64	960	3.74	
6	7	20.98	12.07	6.34	2.48	253.23	1030	4.07	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.09	12.00	6.37	2.41	76.44	450	5.89	4.94
2	28	21.19	12.00	6.50	2.57	78.00	400	5.13	
3	28	21.10	12.04	6.44	2.54	135.88	540	3.97	
4	28	21.24	12.22	6.39	2.54	135.72	580	4.27	
5	28	21.10	12.04	6.43	2.51	254.04	1250	4.92	
6	28	21.12	12.10	6.35	2.44	255.55	1390	5.44	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.65	11.83	6.20	2.17	73.35	920	12.54	11.69
2	60	20.93	11.98	6.38	2.29	76.43	860	11.25	
3	60	21.98	11.95	6.35	2.33	139.57	1300	9.31	
4	60	21.14	12.14	6.44	2.40	136.14	1400	10.28	
5	60	21.05	11.96	6.40	2.37	251.76	3060	12.15	
6	60	21.06	12.17	6.34	2.37	256.30	3740	14.59	

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 90DCL10FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.31	12.20	6.50	2.59	79.30	260	3.28	3.29
2	7	21.36	12.18	6.49	2.62	79.05	240	3.04	
3	7	21.24	12.06	6.40	2.53	135.94	450	3.31	
4	7	21.27	11.96	6.46	2.58	137.40	450	3.28	
5	7	21.39	12.15	6.46	2.60	259.89	850	3.27	
6	7	21.34	12.44	6.50	2.67	265.47	950	3.58	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.17	12.01	6.50	2.56	78.07	400	5.12	5.20
2	28	21.29	12.11	6.50	2.56	78.72	380	4.83	
3	28	21.35	12.17	6.44	2.56	137.49	710	5.16	
4	28	21.44	12.06	6.50	2.55	139.36	720	5.17	
5	28	21.28	12.07	6.45	2.53	256.85	1380	5.37	
6	28	21.40	12.10	6.47	2.60	258.94	1430	5.52	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.14	12.08	6.50	2.30	78.52	1120	14.26	13.67
2	60	21.17	12.03	6.47	2.41	77.83	910	11.69	
3	60	21.09	12.28	6.38	2.36	134.55	1990	14.79	
4	60	21.05	12.03	6.43	2.30	135.35	1830	13.52	
5	60	21.27	12.14	6.40	2.42	258.22	3680	14.25	
6	60	21.24	12.25	6.48	2.50	260.19	3520	13.53	

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 80DCL20FA+10CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.24	12.48	6.45	2.53	80.50	340	4.22	3.90
2	7	21.3	12.48	6.46	2.56	80.62	320	3.97	
3	7	21.36	12.29	6.50	2.52	138.84	580	4.18	
4	7	21.38	12.5	6.48	2.56	138.54	520	3.75	
5	7	21.34	12.33	6.50	2.57	263.12	1030	3.91	
6	7	21.15	12.47	6.48	2.52	263.74	890	3.37	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.20	12.50	6.36	2.50	79.50	460	5.79	5.65
2	28	21.20	12.50	6.40	2.56	80.00	470	5.88	
3	28	21.32	12.50	6.46	2.56	137.73	720	5.23	
4	28	21.10	12.50	6.40	2.46	135.04	710	5.26	
5	28	21.32	12.50	6.50	2.52	266.50	1530	5.74	
6	28	21.24	12.15	6.40	2.34	258.07	1550	6.01	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.89	12.04	6.29	2.07	75.73	1030	13.60	14.78
2	60	21.05	12.34	6.38	2.20	78.73	1020	12.96	
3	60	21.10	12.30	6.35	2.25	133.99	1890	14.11	
4	60	21.10	12.30	6.35	2.23	133.99	1940	14.48	
5	60	21.17	12.45	6.47	2.39	263.57	4620	17.53	
6	60	21.11	12.17	6.35	2.23	256.91	4120	16.04	

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 70DCL30FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.95	12.20	6.46	2.411	78.812	300	3.81	3.97
2	7	21.02	12.24	6.45	2.429	78.948	290	3.67	
3	7	21.00	12.50	6.47	2.473	135.870	560	4.12	
4	7	21.00	12.30	6.34	2.423	133.140	580	4.36	
5	7	21.02	12.42	6.33	2.430	261.068	1010	3.87	
6	7	20.96	12.49	6.40	2.458	261.790	1050	4.01	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.03	12.30	6.49	2.335	79.827	590	7.39	6.54
2	28	21.00	12.30	6.44	2.343	79.212	530	6.69	
3	28	21.16	12.34	6.40	2.341	135.424	810	5.98	
4	28	20.93	12.27	6.45	2.307	134.999	830	6.15	
5	28	21.07	12.44	6.46	2.376	262.111	1680	6.41	
6	28	21.22	12.36	6.40	2.354	262.279	1730	6.60	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.02	12.30	6.38	2.157	78.474	1320	16.82	16.23
2	60	21.00	12.02	6.40	2.221	76.928	1230	15.99	
3	60	20.96	12.28	6.39	2.189	133.934	2060	15.38	
4	60	20.93	12.30	6.40	2.109	133.952	1940	14.48	
5	60	21.14	12.45	6.46	2.27	263.193	4620	17.55	
6	60	21.02	12.25	6.38	2.259	257.495	4420	17.17	

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 60DCL40FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.12	12.15	6.36	2.40	77.27	410	5.31	4.57
2	7	21.16	12.30	6.37	2.43	78.35	360	4.59	
3	7	21.08	12.33	6.38	2.46	134.49	530	3.94	
4	7	21.19	12.40	6.43	2.51	136.25	570	4.18	
5	7	21.13	12.24	6.44	2.51	258.63	1260	4.87	
6	7	21.10	12.17	6.49	2.41	256.79	1160	4.52	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.17	12.50	6.50	2.43	81.25	620	7.63	7.17
2	28	21.15	12.31	6.45	2.41	79.40	640	8.06	
3	28	21.17	12.27	6.44	2.35	136.33	920	6.75	
4	28	21.16	12.44	6.45	2.40	136.48	940	6.89	
5	28	21.13	12.45	6.41	2.28	263.07	1810	6.88	
6	28	21.27	12.40	6.40	2.39	263.75	1790	6.79	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.97	12.23	6.37	2.15	77.91	1690	21.69	21.99
2	60	21.20	12.40	6.50	2.32	80.60	1710	21.22	
3	60	21.14	12.23	6.45	2.25	136.35	2940	21.56	
4	60	20.97	12.17	6.33	2.22	132.74	2920	22.00	
5	60	20.88	12.15	6.30	2.06	253.69	5720	22.55	
6	60	20.96	12.23	6.34	2.10	256.34	5880	22.94	

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL+15CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.85	12.30	6.30	2.47	77.49	290	3.74	4.21
2	7	20.80	12.10	6.35	2.48	76.84	310	4.03	
3	7	20.81	12.20	6.35	2.42	132.14	630	4.77	
4	7	20.85	12.15	6.40	2.53	133.44	540	4.05	
5	7	20.65	11.90	6.34	2.32	245.74	1090	4.44	
6	7	20.80	12.30	6.38	2.36	255.84	1090	4.26	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.38	11.85	6.18	2.10	73.23	640	8.74	9.05
2	28	20.37	11.73	6.19	2.10	72.61	680	9.37	
3	28	20.47	12.05	6.17	2.14	126.30	1270	10.06	
4	28	20.39	11.70	6.15	2.03	125.40	1350	10.77	
5	28	20.43	12.08	6.10	2.04	246.79	2780	11.26	
6	28	20.40	12.02	6.19	2.13	245.21	2770	11.30	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.49	11.99	6.18	2.22	74.10	1050	14.17	14.08
2	60	20.36	11.79	6.18	2.15	72.86	1020	14.00	
3	60	20.36	12.00	6.03	2.08	122.77	1660	13.52	
4	60	20.63	12.20	6.19	2.29	127.70	1680	13.16	
5	60	20.69	12.12	6.28	2.30	250.76	3680	14.68	
6	60	20.38	11.93	6.10	2.18	243.13	3790	15.59	

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL0FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.78	11.95	6.25	2.39	74.69	230	3.08	2.83
2	7	20.90	12.07	6.27	2.47	75.68	210	2.77	
3	7	20.88	12.13	6.37	2.49	133.01	410	3.08	
4	7	20.85	11.97	6.27	2.44	130.73	380	2.91	
5	7	20.98	12.10	6.45	2.53	253.86	590	2.32	
6	7	20.98	12.10	6.37	2.46	253.86	720	2.84	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.06	12.20	6.46	2.39	78.81	290	3.68	4.24
2	28	20.84	12.00	6.37	2.28	76.44	300	3.92	
3	28	20.96	12.20	6.40	2.39	134.14	360	2.68	
4	28	21.09	12.05	6.45	2.39	136.03	400	2.94	
5	28	20.92	12.00	6.38	2.33	251.04	1530	6.09	
6	28	20.97	12.03	6.30	2.30	252.27	1550	6.14	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.17	12.27	6.39	2.35	78.41	550	7.01	7.54
2	60	21.23	12.27	6.48	2.34	79.51	520	6.54	
3	60	20.91	11.95	6.32	2.19	132.15	950	7.19	
4	60	20.96	11.98	6.31	2.26	132.26	980	7.41	
5	60	21.22	12.11	6.41	2.39	256.97	2050	7.98	
6	60	21.07	12.21	6.38	2.30	257.26	2350	9.13	

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 90DCL10FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.78	12.28	6.30	2.398	77.36	220	2.84	3.44
2	7	20.79	12.27	6.32	2.414	77.55	250	3.22	
3	7	21.00	12.19	6.35	2.480	133.35	460	3.45	
4	7	20.75	12.18	6.30	2.395	130.73	450	3.44	
5	7	20.90	12.03	6.40	2.436	251.43	920	3.66	
6	7	20.95	12.10	6.37	2.435	253.50	1020	4.02	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.15	12.02	6.48	2.414	77.89	380	4.88	5.34
2	28	21.22	12.30	6.37	2.532	78.35	370	4.72	
3	28	20.90	12.26	6.34	2.484	132.51	550	4.15	
4	28	21.17	12.30	6.50	2.567	137.61	590	4.29	
5	28	21.20	12.34	6.33	2.506	261.61	1810	6.92	
6	28	21.10	12.18	6.38	2.479	257.00	1820	7.08	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.98	12.42	6.34	2.242	78.74	620	7.87	9.26
2	60	21.13	12.26	6.45	2.235	79.08	620	7.84	
3	60	20.95	12.35	6.31	2.213	132.19	1020	7.72	
4	60	20.91	12.12	6.33	2.216	132.36	980	7.40	
5	60	20.96	12.24	6.43	2.195	256.55	2940	11.46	
6	60	20.77	12.05	6.42	2.094	250.28	3320	13.27	

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 80DCL20FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.72	11.97	6.33	2.42	75.77	220	2.90	2.92
2	7	20.77	12.02	6.33	2.46	76.09	230	3.02	
3	7	20.77	12.14	6.34	2.46	131.68	360	2.73	
4	7	21.00	12.04	6.33	2.54	132.93	350	2.63	
5	7	20.76	12.00	6.28	2.45	249.12	760	3.05	
6	7	20.71	11.96	6.34	2.42	247.69	790	3.19	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.17	12.35	6.50	2.64	80.28	320	3.99	4.52
2	28	21.20	12.30	6.40	2.60	78.72	340	4.32	
3	28	21.28	12.32	6.40	2.62	136.19	620	4.55	
4	28	21.16	12.10	6.42	2.54	135.85	660	4.86	
5	28	20.97	12.14	6.37	2.50	254.58	1280	5.03	
6	28	21.15	12.28	6.38	2.56	259.72	1140	4.39	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.89	12.33	6.28	2.24	77.43	870	11.24	12.33
2	60	21.00	12.22	6.42	2.43	78.45	920	11.73	
3	60	20.90	12.17	6.40	2.27	133.76	1670	12.49	
4	60	21.15	12.34	6.50	2.48	137.48	1660	12.07	
5	60	21.27	12.27	6.48	2.46	260.98	3340	12.80	
6	60	21.20	12.24	6.50	2.40	259.49	3540	13.64	

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 70DCL30FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.21	12.27	6.40	2.44	78.53	360	4.58	4.33
2	7	21.18	12.20	6.45	2.45	78.69	320	4.07	
3	7	21.45	12.07	6.36	2.38	136.42	560	4.10	
4	7	21.26	12.27	6.40	2.47	136.06	530	3.90	
5	7	21.16	12.23	6.43	2.48	258.79	900	3.48	
6	7	21.18	12.48	6.47	2.50	264.33	910	3.44	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.20	12.30	6.38	2.45	78.47	410	5.22	5.80
2	28	21.30	12.30	6.50	2.58	79.95	470	5.88	
3	28	21.29	12.36	6.43	2.59	136.89	660	4.82	
4	28	21.24	12.13	6.40	2.42	135.94	680	5.00	
5	28	21.24	12.45	6.40	2.55	264.44	1730	6.54	
6	28	21.23	12.20	6.50	2.47	259.01	1900	7.34	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.20	12.34	6.40	2.34	78.98	1150	14.56	15.74
2	60	21.09	12.40	6.42	2.24	79.61	1100	13.82	
3	60	21.28	12.28	6.50	2.42	138.32	1860	13.45	
4	60	21.18	12.19	6.50	2.36	137.67	1790	13.00	
5	60	21.10	12.20	6.50	2.29	257.42	5100	19.81	
6	60	21.20	12.28	6.49	2.37	260.34	5150	19.78	

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 60DCL40FA+15CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.20	12.20	6.46	2.45	78.81	320	4.06	3.94
2	7	21.24	12.43	6.41	2.48	79.68	310	3.89	
3	7	21.17	12.29	6.40	2.46	135.49	520	3.84	
4	7	21.30	12.40	6.43	2.49	136.96	510	3.72	
5	7	21.30	12.40	6.50	2.49	264.12	1040	3.94	
6	7	21.30	12.23	6.43	2.46	260.50	1090	4.18	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.27	12.50	6.47	2.34	80.88	740	9.15	9.46
2	28	21.27	12.26	6.50	2.40	79.69	760	9.54	
3	28	21.18	12.17	6.39	2.30	135.34	1200	8.87	
4	28	21.27	12.39	6.40	2.40	136.13	1170	8.59	
5	28	21.30	12.43	6.50	2.44	264.76	2780	10.50	
6	28	21.17	12.36	6.40	2.33	261.66	2650	10.13	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.11	12.34	6.42	2.21	79.22	1840	23.23	24.43
2	60	21.31	12.41	6.50	2.26	80.67	1880	23.31	
3	60	21.42	12.22	6.45	2.22	138.16	3260	23.60	
4	60	21.23	12.31	6.50	2.33	138.00	3390	24.57	
5	60	21.31	12.50	6.44	2.29	266.38	6780	25.45	
6	60	21.13	12.22	6.42	2.21	258.21	6820	26.41	

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL+20CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.95	12.37	6.42	2.62	79.42	260	3.27	4.74
2	7	20.90	12.16	6.37	2.61	77.46	250	3.23	
3	7	20.60	12.10	6.34	2.54	130.60	490	3.75	
4	7	20.58	12.20	6.36	2.52	130.89	480	3.67	
5	7	20.66	12.10	6.39	2.51	249.99	1860	7.44	
6	7	20.91	12.36	6.36	2.63	258.45	1830	7.08	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.57	12.05	6.33	2.43	76.28	1160	15.21	15.65
2	28	20.65	11.75	6.33	2.46	74.38	820	11.02	
3	28	20.5	11.78	6.21	2.39	127.31	2080	16.34	
4	28	20.47	11.73	6.27	2.41	128.35	2110	16.44	
5	28	20.75	12.02	6.26	2.47	249.42	4310	17.28	
6	28	20.57	11.8	6.26	2.38	242.73	4280	17.63	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.33	11.64	6.20	2.32	72.17	1860	25.77	19.72
2	60	20.69	11.85	6.36	2.48	75.37	1500	19.90	
3	60	20.72	11.95	6.42	2.49	133.02	2070	15.56	
4	60	20.63	11.82	6.21	2.48	128.11	2090	16.31	
5	60	20.82	12.00	6.34	2.55	249.84	5070	20.29	
6	60	20.74	11.97	6.37	2.45	248.26	5090	20.50	

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 100DCL0F+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.00	12.25	6.33	2.53	77.54	120	1.55	2.05
2	7	21.04	12.16	6.36	2.51	77.34	140	1.81	
3	7	20.97	12.20	6.30	2.55	132.11	240	1.82	
4	7	20.86	12.04	6.29	2.54	131.21	260	1.98	
5	7	20.90	12.07	6.40	2.54	252.26	640	2.54	
6	7	20.92	12.15	6.45	2.52	254.18	660	2.60	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.87	12.15	6.40	2.43	77.76	400	5.14	5.69
2	28	20.87	12.15	6.38	2.48	77.52	400	5.16	
3	28	20.70	12.02	6.30	2.40	130.41	730	5.60	
4	28	20.83	12.12	6.28	2.41	130.81	740	5.66	
5	28	20.84	12.17	6.34	2.48	253.62	1610	6.35	
6	28	20.94	12.32	6.34	2.48	257.98	1610	6.24	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.78	12.04	6.36	2.40	76.57	780	10.19	11.28
2	60	20.92	12.12	6.34	2.43	76.84	840	10.93	
3	60	20.86	12.12	6.35	2.45	132.46	1400	10.57	
4	60	21.06	12.09	6.34	2.54	133.52	1500	11.23	
5	60	20.99	12.05	6.26	2.41	252.93	3110	12.30	
6	60	20.97	12.23	6.43	2.48	256.46	3200	12.48	

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 90DCL10F+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.25	11.76	6.18	2.216	72.68	230	3.16	3.08
2	7	20.52	11.90	6.37	2.365	75.80	280	3.69	
3	7	20.44	11.78	6.20	2.284	126.73	370	2.92	
4	7	20.58	11.93	6.23	2.389	128.21	330	2.57	
5	7	20.60	11.88	6.25	2.387	244.73	690	2.82	
6	7	20.60	11.95	6.23	2.357	246.17	820	3.33	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.92	12.17	6.45	2.522	78.50	340	4.33	5.28
2	28	20.96	12.25	6.44	2.412	78.89	370	4.69	
3	28	20.96	12.26	6.33	2.452	132.68	790	5.95	
4	28	20.76	12.24	6.26	2.395	129.96	790	6.08	
5	28	20.99	12.28	6.34	2.483	257.76	1350	5.24	
6	28	20.88	12.29	6.32	2.470	256.62	1390	5.42	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.91	12.14	6.35	2.384	77.09	750	9.73	10.44
2	60	20.44	11.91	6.33	2.177	75.39	730	9.68	
3	60	20.44	11.89	6.29	2.143	128.57	1100	8.56	
4	60	20.57	12.06	6.25	2.188	128.56	1040	8.09	
5	60	20.75	12.07	6.35	2.237	250.45	3170	12.66	
6	60	20.42	11.98	6.28	2.067	244.63	3400	13.90	

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 80DCL20F+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	20.99	12.36	6.40	2.55	79.10	230	2.91	2.77
2	7	20.93	12.26	6.36	2.50	77.97	220	2.82	
3	7	20.80	12.20	6.40	2.50	133.12	350	2.63	
4	7	20.97	12.32	6.35	2.55	133.16	330	2.48	
5	7	20.85	12.20	6.44	2.53	254.37	720	2.83	
6	7	20.94	12.30	6.36	2.54	257.56	760	2.95	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	20.89	12.28	6.33	2.22	77.73	640	8.23	8.02
2	28	20.74	12.01	6.35	2.17	76.26	690	9.05	
3	28	20.87	12.15	6.40	2.24	133.57	960	7.19	
4	28	20.92	12.31	6.35	2.30	132.84	980	7.38	
5	28	20.95	12.31	6.44	2.42	257.89	2140	8.30	
6	28	20.92	12.23	6.32	2.35	255.85	2040	7.97	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	20.65	11.86	6.11	1.92	72.46	740	10.21	11.95
2	60	20.76	12.25	6.28	2.10	76.93	760	9.88	
3	60	20.69	12.03	6.43	1.97	133.04	1430	10.75	
4	60	20.84	12.34	6.44	2.26	134.21	1420	10.58	
5	60	20.87	12.27	6.32	2.25	256.07	3900	15.23	
6	60	20.79	12.15	6.38	2.13	252.60	3800	15.04	

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 70DCL30F+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.14	12.27	6.43	2.50	78.90	280	3.55	3.08
2	7	21.18	12.23	6.35	2.48	77.66	280	3.61	
3	7	21.14	12.26	6.40	2.53	135.30	410	3.03	
4	7	21.15	12.26	6.50	2.55	137.48	400	2.91	
5	7	21.13	12.26	6.46	2.51	259.05	710	2.74	
6	7	21.18	12.38	6.46	2.53	262.21	690	2.63	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.22	12.17	6.50	2.43	79.11	590	7.46	8.14
2	28	21.40	12.40	6.50	2.39	80.60	560	6.95	
3	28	21.26	12.35	6.43	2.40	136.70	960	7.02	
4	28	21.24	12.28	6.50	2.46	138.06	990	7.17	
5	28	21.26	12.25	6.40	2.45	260.44	2730	10.48	
6	28	21.38	12.39	6.47	2.50	264.90	2580	9.74	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.28	12.25	6.43	2.14	78.77	910	11.55	15.92
2	60	21.25	12.33	6.42	2.17	79.16	970	12.25	
3	60	21.24	12.35	6.46	2.09	137.21	1960	14.28	
4	60	21.14	12.22	6.41	2.12	135.51	1980	14.61	
5	60	21.25	12.35	6.57	2.18	262.44	5360	20.42	
6	60	21.04	12.22	6.35	2.00	257.11	5750	22.36	

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม 60DCL40F+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	7	21.30	12.50	6.50	2.47	81.25	340	4.18	3.87
2	7	21.25	12.45	6.50	2.47	80.93	360	4.45	
3	7	21.20	12.33	6.45	2.47	136.74	440	3.22	
4	7	21.28	12.23	6.43	2.44	136.83	460	3.36	
5	7	21.22	12.50	6.50	2.51	265.25	1070	4.03	
6	7	21.20	12.50	6.40	2.47	265.00	1050	3.96	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	28	21.23	12.50	6.42	2.40	80.25	960	11.96	13.10
2	28	21.18	12.50	6.40	2.29	80.00	1050	13.13	
3	28	21.24	12.50	6.40	2.42	135.94	1240	9.12	
4	28	21.15	12.33	6.47	2.36	136.84	1340	9.79	
5	28	21.28	12.31	6.50	2.39	261.96	4650	17.75	
6	28	21.29	12.47	6.46	2.41	265.49	4470	16.84	

No.	Curing (day)	Dimension (cm)			Weight (kg)	Area (sq.cm)	Loads (kgf)	Stresses (ksc)	Average (ksc)
		A	B	C					
1	60	21.12	12.24	6.41	2.03	78.46	2030	25.87	25.98
2	60	21.26	12.49	6.42	2.13	80.19	2070	25.82	
3	60	21.07	12.41	6.42	2.02	135.27	3190	23.58	
4	60	21.21	12.41	6.46	2.13	137.02	3140	22.92	
5	60	21.16	12.39	6.39	2.09	262.17	7690	29.33	
6	60	21.27	12.49	6.42	2.14	265.66	7540	28.38	

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1916.5	1896.3	47.17	45.46	1904.1	1933.8	50.84	50.80	NA	NA
2	7	1818.1		45.54		1926.5		50.38		NA	
3	7	1954.3		43.66		1970.7		51.08		NA	
4	28	1868.5	1912.3	44.42	40.73	1800.9	1813.4	47.13	46.10	NA	NA
5	28	1943.2		36.57		1814.8		45.57		NA	
6	28	1925.2		41.20		1824.5		45.50		NA	
7	60	1966.5	1950.1	37.40	38.78	1872.0	1859.6	45.04	45.40	NA	NA
8	60	1971.6		40.69		1858.2		45.78		NA	
9	60	1912.1		38.26		1848.4		45.35		NA	

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL+5CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorption (%)	Average (%)
1	7	1630.8	1594.9	13.45	14.33	1377.4	1360.9	26.82	26.65	NA	NA
2	7	1570.3		12.76		1384.3		26.44		NA	
3	7	1583.6		16.78		1321.0		26.68		NA	
4	28	1561.2	1577.0	11.52	11.44	1354.9	1376.4	25.02	25.90	NA	NA
5	28	1580.3		9.90		1401.8		27.07		NA	
6	28	1589.4		12.89		1372.6		26.61		NA	
7	60	1479.0	1486.6	9.63	10.77	1320.3	1297.4	25.56	25.50	NA	NA
8	60	1500.6		11.23		1343.5		25.14		NA	
9	60	1480.3		11.45		1297.4		25.83		NA	

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL0FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorption (%)	Average (%)
1	7	1576.6	1584.6	13.68	13.49	1268.8	1256.7	25.85	25.44	NA	NA
2	7	1601.0		13.83		1255.2		23.64		NA	
3	7	1576.2		12.96		1246.3		26.84		NA	
4	28	1532.6	1551.5	7.75	10.15	1353.2	1347.8	23.96	23.90	NA	NA
5	28	1588.3		10.65		1333.5		24.38		NA	
6	28	1533.6		12.05		1356.6		23.36		NA	
7	60	1552.9	1554.8	7.14	8.76	1380.4	1387.0	20.91	20.05	NA	NA
8	60	1538.7		12.52		1410.0		18.87		NA	
9	60	1572.9		6.61		1370.5		20.36		NA	

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 90DCL10FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorption (%)	Average (%)
1	7	1510.5	1528.5	9.07	7.98	1290.1	1312.2	18.06	19.05	NA	NA
2	7	1529.2		8.41		1331.3		19.14		NA	
3	7	1545.8		6.47		1315.1		19.96		NA	
4	28	1511.9	1490.2	5.20	6.69	1245.4	1236.4	18.65	18.90	NA	NA
5	28	1457.5		7.11		1243.5		19.58		NA	
6	28	1501.2		7.77		1220.2		18.46		NA	
7	60	1476.8	1490.5	7.37	6.40	1286.8	1299.5	18.73	17.90	NA	NA
8	60	1510.7		6.72		1312.4		17.71		NA	
9	60	1484.0		5.12		1299.2		17.27		NA	

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 80DCL20FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorption (%)	Average (%)
1	7	1423.7	1400.9	7.84	7.83	1084.3	1091.7	17.79	17.80	NA	NA
2	7	1433.0		8.24		1110.4		18.69		NA	
3	7	1346.1		7.42		1080.4		16.91		NA	
4	28	1468.1	1476.8	3.08	3.58	1075.9	1077.8	13.59	13.30	NA	NA
5	28	1461.6		3.33		1072.6		13.05		NA	
6	28	1500.7		4.34		1085.0		13.26		NA	
7	60	1455.1	1474.4	2.15	2.96	1200.0	1220.3	10.15	9.88	NA	NA
8	60	1486.7		2.77		1243.4		9.33		NA	
9	60	1481.4		3.97		1217.4		10.16		NA	

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 70DCL30FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1358.8	1307.1	4.40	4.13	1014.5	1012.9	8.75	8.95	25.1	26.5
2	7	1317.0		3.50		1027.7		8.81		27.3	
3	7	1250.6		4.50		996.7		9.30		27.2	
4	28	1408.7	1415.5	3.86	2.81	10169.3	1028.8	10.09	8.22	29.7	28.3
5	28	1423.5		2.50		1046.8		7.25		27.3	
6	28	1414.5		2.06		1023.1		7.32		27.9	
7	60	1436.1	1439.3	2.60	2.56	1208.1	1222.9	7.01	7.44	27.4	26.3
8	60	1457.6		3.02		1206.6		7.48		23.9	
9	60	1424.2		2.07		1253.8		8.74		27.6	

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 60DCL40FA+5CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1450.8	1433.5	0.92	1.53	1182.9	1167.7	5.75	6.21	25.4	26.9
2	7	1440.6		1.04		1162.8		6.19		27.3	
3	7	1409.1		2.63		1157.5		6.70		27.9	
4	28	1415.7	1428.6	1.45	0.99	1209.5	1217.4	3.92	4.53	24.5	24.6
5	28	1433.9		0.88		1240.1		4.32		22.3	
6	28	1436.2		0.64		1202.8		5.35		27.1	
7	60	1327.7	1301.8	0.38	0.57	1044.4	1037.8	3.29	3.71	24.4	26.5
8	60	1313.1		0.53		1041.6		3.14		26.7	
9	60	1264.8		0.81		1027.5		4.70		28.4	

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL+10CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1610.1	1602.0	14.24	14.14	1400.1	1418.2	20.58	21.69	24.6	23.9
2	7	1575.4		14.66		1420.8		21.81		21.7	
3	7	1620.6		13.51		1433.6		22.67		25.3	
4	28	1489.0	1493.9	7.63	10.52	1331.9	1346.3	18.52	18.79	25.1	21.6
5	28	1516.8		13.69		1351.2		20.30		19.2	
6	28	1475.7		10.24		1355.8		17.55		20.6	
7	60	1539.2	1544.3	8.54	9.09	1347.3	1368.3	16.98	17.05	23.1	22.7
8	60	1538.8		9.43		1387.4		17.15		22.8	
9	60	1555.3		9.31		1370.3		17.01		22.3	

ตารางที่ ข.34 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL0FA+10CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1547.4	1556.3	8.70	10.20	1330.6	1344.8	18.44	18.80	22.3	22.2
2	7	1571.4		10.15		1365.4		19.02		21.4	
3	7	1550.0		11.74		1338.4		18.92		22.8	
4	28	1529.4	1524.8	6.57	6.97	1364.5	1371.4	15.87	16.37	21.1	20.0
5	28	1512.2		7.82		1371.9		16.57		19.0	
6	28	1532.7		6.51		1377.8		16.66		19.9	
7	60	1464.6	1456.7	5.10	5.24	1169.6	1186.2	16.03	15.52	25.5	24.8
8	60	1455.8		6.17		1197.2		16.07		24.0	
9	60	1449.7		4.45		1191.6		15.06		25.0	

ตารางที่ ข.35 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 90DCL10FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1549.9	1531.6	4.98	4.64	1366.1	1357.1	10.51	11.40	15.9	16.1
2	7	1529.6		5.11		1381.7		11.09		13.9	
3	7	1515.4		3.84		1323.4		12.60		18.5	
4	28	1535.5	1532.1	3.54	3.90	1306.5	1289.3	9.89	9.64	22.3	24.0
5	28	1532.1		3.58		1302.1		10.47		23.3	
6	28	1528.9		4.58		1259.2		8.56		26.4	
7	60	1463.1	1480.3	3.51	2.82	1241.0	1259.6	9.90	9.50	26.9	25.5
8	60	1487.4		3.24		1281.6		9.14		24.3	
9	60	1490.3		1.69		1256.1		9.15		25.2	

ตารางที่ ข.36 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 80DCL20FA+10CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1462.1	1490.2	2.36	3.26	1296.4	1305.9	10.56	8.59	19.0	18.2
2	7	1523.3		2.59		1351.4		6.17		14.6	
3	7	1485.3		4.81		1270.1		9.03		21.1	
4	28	1488.8	1482.7	2.56	3.22	1266.4	1264.0	7.23	8.23	22.2	22.2
5	28	1504.1		3.74		1306.7		6.76		18.6	
6	28	1455.2		3.35		1218.7		10.69		25.7	
7	60	1420.9	1429.4	3.39	2.61	1172.3	1170.3	7.88	7.97	29.9	27.1
8	60	1428.8		2.35		1181.8		8.57		25.2	
9	60	1442.6		2.09		1156.8		7.48		26.3	

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 70DCL30FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1458.6	1463.8	5.31	5.54	1155.7	1167.0	8.51	9.49	29.6	28.2
2	7	1458.9		6.15		1189.5		10.37		25.5	
3	7	1473.9		4.86		1155.9		9.60		29.3	
4	28	1414.7	1394.3	4.55	5.44	1187.3	1157.4	9.52	9.43	28.7	29.1
5	28	1390.2		6.94		1157.7		9.78		30.8	
6	28	1378.1		5.12		1127.1		8.91		27.9	
7	60	1351.8	1338.0	4.07	4.55	1110.0	1123.8	7.13	8.72	31.7	27.9
8	60	1330.0		5.34		1132.4		9.98		26.1	
9	60	1332.2		4.25		1129.0		9.04		26.0	

ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 60DCL40FA+10CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1480.7	1483.3	5.13	6.23	1196.2	1179.6	9.28	8.77	28.5	28.5
2	7	1486.6		6.85		1193.2		8.62		29.1	
3	7	1482.6		6.70		1149.6		8.39		28.0	
4	28	1405.0	1398.4	5.60	4.49	1223.8	1208.5	7.11	8.72	26.4	27.0
5	28	1408.3		4.48		1216.5		8.44		25.9	
6	28	1381.9		3.37		1185.1		10.63		28.8	
7	60	1339.0	1266.3	3.16	3.14	1102.4	1086.8	6.85	6.24	27.4	28.5
8	60	1283.9		3.71		1094.1		6.29		28.8	
9	60	1175.9		2.54		1063.9		5.59		29.2	

ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL+15CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1542.5	1585.7	12.87	14.08	1209.7	1197.0	19.70	17.47	26.6	27.5
2	7	1588.6		14.62		1172.2		15.27		27.7	
3	7	1626.1		14.75		1209.1		17.43		28.1	
4	28	1473.6	1411.0	14.91	13.93	1250.4	1215.8	15.91	15.65	28.8	29.6
5	28	1413.5		14.23		1183.1		14.03		29.0	
6	28	1346.0		12.66		1213.9		17.01		30.9	
7	60	1328.4	1296.7	12.24	9.45	1349.5	1305.8	16.24	14.51	24.6	26.6
8	60	1291.9		7.45		1295.5		14.47		26.9	
9	60	1269.9		8.67		1272.4		12.83		28.2	

ตารางที่ ข.40 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL0FA+15CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1534.0	1532.5	9.82	8.64	1295.0	1300.9	17.57	16.63	23.5	22.8
2	7	1524.7		7.09		1307.7		15.54		21.3	
3	7	1538.9		9.02		1300.0		16.79		23.5	
4	28	1442.3	1451.0	8.72	6.94	1187.1	1195.0	15.23	13.63	23.5	25.6
5	28	1446.3		6.36		1211.6		13.31		25.7	
6	28	1464.4		5.72		1189.0		12.34		27.6	
7	60	1439.5	1429.4	5.80	6.50	1216.7	1208.4	10.95	12.24	27.2	28.9
8	60	1418.6		7.48		1229.2		13.53		28.7	
9	60	1430.1		6.22		1179.3		12.24		30.9	

ตารางที่ ข.41 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 90DCL10FA+15CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1498.8	1484.6	13.54	9.50	1219.5	1219.4	14.21	14.25	28.3	28.0
2	7	1483.2		4.49		1225.9		13.35		26.7	
3	7	1471.7		10.48		1212.9		15.20		28.9	
4	28	1495.5	1510.3	8.08	8.02	1102.2	1127.1	14.86	12.20	24.7	24.7
5	28	1515.0		6.57		1146.5		9.40		25.3	
6	28	1520.3		9.42		1132.7		12.34		24.1	
7	60	1267.6	1308.8	4.93	5.09	1110.1	1121.0	10.41	11.93	25.9	25.0
8	60	1379.0		5.78		1140.9		14.42		23.7	
9	60	1279.8		4.57		1112.0		4.57		25.6	

ตารางที่ ข.42 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 80DCL20FA+15CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1543.6	1542.6	8.82	8.39	1283.6	1281.6	14.70	14.47	24.2	23.8
2	7	1549.2		9.30		1291.0		14.75		21.8	
3	7	1535.2		7.05		1270.3		13.94		25.4	
4	28	1545.6	1544.6	7.04	6.26	1057.7	1053.0	9.41	9.90	25.5	25.3
5	28	1549.1		4.69		1055.3		8.37		24.9	
6	28	1539.0		7.05		1046.1		11.92		25.4	
7	60	1430.5	1448.0	4.25	4.16	1178.3	1225.0	9.51	9.65	25.7	24.3
8	60	1474.9		3.98		1264.7		10.22		25.5	
9	60	1438.6		4.24		1232.1		9.21		21.6	

ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 70DCL30FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1483.9	1463.4	4.07	5.76	1207.4	1198.2	9.37	9.23	24.0	24.7
2	7	1477.0		6.18		1217.4		9.12		24.4	
3	7	1429.1		7.03		1169.8		9.19		25.5	
4	28	1440.5	1456.1	2.54	3.94	1041.0	1030.9	7.89	7.63	24.1	25.1
5	28	1477.8		4.68		1030.1		7.64		24.8	
6	28	1449.9		4.59		1021.6		7.37		26.3	
7	60	1380.2	1331.9	3.77	3.93	1135.4	1117.2	6.64	7.57	23.8	25.0
8	60	1327.8		4.06		1121.9		8.07		24.4	
9	60	1287.7		3.96		1094.4		8.00		26.9	

ตารางที่ ข.44 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 60DCL40FA+15CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1483.8	1489.3	3.49	3.59	1257.7	1264.4	6.95	6.84	20.3	19.9
2	7	1486.9		3.46		1289.7		6.38		17.6	
3	7	1497.1		3.81		1245.7		7.20		21.8	
4	28	1393.3	1381.5	2.67	3.05	1100.4	1088.2	4.45	4.79	22.0	24.2
5	28	1392.4		2.65		1097.5		5.04		25.7	
6	28	1359.0		3.83		1066.6		4.90		24.9	
7	60	1309.3	1381.0	2.27	2.36	1093.4	1105.3	4.41	4.72	26.2	24.6
8	60	1347.7		2.65		1128.5		4.40		21.7	
9	60	1297.1		2.15		1093.8		5.34		25.9	

ตารางที่ ข.45 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL+20CH-Control อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1601.6	1601.0	11.04	11.32	1247.4	1246.7	16.17	16.64	25.6	25.5
2	7	1620.9		8.78		1245.4		17.09		27.8	
3	7	1580.6		14.16		1247.5		16.68		23.1	
4	28	1575.4	1571.4	10.23	10.21	1363.6	1385.2	16.67	16.63	22.8	22.4
5	28	1558.1		9.50		1406.3		14.33		20.5	
6	28	1580.6		10.88		1385.7		18.88		24.0	
7	60	1597.5	1592.2	5.18	7.17	1399.6	1394.5	12.92	14.84	21.7	21.5
8	60	1584.2		11.54		1382.1		17.51		21.6	
9	60	1594.9		4.78		1401.8		14.10		21.2	

ตารางที่ ข.46 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 100DCL0FA+20CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1581.8	1578.4	9.78	8.86	1398.0	1398.9	17.76	16.78	17.1	16.3
2	7	1580.5		7.85		1410.5		15.82		14.9	
3	7	1572.9		8.78		1388.2		16.77		16.9	
4	28	1515.0	1516.5	8.38	8.49	1167.1	1183.1	15.78	16.23	26.7	25.9
5	28	1516.8		10.99		1192.4		16.33		24.5	
6	28	1517.8		6.09		1190.0		16.59		26.4	
7	60	1494.3	1491.5	8.53	7.89	1269.3	1240.4	16.89	15.04	26.5	27.7
8	60	1499.0		7.66		1237.2		15.24		27.7	
9	60	1481.1		7.47		1214.8		12.98		28.7	

ตารางที่ ข.47 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 90DCL10FA+20CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1549.2	1512.7	8.16	9.40	1244.3	1244.5	14.16	14.39	25.0	25.5
2	7	1512.2		9.50		1261.0		14.57		24.7	
3	7	1476.5		10.55		1228.2		14.44		26.7	
4	28	1470.3	1486.5	7.87	8.62	1231.7	1242.3	14.16	14.04	26.2	25.4
5	28	1483.7		9.51		1249.7		14.57		25.4	
6	28	1505.4		8.49		1245.4		13.39		24.6	
7	60	1480.5	1465.8	7.34	7.40	1266.1	1210.4	12.31	12.83	26.3	24.4
8	60	1465.2		8.22		1194.0		13.67		22.7	
9	60	1501.8		6.62		1171.1		12.50		24.3	

ตารางที่ ข.48 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาค่าเชิงปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 80DCL20FA+20CHF อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1534.7	1556.4	10.01	8.58	1210.8	1231.7	13.92	13.25	28.02	26.0
2	7	1570.4		8.01		1255.6		13.17		25.00	
3	7	1564.0		7.71		1228.8		12.67		25.08	
4	28	1396.6	1413.7	7.03	8.26	1149.2	1164.1	11.19	11.51	22.0	24.5
5	28	1422.7		8.45		1183.0		11.64		25.0	
6	28	1421.9		9.29		1160.0		11.71		26.6	
7	60	1403.2	1399.5	7.69	7.31	1200.6	1191.0	10.20	10.35	26.4	26.4
8	60	1391.2		6.38		1188.0		9.82		26.4	
9	60	1404.2		7.85		1184.4		11.04		26.3	

ตารางที่ ข.49 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 70DCL30FA+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1502.1	1500.4	5.66	5.47	1192.4	1187.9	9.76	9.28	26.5	25.2
2	7	1500.1		5.30		1199.1		8.70		24.7	
3	7	1499.0		5.46		1172.1		9.37		24.4	
4	28	1471.5	1444.5	2.69	2.60	1171.5	1147.9	3.72	4.69	23.9	24.9
5	28	1432.4		1.82		1145.3		4.72		25.7	
6	28	1429.6		3.29		1126.9		6.14		25.2	
7	60	1249.0	1272.0	1.33	2.01	1099.7	1109.7	4.13	4.09	23.5	24.7
8	60	1306.6		1.62		1131.5		3.64		26.9	
9	60	1260.4		3.07		1097.9		4.49		23.5	

ตารางที่ ข.50 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก, การหาคัดแข็งปริมาตรรวม และการดูดซึมน้ำของ
ส่วนผสม 60DCL40FA+20CHE อายุ 7, 28 และ 60 วัน

No.	Curing	Wet Basis				Oven-dry Basis				Absorption	
		γ_{wet} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{wet} (%)	Average (%)	γ_{dry} (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	TVS _{dry} (%)	Average (%)	Absorp. (%)	Average (%)
1	7	1447.0	1440.1	3.33	3.19	1139.8	1139.1	6.25	6.11	26.3	25.7
2	7	1453.2		3.19		1155.3		6.02		24.2	
3	7	1419.9		3.05		1122.4		6.07		26.6	
4	28	1394.5	1388.1	3.21	2.86	1098.0	1110.4	5.18	4.94	24.5	23.3
5	28	1396.6		2.46		1125.7		4.47		21.7	
6	28	1373.3		2.92		1107.6		5.17		23.6	
7	60	1233.5	1232.2	3.04	2.05	1092.2	1094.3	3.68	2.96	25.2	24.8
8	60	1239.7		1.64		1098.3		2.55		24.7	
9	60	1223.3		1.48		1092.6		2.67		24.6	

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำ

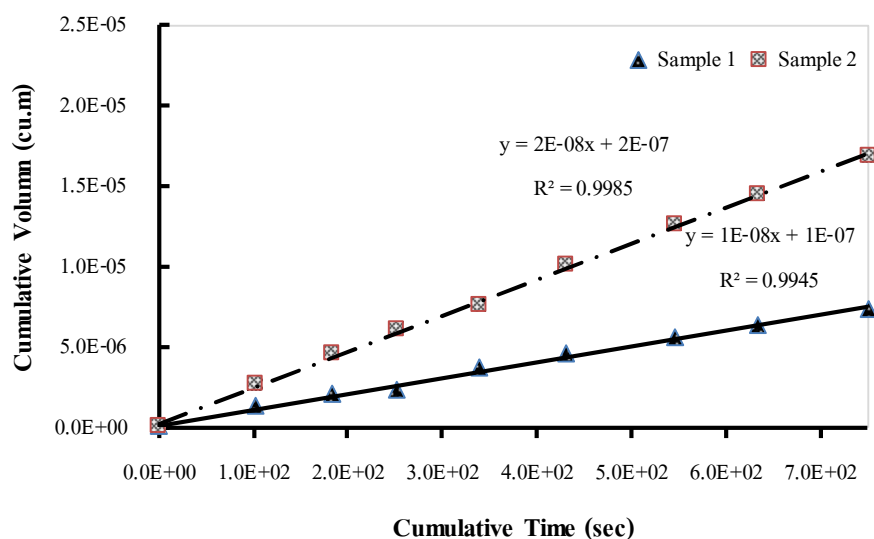
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+5CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.675E-08}{0.048}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{2.714E-08}{0.048}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{0.106}$	$m.$	L_2	=	$\frac{0.048}{0.105}$	$m.$
ϕ_1	=	$\frac{0.106}{0.300}$	$m.$	ϕ_2	=	$\frac{0.105}{0.486}$	$m.$
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

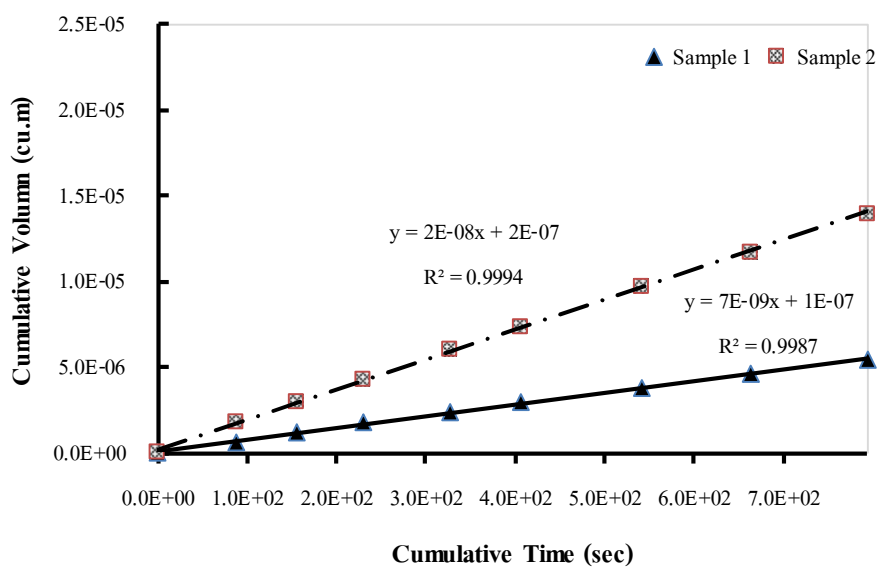
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cum. Volumn (m^3)	Lev. water (cm)	Cum. Volumn (m^3)
11/2/57	15.30	0	44.50	0	46.50	0
		103	42.00	1.215E-06	41.10	2.624E-06
		184	40.30	2.041E-06	37.20	4.520E-06
		252	39.80	2.284E-06	34.10	6.026E-06
		340	37.00	3.645E-06	31.10	7.484E-06
		430	35.10	4.568E-06	25.80	1.006E-05
		547	33.00	5.589E-06	20.60	1.259E-05
		633	31.50	6.318E-06	16.70	1.448E-05
		751	29.50	7.290E-06	12.00	1.677E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	2.997E-09	4.938E-09	3.967E-09



ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+5CHE อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>8.922E-09</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>1.446E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.046</u>	m.	L ₂	=	<u>0.046</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.104</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.105</u>	m.
P	=	0.30	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev.water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
11/2/57	15.45	0	45.50	0	44.40	0	
		88	44.10	6.804E-07	40.80	1.750E-06	
		156	43.00	1.215E-06	38.20	3.013E-06	
		230	41.90	1.750E-06	35.50	4.325E-06	
		327	40.50	2.430E-06	32.00	6.026E-06	
		407	39.40	2.965E-06	29.20	7.387E-06	
		541	37.60	3.839E-06	24.50	9.671E-06	
		663	36.00	4.617E-06	20.30	1.171E-05	
		794	34.20	5.492E-06	15.70	1.395E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)	K _{AV} (m/sec)		
		1.580E-09		2.558E-09	2.069E-09		

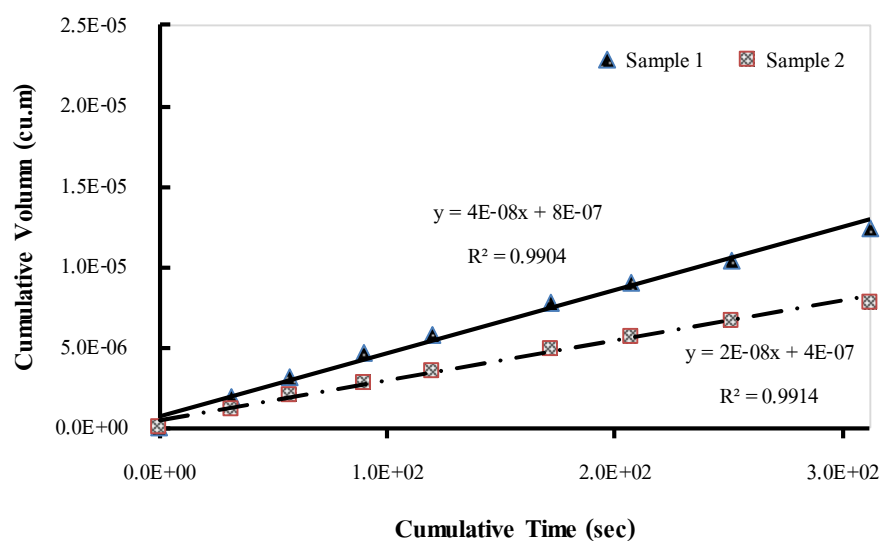


ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+5CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{6.428E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.845E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.105}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.105}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
13/2/57	16.00	0	46.00	0	46.00	0
		32	42.00	1.944E-06	43.50	1.215E-06
		57	39.50	3.159E-06	41.90	1.993E-06
		90	36.50	4.617E-06	40.20	2.819E-06
		120	34.00	5.832E-06	38.60	3.596E-06
		172	30.00	7.776E-06	35.80	4.957E-06
		207	27.50	8.991E-06	34.30	5.686E-06
		251	24.50	1.045E-05	32.30	6.658E-06
		312	20.50	1.239E-05	29.90	7.825E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.166E-08	8.776E-09	1.022E-08

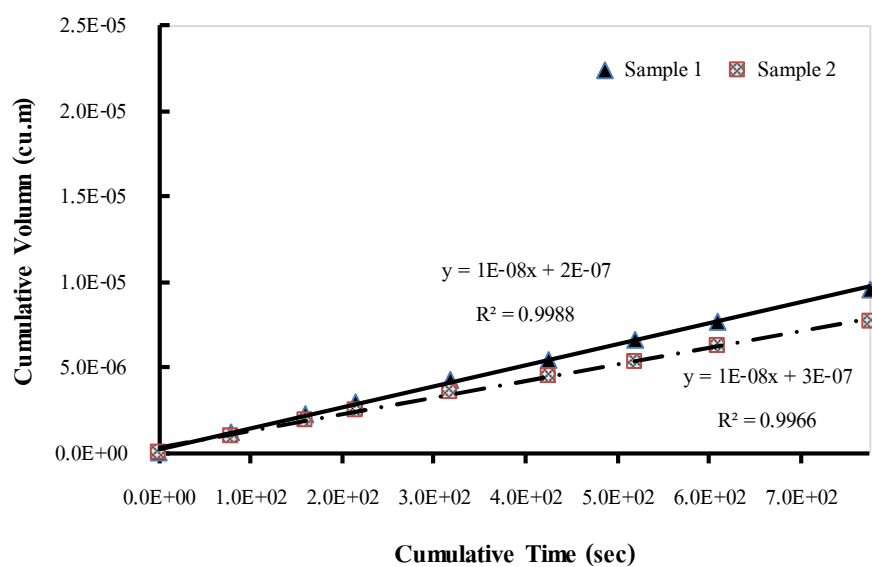


ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+5CHE อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{2.100\text{E-}08}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.352\text{E-}08}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.473}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.107}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.108}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

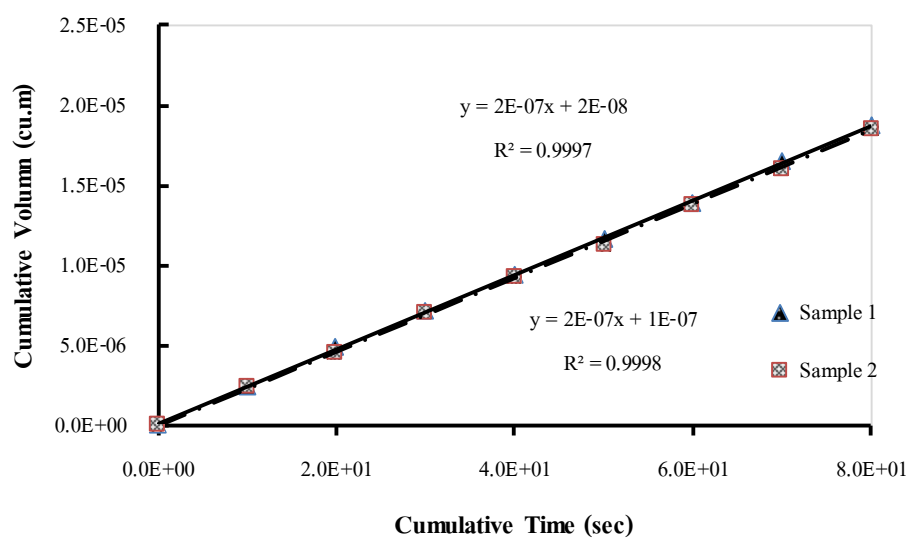
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
13/2/00	15.00	0	36.50	0	36.50	0
		79	34.00	1.215E-06	34.40	1.021E-06
		160	31.80	2.284E-06	32.50	1.944E-06
		215	30.40	2.965E-06	31.30	2.527E-06
		318	27.80	4.228E-06	29.10	3.596E-06
		425	25.20	5.492E-06	27.20	4.520E-06
		520	22.80	6.658E-06	25.40	5.395E-06
		610	20.60	7.727E-06	23.60	6.269E-06
		775	16.70	9.623E-06	20.60	7.727E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.708E-09	2.291E-08	1.331E-08



ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+10CH-Control อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>2.682E-07</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>3.202E-07</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.042</u>	m.	L ₂	=	<u>0.042</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.100</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.100</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
17/2/57	16.30	0	46.00	0	46.00	0	
		10	41.00	2.430E-06	41.00	2.430E-06	
		20	36.00	4.860E-06	36.60	4.568E-06	
		30	31.20	7.193E-06	31.60	6.998E-06	
		40	26.60	9.428E-06	27.00	9.234E-06	
		50	22.00	1.166E-05	22.80	1.128E-05	
		60	17.30	1.395E-05	17.60	1.380E-05	
		70	12.10	1.648E-05	13.00	1.604E-05	
		80	7.50	1.871E-05	7.80	1.857E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)		K _{AV} (m/sec)	
		4.698E-08		5.608E-08		5.153E-08	

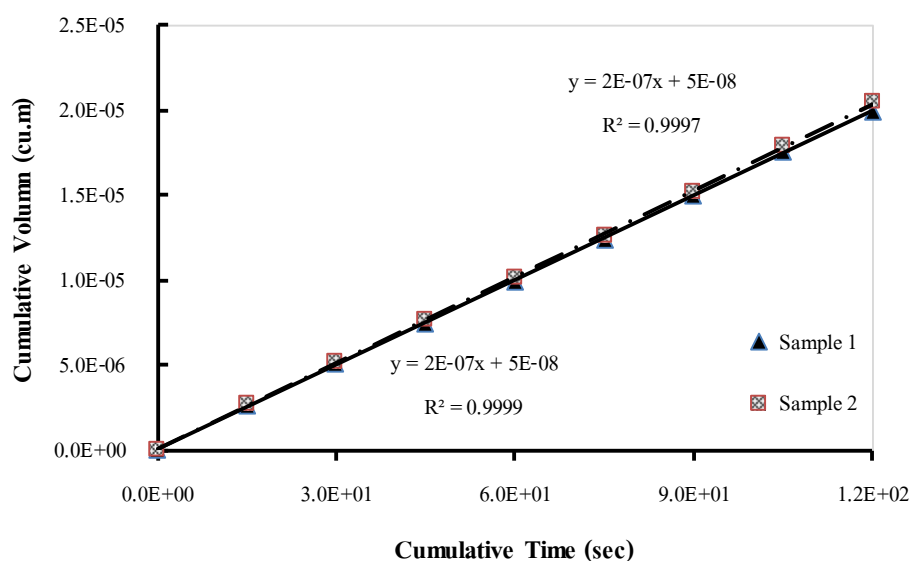


ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+10CH-Control อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.808E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.728E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.042}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.042}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.100}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.100}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
17/2/57	16.45	0	46.00	0	46.00	0
		15	40.50	2.673E-06	40.40	2.722E-06
		30	35.60	5.054E-06	35.30	5.200E-06
		45	30.60	7.484E-06	30.10	7.727E-06
		60	25.60	9.914E-06	25.20	1.011E-05
		75	20.50	1.239E-05	20.10	1.259E-05
		90	15.20	1.497E-05	14.70	1.521E-05
		105	9.90	1.754E-05	9.10	1.793E-05
		120	4.90	1.997E-05	3.80	2.051E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.167E-08	3.024E-08	3.095E-08

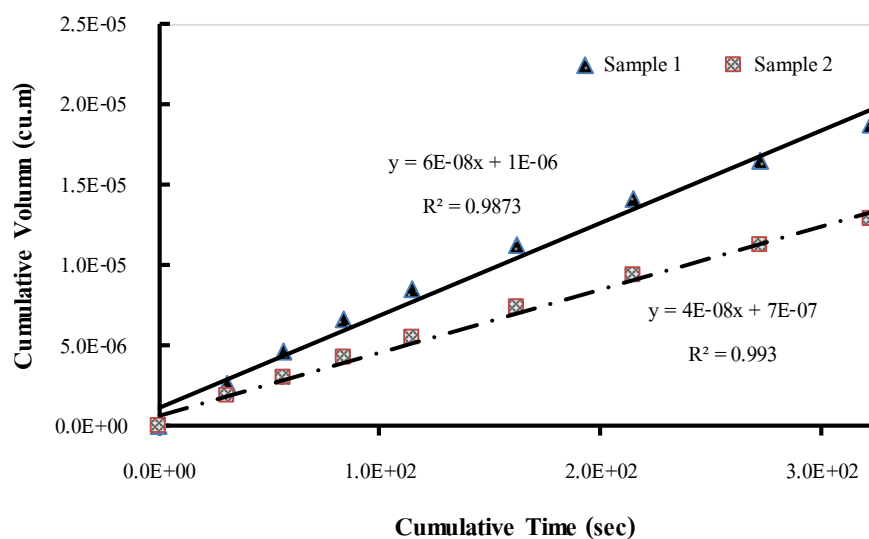


ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+10CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.177E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{7.477E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.099}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.099}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

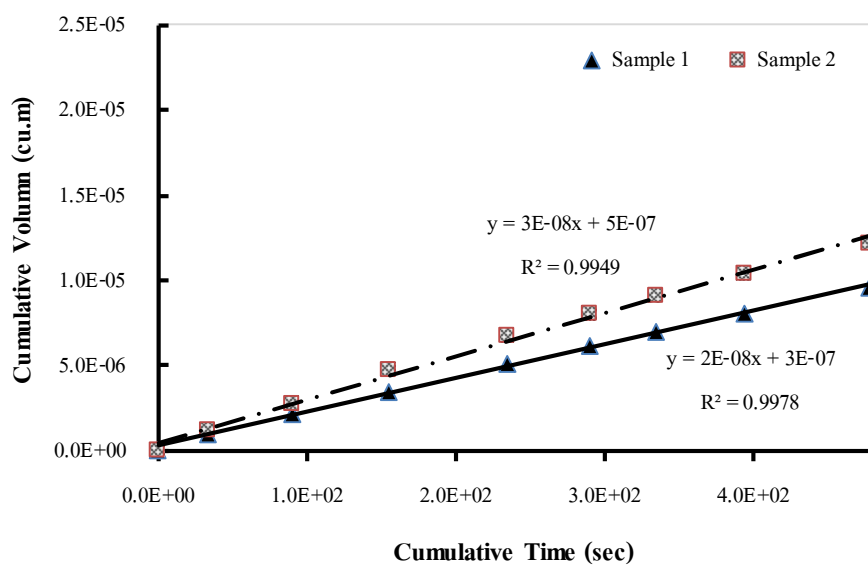
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	16.00	0	46.00	0	46.00	0
		31	40.50	2.673E-06	42.20	1.847E-06
		56	36.50	4.617E-06	39.90	2.965E-06
		84	32.50	6.561E-06	37.40	4.180E-06
		115	28.50	8.505E-06	34.60	5.540E-06
		162	23.00	1.118E-05	30.80	7.387E-06
		215	17.00	1.409E-05	26.80	9.331E-06
		272	12.00	1.652E-05	23.00	1.118E-05
		322	7.50	1.871E-05	19.60	1.283E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	2.234E-08	1.426E-08	1.830E-08



ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+10CHE อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>2.760E-08</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>3.831E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.046</u>	m.	L ₂	=	<u>0.046</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.102</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.102</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
16/2/57	16.30	0	46.50	0	46.50	0	
		34	44.40	1.021E-06	43.90	1.264E-06	
		90	42.00	2.187E-06	40.80	2.770E-06	
		155	39.30	3.499E-06	36.80	4.714E-06	
		235	36.00	5.103E-06	32.50	6.804E-06	
		290	33.90	6.124E-06	30.00	8.019E-06	
		335	32.20	6.950E-06	27.80	9.088E-06	
		394	29.90	8.068E-06	25.20	1.035E-05	
		478	26.80	9.574E-06	21.50	1.215E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)	K _{AV} (m/sec)		
		5.051E-09		7.063E-09	6.057E-09		

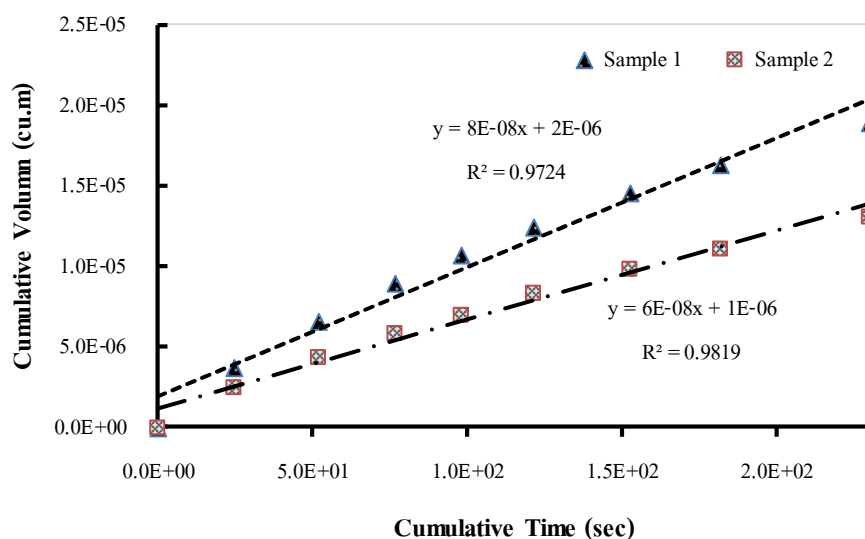


ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+10CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{4.093E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.082E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	16.00	0	45.00	0	46.00	0
		25	37.50	3.645E-06	41.00	2.430E-06
		52	31.50	6.561E-06	37.10	4.325E-06
		77	26.50	8.991E-06	33.90	5.881E-06
		98	23.00	1.069E-05	31.60	6.998E-06
		122	19.50	1.239E-05	29.00	8.262E-06
		153	15.00	1.458E-05	25.80	9.817E-06
		182	11.50	1.628E-05	23.20	1.108E-05
		230	6.00	1.895E-05	19.00	1.312E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	7.427E-09	7.537E-09	7.482E-09

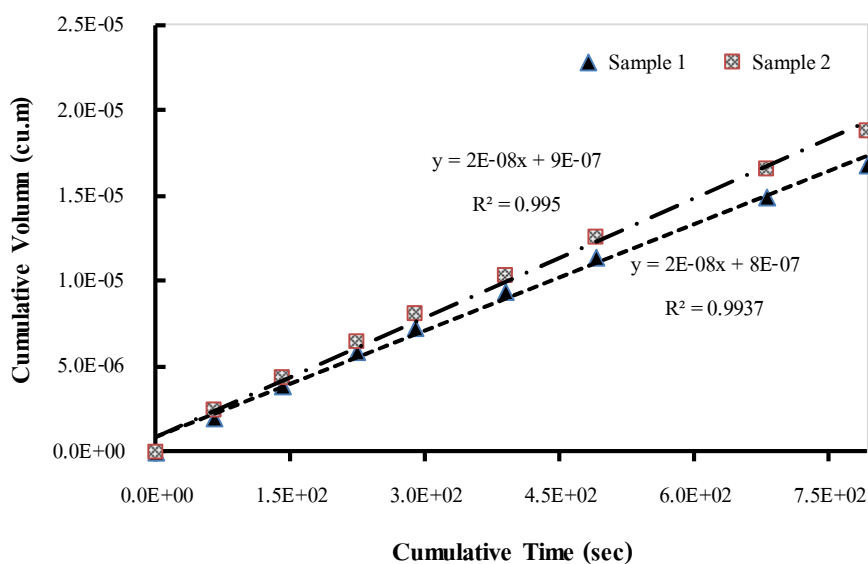


ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+10CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{4.093E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.082E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

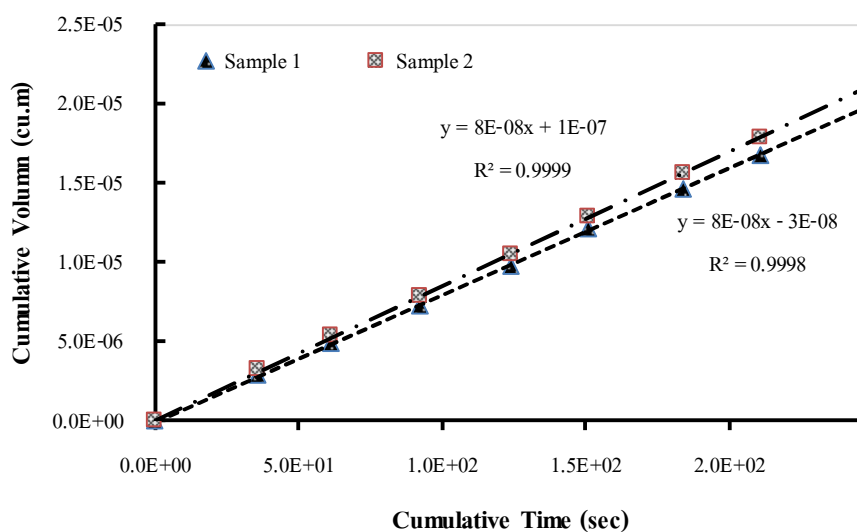
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	16.30	0	46.00	0	45.80	0
		65	42.00	1.944E-06	40.90	2.381E-06
		142	38.00	3.888E-06	37.00	4.277E-06
		225	34.00	5.832E-06	32.50	6.464E-06
		290	31.00	7.290E-06	29.30	8.019E-06
		390	26.70	9.380E-06	24.50	1.035E-05
		490	22.60	1.137E-05	20.00	1.254E-05
		680	15.30	1.492E-05	11.80	1.652E-05
		792	11.50	1.677E-05	7.20	1.876E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	7.427E-09	7.537E-09	7.482E-09



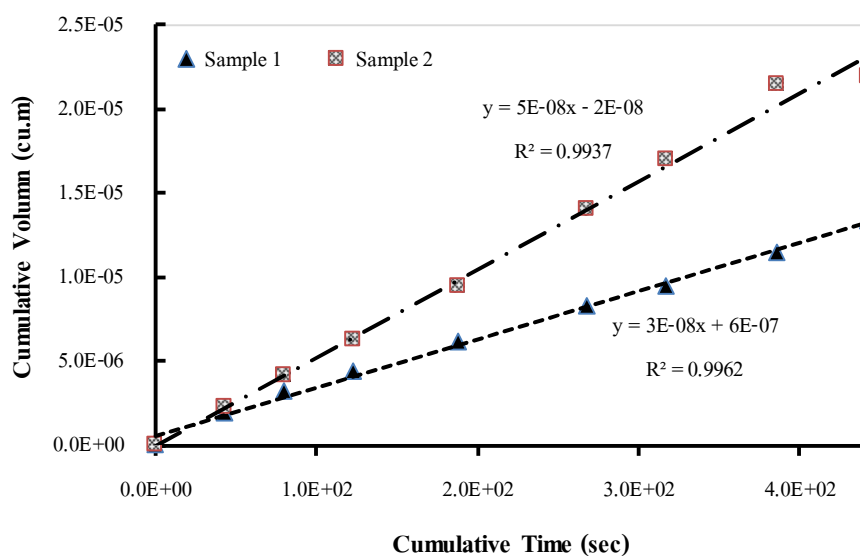
ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+10CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>7.892E-08</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>8.996E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.049</u>	m.	L ₂	=	<u>0.046</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.107</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.104</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
15/2/57	13.00	0	46.00	0	46.00	0	
		36	40.00	2.916E-06	39.40	3.208E-06	
		61	36.00	4.860E-06	35.00	5.346E-06	
		92	31.00	7.290E-06	29.80	7.873E-06	
		124	26.00	9.720E-06	24.40	1.050E-05	
		151	21.10	1.210E-05	19.60	1.283E-05	
		184	16.00	1.458E-05	14.00	1.555E-05	
		211	11.50	1.677E-05	9.20	1.788E-05	
		248	5.00	1.993E-05	2.80	2.100E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)		K _{AV} (m/sec)	
		1.411E-08		1.587E-08		1.499E-08	



ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+10CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>4.782E-08</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>6.109E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.048</u>	m.	L ₂	=	<u>0.047</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.107</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.106</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
15/2/57	13.30	0	45.00	0	45.00	0	
		42	41.00	1.944E-06	40.50	2.187E-06	
		80	38.50	3.159E-06	36.50	4.131E-06	
		123	36.00	4.374E-06	32.20	6.221E-06	
		187	32.50	6.075E-06	25.50	9.477E-06	
		268	28.00	8.262E-06	16.10	1.405E-05	
		316	25.50	9.477E-06	10.20	1.691E-05	
		385	21.50	1.142E-05	1.00	2.138E-05	
		442	17.50	1.337E-05	0.00	2.187E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)		K _{AV} (m/sec)	
		8.410E-09		1.070E-08		9.557E-09	

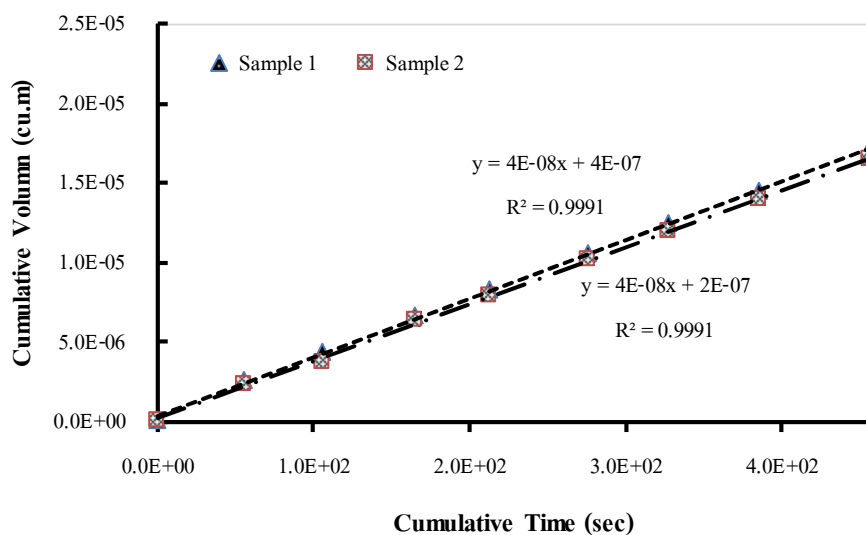


ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+10CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{6.240E-08}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.142E-08}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.046}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.106}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.106}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	17.00	0	46.00	0	46.50	0
		55	40.80	2.527E-06	41.70	2.333E-06
		105	37.00	4.374E-06	38.80	3.742E-06
		164	32.50	6.561E-06	33.50	6.318E-06
		212	29.00	8.262E-06	30.20	7.922E-06
		276	24.30	1.055E-05	25.70	1.011E-05
		327	20.50	1.239E-05	22.00	1.191E-05
		385	16.20	1.448E-05	17.90	1.390E-05
		456	10.90	1.706E-05	12.70	1.643E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.057E-08	7.020E-09	8.797E-09

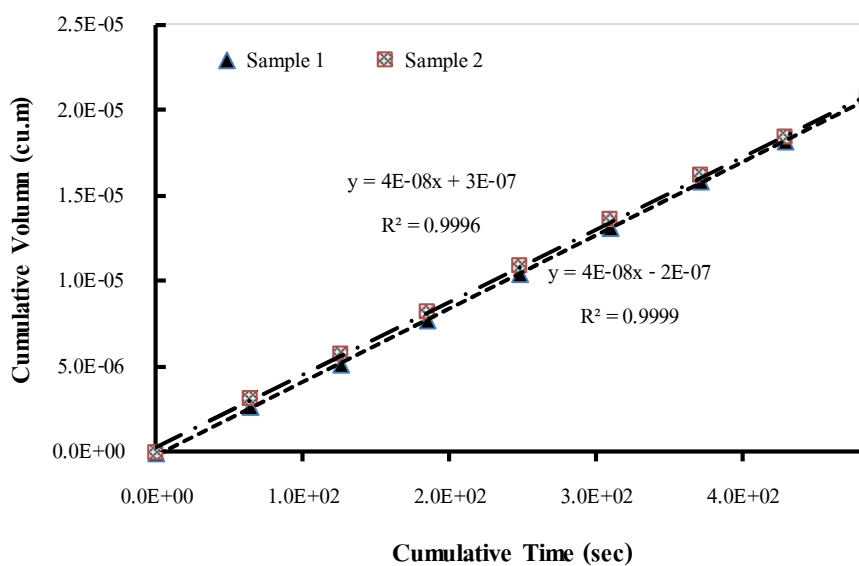


ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+10CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{4.012E-08}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.884E-08}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.047}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.105}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.105}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	17.30	0	46.00	0	46.50	0
		65	40.60	2.624E-06	40.10	3.110E-06
		126	35.50	5.103E-06	34.70	5.735E-06
		185	30.20	7.679E-06	29.60	8.213E-06
		248	24.50	1.045E-05	24.10	1.089E-05
		310	19.00	1.312E-05	18.60	1.356E-05
		372	13.40	1.584E-05	13.20	1.618E-05
		429	8.50	1.823E-05	8.50	1.847E-05
		485	3.50	2.066E-05	4.00	2.066E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	7.075E-09	8.526E-09	7.801E-09

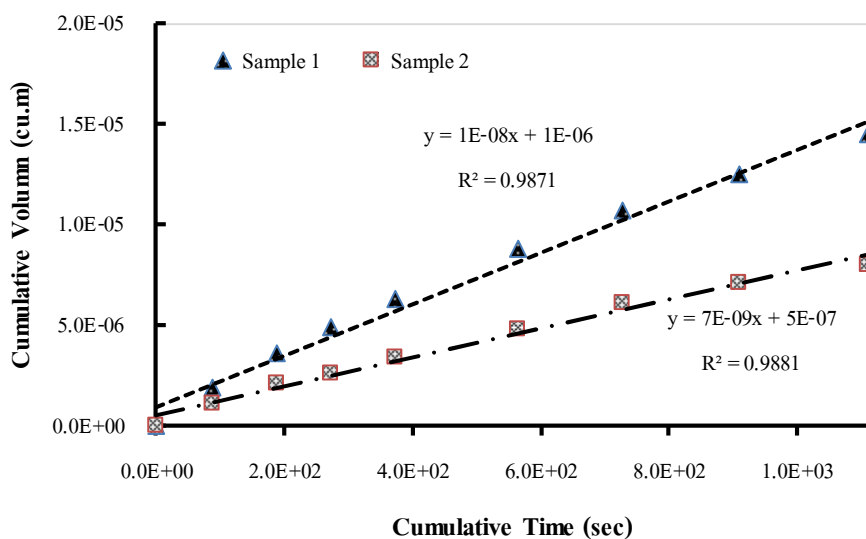


ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+10CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{3.083\text{E-}08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.189\text{E-}08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.104}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.104}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
17/2/57	13.00	0	46.50	0	44.00	0
		90	42.60	1.895E-06	41.80	1.069E-06
		190	39.10	3.596E-06	39.80	2.041E-06
		275	36.50	4.860E-06	38.60	2.624E-06
		375	33.50	6.318E-06	37.10	3.353E-06
		565	28.40	8.797E-06	34.20	4.763E-06
		730	24.60	1.064E-05	31.40	6.124E-06
		910	20.80	1.249E-05	29.50	7.047E-06
		1110	16.80	1.443E-05	27.50	8.019E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	5.685E-09	2.152E-09	3.919E-09

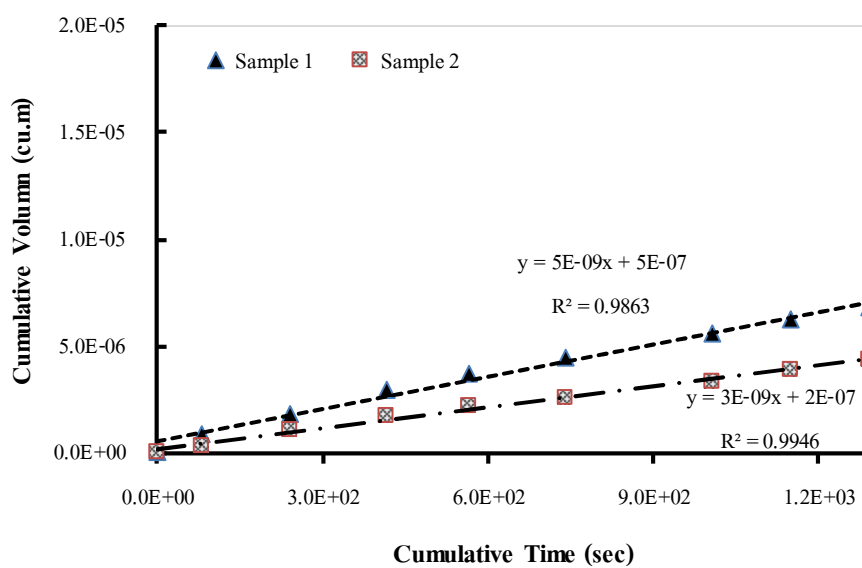


ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+10CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.044\text{E-}08}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{6.260\text{E-}08}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.049}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.048}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.105}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.105}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

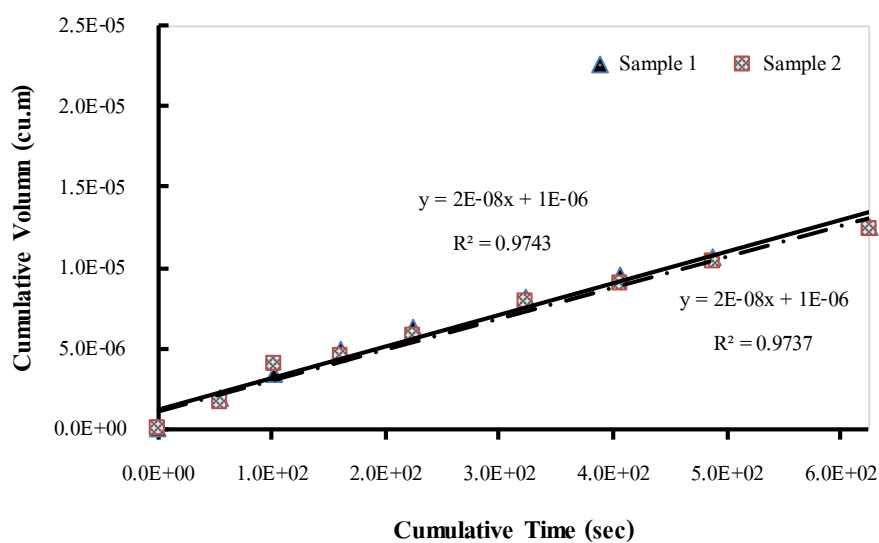
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
17/2/57	13.00	0	45.50	0	45.00	0
		80	43.80	8.262E-07	44.30	3.402E-07
		240	41.70	1.847E-06	42.90	1.021E-06
		415	39.50	2.916E-06	41.50	1.701E-06
		565	37.90	3.694E-06	40.60	2.138E-06
		740	36.30	4.471E-06	39.70	2.576E-06
		1005	34.10	5.540E-06	38.10	3.353E-06
		1150	32.70	6.221E-06	37.00	3.888E-06
		1290	31.60	6.755E-06	36.10	4.325E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.927E-09	1.137E-08	6.647E-09



ตารางที่ ค.17 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+15CH-Control อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	5.515E-08	m ³ /sec	Q ₂	=	5.046E-08	m ³ /sec
L ₁	=	0.044	m.	L ₂	=	0.044	m.
Ø ₁	=	0.101	m.	Ø ₂	=	0.100	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
16/2/57	14.30	0	45.50	0	46.00	0	
		54	41.50	1.944E-06	42.60	1.652E-06	
		103	38.50	3.402E-06	37.70	4.034E-06	
		161	35.50	4.860E-06	36.60	4.568E-06	
		225	32.60	6.269E-06	34.10	5.783E-06	
		324	28.80	8.116E-06	29.70	7.922E-06	
		406	26.00	9.477E-06	27.40	9.040E-06	
		488	23.50	1.069E-05	24.60	1.040E-05	
		625	19.80	1.249E-05	20.50	1.239E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)	K _{AV} (m/sec)		
		9.921E-09		9.267E-09	9.594E-09		

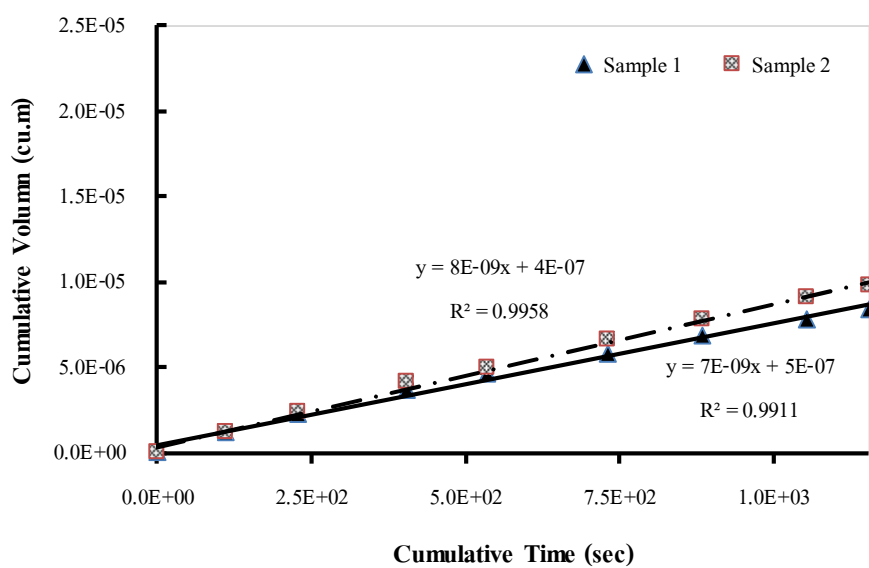


ตารางที่ ค.18 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+15CH-Control อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.123\text{E-}08}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.211\text{E-}08}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.044}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.102}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.100}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	15.00	0	44.50	0	45.00	0
		110	42.10	1.166E-06	42.50	1.215E-06
		230	39.90	2.236E-06	40.20	2.333E-06
		405	37.00	3.645E-06	36.50	4.131E-06
		535	35.00	4.617E-06	34.70	5.006E-06
		730	32.50	5.832E-06	31.50	6.561E-06
		885	30.50	6.804E-06	29.00	7.776E-06
		1055	28.50	7.776E-06	26.40	9.040E-06
		1155	27.30	8.359E-06	24.90	9.769E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.983E-09	2.305E-09	2.144E-09

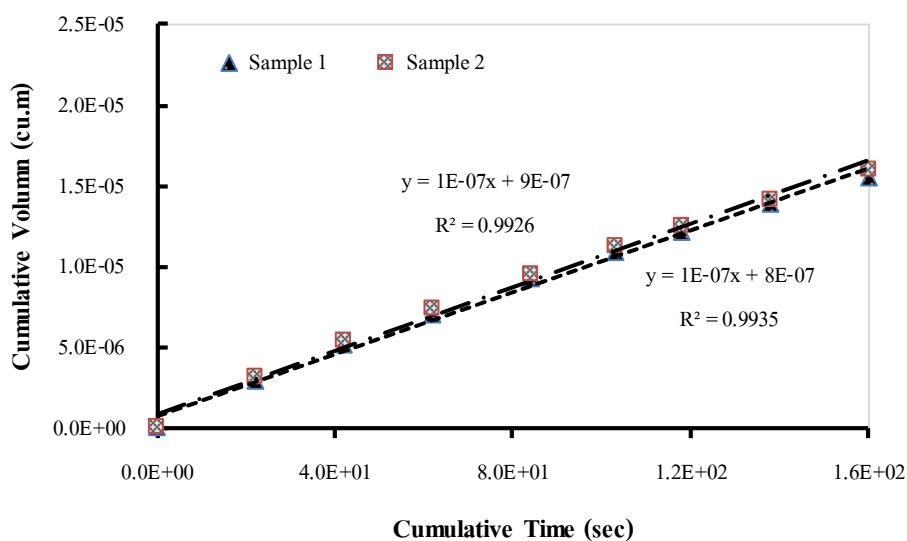


ตารางที่ ค.19 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+15CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.848E-07}{\quad}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.804E-07}{\quad}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.043}{\quad}$	m.	L_2	=	$\frac{0.042}{\quad}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.101}{\quad}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.096}{\quad}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
11/2/57	16.15	0	42.00	0	45.00	0
		22	36.00	2.916E-06	38.60	3.110E-06
		42	31.50	5.103E-06	34.00	5.346E-06
		62	27.50	7.047E-06	29.80	7.387E-06
		84	23.00	9.234E-06	25.50	9.477E-06
		103	19.50	1.094E-05	21.90	1.123E-05
		118	17.00	1.215E-05	19.20	1.254E-05
		138	13.50	1.385E-05	15.80	1.419E-05
		160	10.00	1.555E-05	12.10	1.599E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.249E-08	3.376E-08	3.312E-08

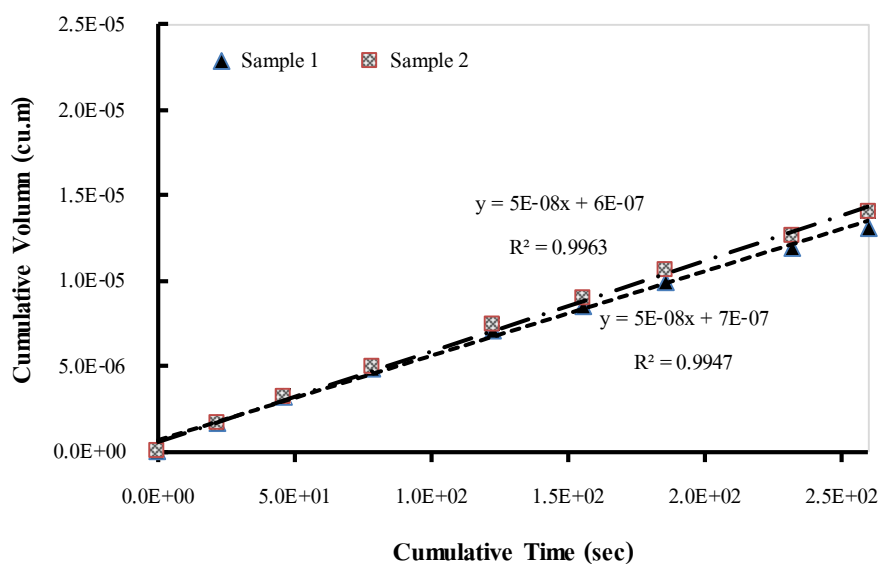


ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+15CHE อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.026E-07}{0.046}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{8.220E-08}{0.047}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.046}{0.099}$	$m.$	L_2	=	$\frac{0.047}{0.101}$	$m.$
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.099}{0.300}$	$m.$	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.101}{0.486}$	$m.$
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
11/2/57	16.45	0	45.00	0	46.50	0
		22	41.50	1.701E-06	43.00	1.701E-06
		46	38.50	3.159E-06	40.00	3.159E-06
		79	35.00	4.860E-06	36.20	5.006E-06
		123	30.50	7.047E-06	31.20	7.436E-06
		156	27.50	8.505E-06	27.90	9.040E-06
		186	24.50	9.963E-06	24.70	1.059E-05
		232	20.50	1.191E-05	20.40	1.268E-05
		260	18.00	1.312E-05	17.60	1.405E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.999E-08	1.580E-08	1.789E-08

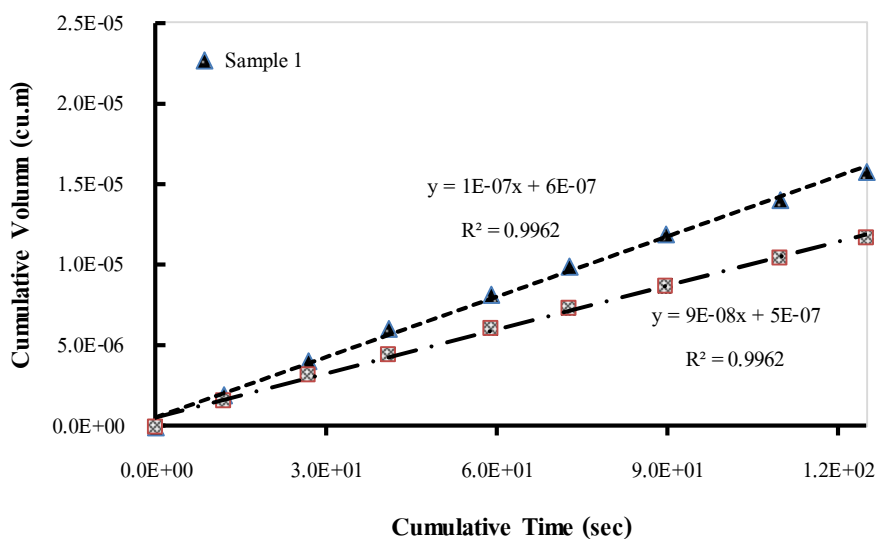


ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+15CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.751E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.244E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.044}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.100}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.100}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	16.00	0	45.00	0	45.00	0
		12	41.00	1.944E-06	41.60	1.652E-06
		27	36.50	4.131E-06	38.50	3.159E-06
		41	32.50	6.075E-06	35.80	4.471E-06
		59	28.00	8.262E-06	32.40	6.124E-06
		73	24.50	9.963E-06	29.90	7.339E-06
		90	20.50	1.191E-05	27.00	8.748E-06
		110	16.00	1.409E-05	23.50	1.045E-05
		125	12.50	1.580E-05	20.90	1.171E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.211E-08	2.345E-08	2.778E-08

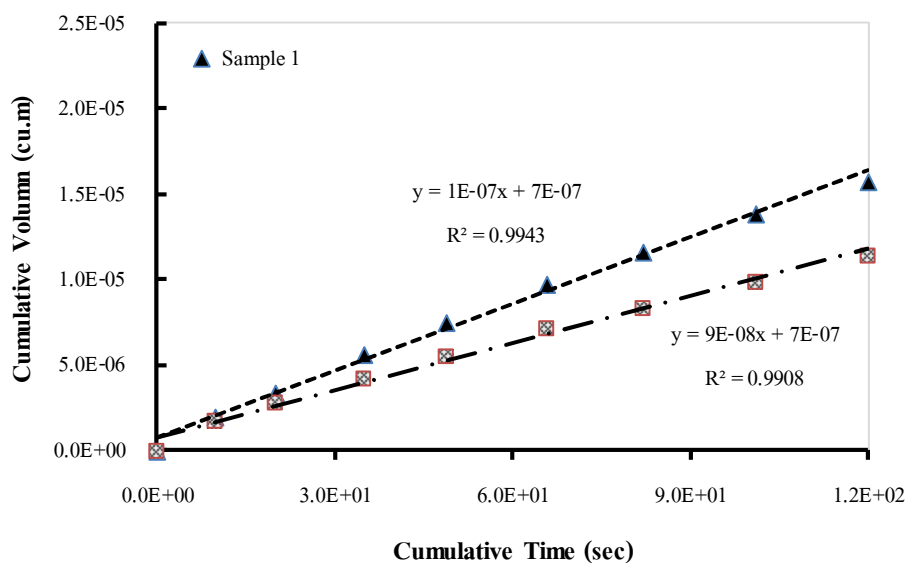


ตารางที่ ค.22 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+15CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{2.652E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.282E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.099}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	16.30	0	46.00	0	46.00	0
		10	42.00	1.944E-06	42.50	1.701E-06
		20	39.00	3.402E-06	40.30	2.770E-06
		35	34.50	5.589E-06	37.30	4.228E-06
		49	30.50	7.533E-06	34.60	5.540E-06
		66	26.00	9.720E-06	31.16	7.212E-06
		82	22.00	1.166E-05	28.80	8.359E-06
		101	17.50	1.385E-05	25.80	9.817E-06
		120	13.50	1.580E-05	22.50	1.142E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	5.228E-08	2.311E-08	3.769E-08

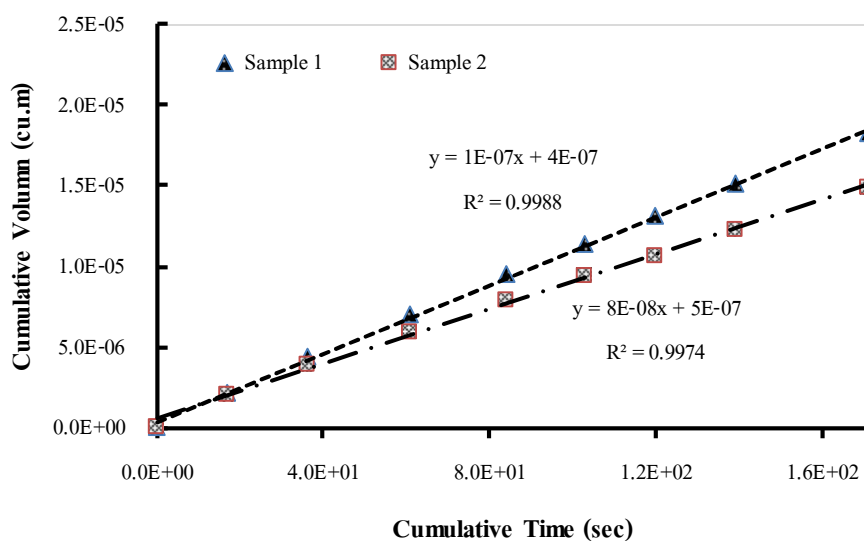


ตารางที่ ค.23 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+15CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.709E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.254E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.044}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.101}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.102}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	13.00	0	45.00	0	45.00	0
		17	40.50	2.187E-06	40.80	2.041E-06
		36	36.00	4.374E-06	37.10	3.839E-06
		61	30.50	7.047E-06	32.80	5.929E-06
		84	25.50	9.477E-06	28.90	7.825E-06
		103	21.50	1.142E-05	25.80	9.331E-06
		120	18.00	1.312E-05	23.00	1.069E-05
		139	14.00	1.507E-05	19.90	1.220E-05
		171	7.50	1.823E-05	14.50	1.482E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.052E-08	2.329E-08	2.690E-08

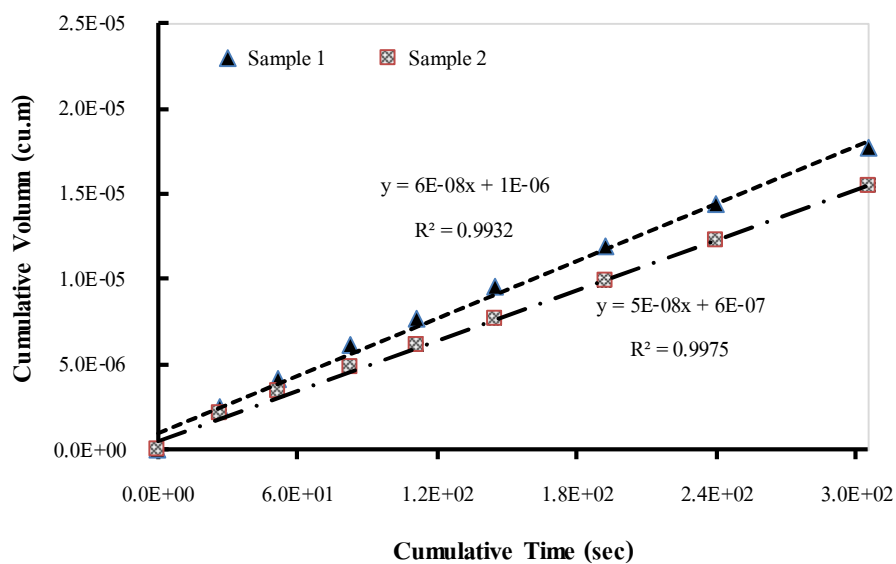


ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+15CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.018E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{6.845E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.0459}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.0469}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.0988}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.1047}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.30	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

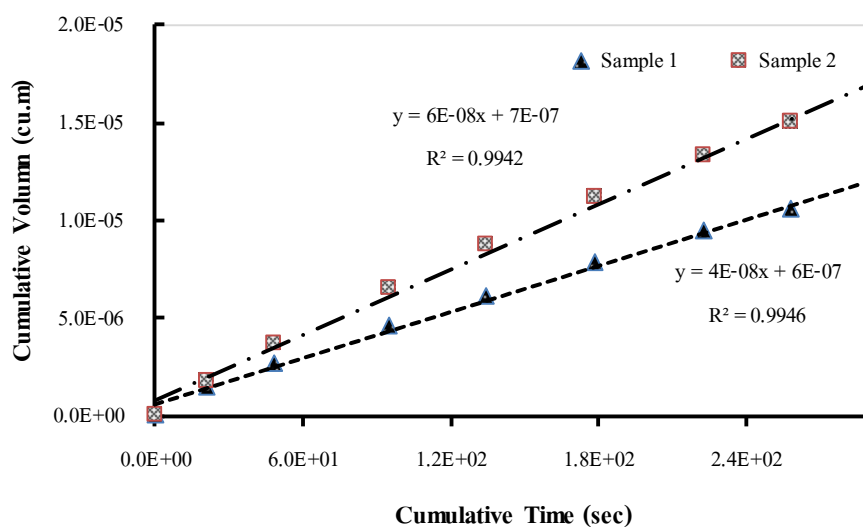
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
16/2/57	13.30	0	46.00	0	44.00	0
		27	41.00	2.430E-06	39.70	2.090E-06
		52	37.50	4.131E-06	37.10	3.353E-06
		83	33.50	6.075E-06	34.10	4.811E-06
		111	30.20	7.679E-06	31.30	6.172E-06
		145	26.50	9.477E-06	28.20	7.679E-06
		192	21.50	1.191E-05	23.60	9.914E-06
		240	16.50	1.434E-05	18.80	1.225E-05
		305	9.70	1.764E-05	12.20	1.545E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.992E-08	1.219E-08	1.606E-08



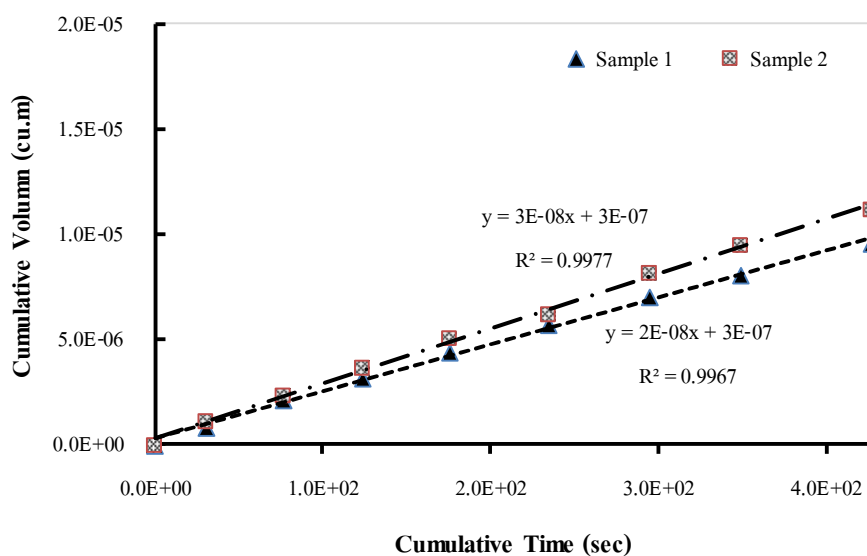
ตารางที่ ค.25 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+15CHE อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>7.088E-08</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>8.756E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.047</u>	m.	L ₂	=	<u>0.045</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.107</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.104</u>	m.
P	=	<u>0.300</u>	MPa	cm ³ of tube	=	<u>0.486</u>	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
11/2/57	12.00	0	42.00	0	45.00	0	
		21	39.00	1.458E-06	41.40	1.750E-06	
		48	36.50	2.673E-06	37.50	3.645E-06	
		95	32.50	4.617E-06	31.60	6.512E-06	
		134	29.40	6.124E-06	27.00	8.748E-06	
		179	25.90	7.825E-06	22.00	1.118E-05	
		223	22.60	9.428E-06	17.60	1.332E-05	
		258	20.20	1.059E-05	14.20	1.497E-05	
		291	18.00	1.166E-05	11.10	1.648E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)		K _{AV} (m/sec)	
		1.211E-08		1.526E-08		1.368E-08	



ตารางที่ ค.26 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+15CHE อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>2.778E-08</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>2.392E-08</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.048</u>	m.	L ₂	=	<u>0.045</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.107</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.104</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
11/2/57	12.30	0	44.00	0	44.30	0	
		30	42.20	8.748E-07	42.10	1.069E-06	
		77	39.50	2.187E-06	39.40	2.381E-06	
		124	37.50	3.159E-06	36.80	3.645E-06	
		176	35.00	4.374E-06	33.90	5.054E-06	
		235	32.20	5.735E-06	31.60	6.172E-06	
		295	29.50	7.047E-06	27.50	8.165E-06	
		349	27.40	8.068E-06	24.80	9.477E-06	
		427	24.30	9.574E-06	21.20	1.123E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)		K _{AV} (m/sec)	
		4.838E-09		4.075E-09		4.457E-09	

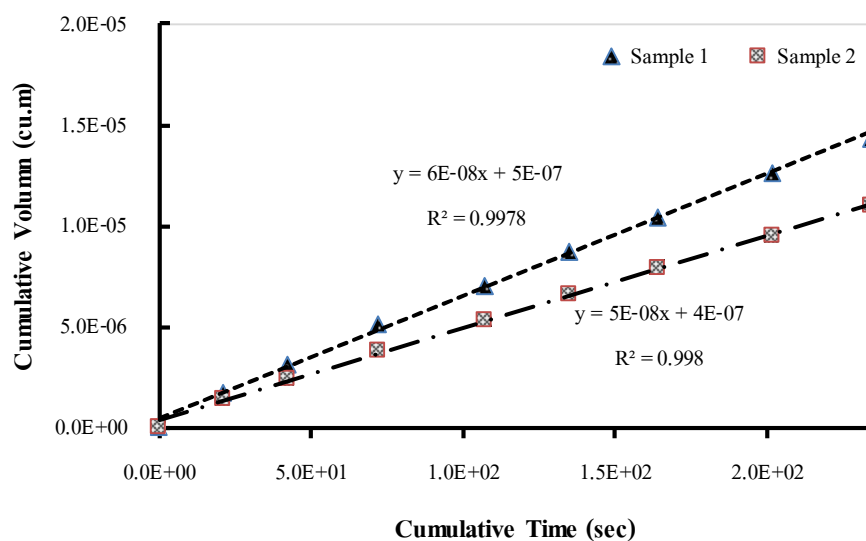


ตารางที่ ค.27 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+15CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{9.481E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{5.430E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.145}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	13.30	0	45.00	0	41.00	0
		21	41.50	1.701E-06	38.10	1.409E-06
		42	38.50	3.159E-06	36.00	2.430E-06
		72	34.50	5.103E-06	33.10	3.839E-06
		107	30.50	7.047E-06	30.00	5.346E-06
		135	27.00	8.748E-06	27.40	6.610E-06
		164	23.50	1.045E-05	24.80	7.873E-06
		202	19.00	1.264E-05	21.40	9.526E-06
		234	15.50	1.434E-05	18.40	1.098E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	8.937E-08	9.323E-09	4.935E-08

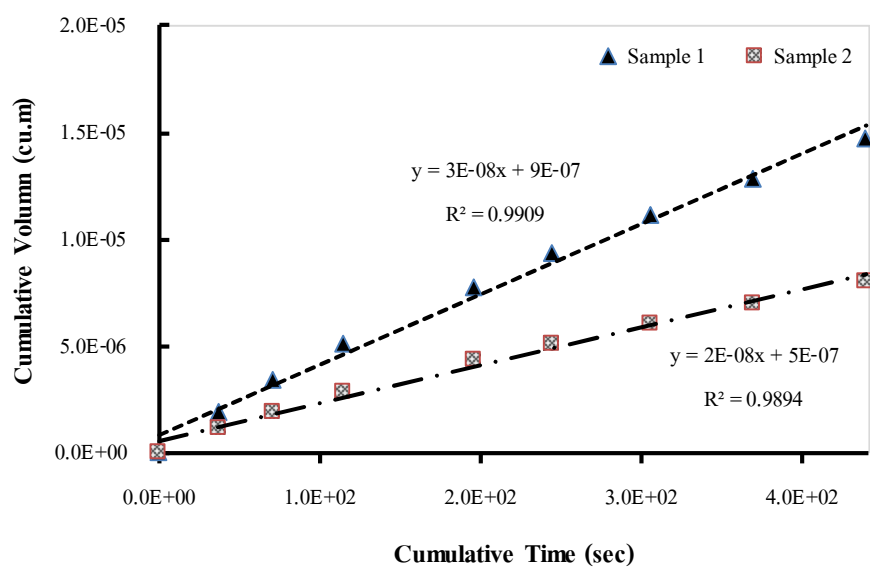


ตารางที่ ค.28 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+15CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{7.449E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{2.698E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

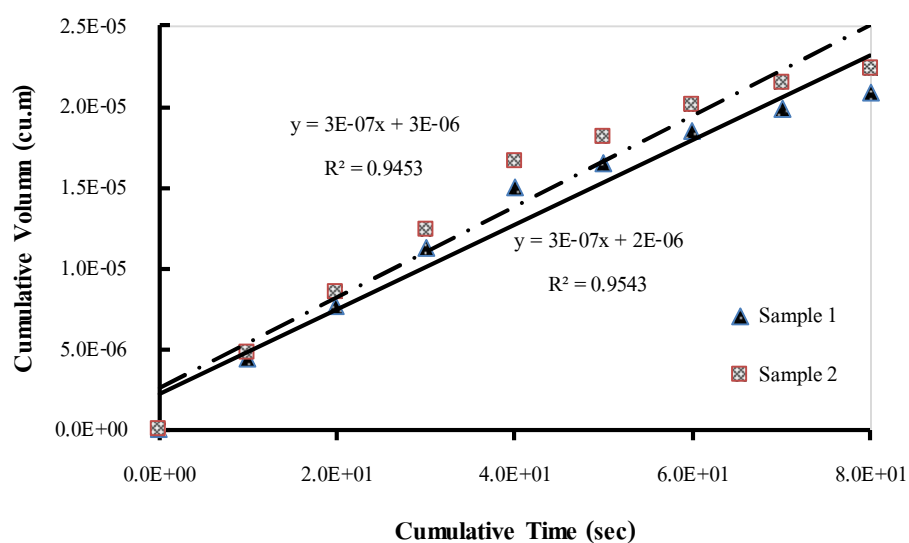
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	14.00	0	46.50	0	46.00	0
		38	42.50	1.944E-06	43.60	1.166E-06
		71	39.50	3.402E-06	42.00	1.944E-06
		115	36.00	5.103E-06	40.20	2.819E-06
		196	30.50	7.776E-06	37.10	4.325E-06
		245	27.20	9.380E-06	35.50	5.103E-06
		306	23.60	1.113E-05	33.50	6.075E-06
		370	20.00	1.288E-05	31.60	6.998E-06
		440	16.20	1.473E-05	29.50	8.019E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.277E-08	4.625E-09	8.697E-09



ตารางที่ ค.29 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+20CH-Control อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q ₁	=	<u>2.921E-07</u>	m ³ /sec	Q ₂	=	<u>3.123E-07</u>	m ³ /sec
L ₁	=	<u>0.047</u>	m.	L ₂	=	<u>0.048</u>	m.
Ø ₁	=	<u>0.100</u>	m.	Ø ₂	=	<u>0.106</u>	m.
P	=	0.300	MPa	cm ³ of tube	=	0.486	cm ³
Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2		
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m ³)	
13/2/57	16.00	0	43.00	0	46.00	0	
		10	34.00	4.374E-06	36.20	4.763E-06	
		20	27.20	7.679E-06	28.40	8.554E-06	
		30	19.70	1.132E-05	20.60	1.234E-05	
		40	12.00	1.507E-05	11.80	1.662E-05	
		50	9.00	1.652E-05	8.60	1.818E-05	
		60	5.00	1.847E-05	4.70	2.007E-05	
		70	2.00	1.993E-05	1.70	2.153E-05	
		80	0.00	2.090E-05	0.00	2.236E-05	
	Factor K	K ₁ (m/sec)		K ₂ (m/sec)	K _{AV} (m/sec)		
		5.727E-08		5.549E-08	5.638E-08		

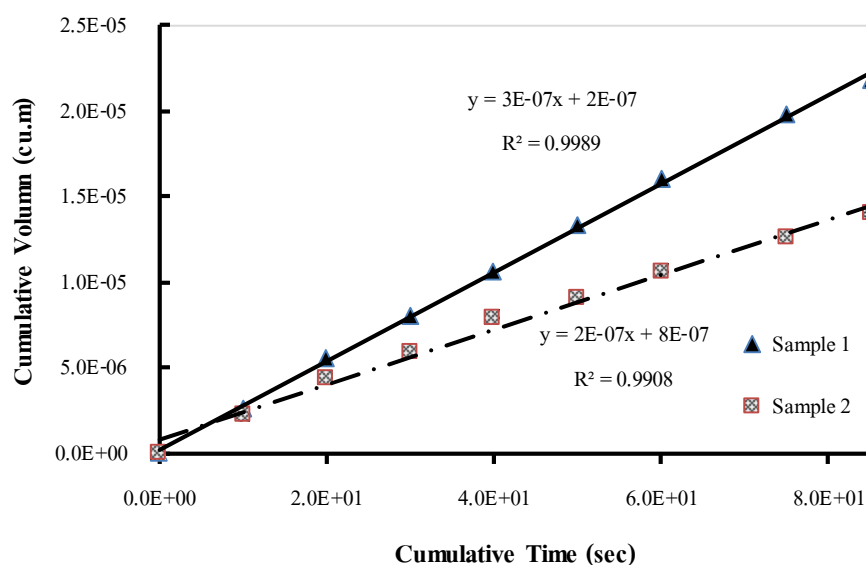


ตารางที่ ค.30 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL+20CH-Control อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{3.990E-07}{}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.959E-07}{}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{}$	m.	L_2	=	$\frac{0.048}{}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.105}{}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.105}{}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
13/2/57	16.30	0	45.00	0	44.00	0
		10	39.50	2.673E-06	39.20	2.333E-06
		20	33.50	5.589E-06	35.00	4.374E-06
		30	28.50	8.019E-06	31.70	5.978E-06
		40	23.20	1.059E-05	27.80	7.873E-06
		50	17.60	1.332E-05	25.30	9.088E-06
		60	11.90	1.609E-05	22.20	1.059E-05
		75	4.20	1.983E-05	18.00	1.264E-05
		85	0.20	2.177E-05	15.10	1.405E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	7.160E-08	3.546E-08	5.353E-08

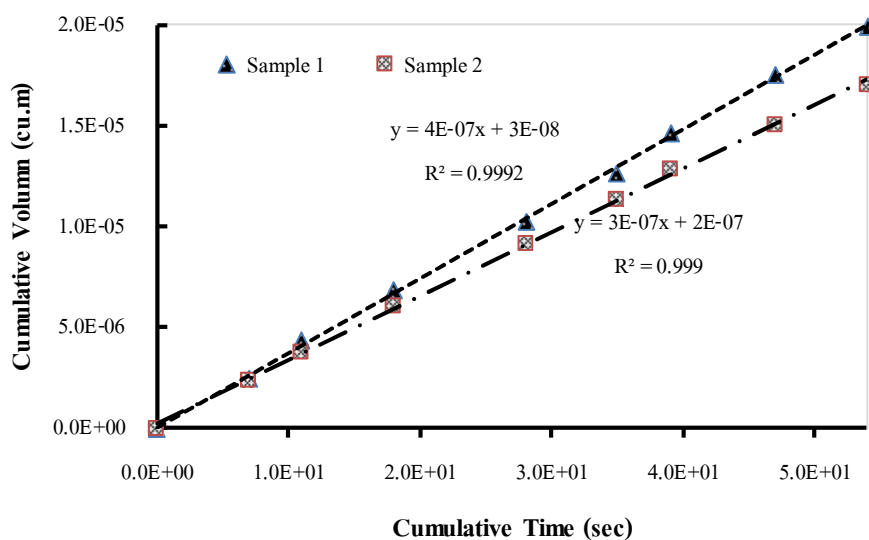


ตารางที่ ค.31 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+20CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{4.418E-07}{0.043}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{3.791E-07}{0.045}$	m^3/sec
L_1	=	0.043	m.	L_2	=	0.045	m.
$\varnothing_1$	=	0.099	m.	$\varnothing_2$	=	0.101	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	13.30	0	45.00	0	46.00	0
		7	40.00	2.430E-06	41.10	2.381E-06
		11	36.00	4.374E-06	38.20	3.791E-06
		18	31.00	6.804E-06	33.50	6.075E-06
		28	24.00	1.021E-05	27.20	9.137E-06
		35	19.00	1.264E-05	22.60	1.137E-05
		39	15.00	1.458E-05	19.50	1.288E-05
		47	9.00	1.750E-05	15.00	1.507E-05
		54	4.00	1.993E-05	11.00	1.701E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	8.014E-08	6.904E-08	7.459E-08

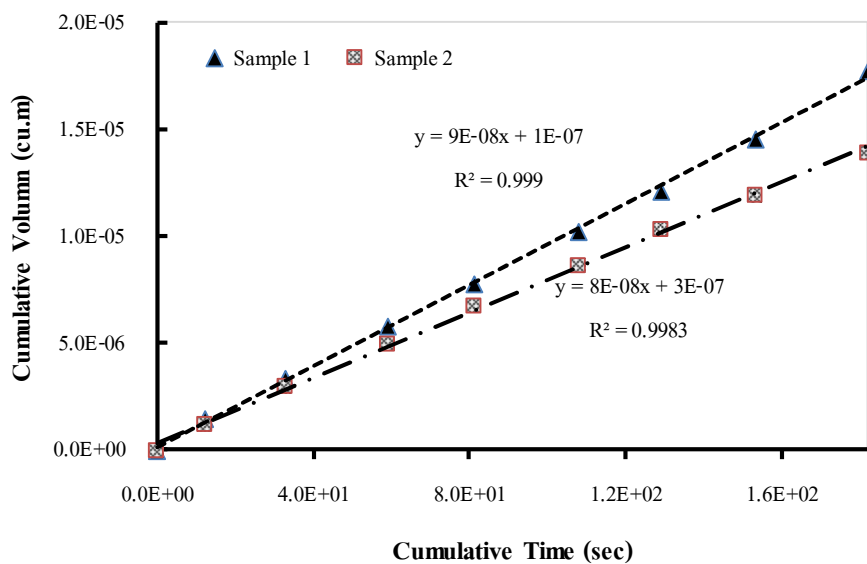


ตารางที่ ค.32 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 100DCL0FA+20CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.219E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.051E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.046}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.101}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.098}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	14.00	0	46.00	0	45.00	0
		12	43.00	1.458E-06	42.60	1.166E-06
		33	39.00	3.402E-06	38.90	2.965E-06
		59	34.00	5.832E-06	34.70	5.006E-06
		81	30.00	7.776E-06	31.12	6.746E-06
		108	25.00	1.021E-05	27.20	8.651E-06
		129	21.00	1.215E-05	23.80	1.030E-05
		153	16.00	1.458E-05	20.40	1.196E-05
		182	9.50	1.774E-05	16.30	1.395E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	2.260E-08	2.095E-08	2.177E-08

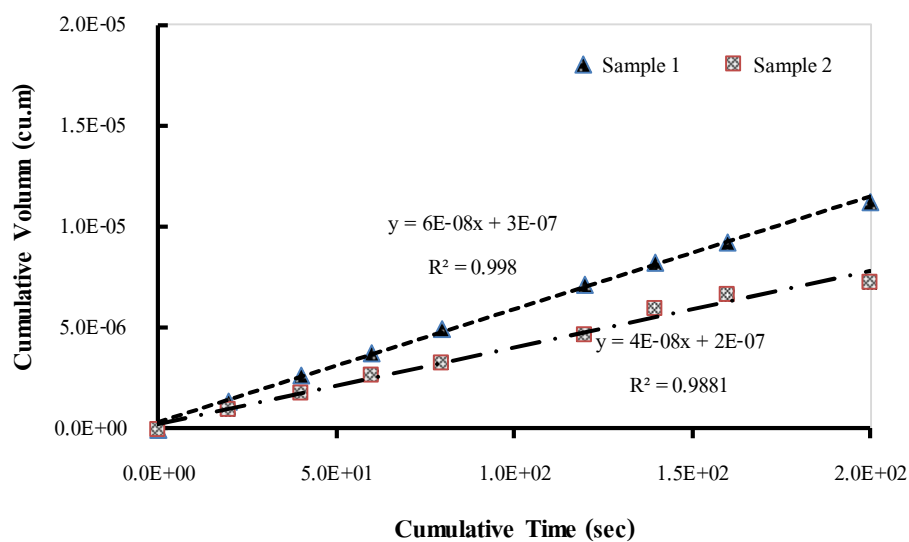


ตารางที่ ค.33 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+20CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{6.804E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{4.617E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.045}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.098}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.098}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
7/2/57	15.30	0	46.00	0	45.00	0
		20	43.20	1.361E-06	43.10	9.234E-07
		40	40.60	2.624E-06	41.40	1.750E-06
		60	38.20	3.791E-06	39.60	2.624E-06
		80	35.80	4.957E-06	38.20	3.305E-06
		120	31.20	7.193E-06	35.40	4.666E-06
		140	29.10	8.213E-06	32.80	5.929E-06
		160	27.00	9.234E-06	31.30	6.658E-06
		200	22.80	1.128E-05	30.00	7.290E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.330E-08	9.505E-09	1.140E-08

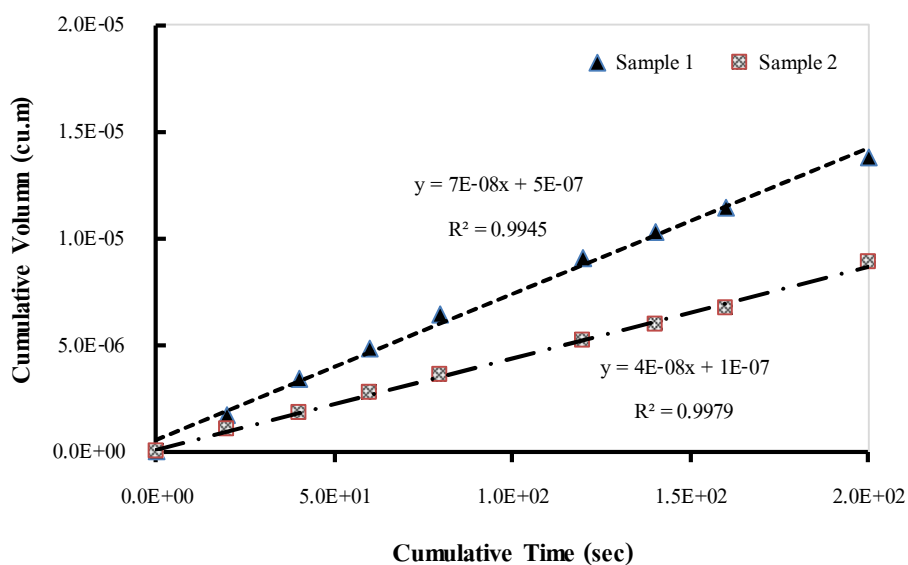


ตารางที่ ค.34 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 90DCL10FA+20CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{8.505E-08}{0.046}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{5.346E-08}{0.046}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.046}{0.097}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{0.097}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.097}{0.300}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.097}{0.486}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
7/2/57	16.00	0	45.00	0	46.00	0
		20	41.50	1.701E-06	43.80	1.069E-06
		40	38.00	3.402E-06	42.20	1.847E-06
		60	35.00	4.860E-06	40.30	2.770E-06
		80	31.70	6.464E-06	38.60	3.596E-06
		120	26.30	9.088E-06	35.20	5.249E-06
		140	23.80	1.030E-05	33.70	5.978E-06
		160	21.46	1.144E-05	32.20	6.707E-06
		200	16.70	1.375E-05	27.80	8.845E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.713E-08	1.081E-08	1.397E-08

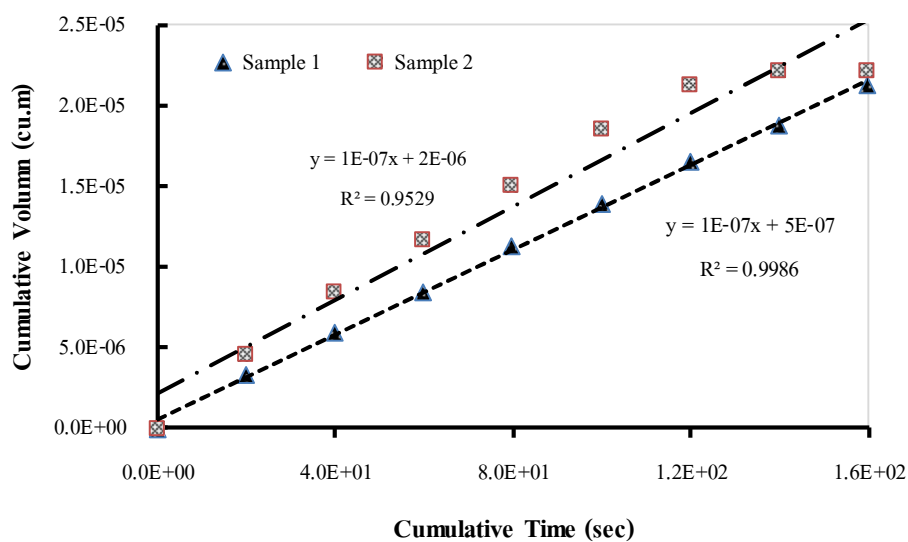


ตารางที่ ค.35 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+20CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.652E-07}{0.048}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{2.309E-07}{0.047}$	m^3/sec
L_1	=	0.048	m.	L_2	=	0.047	m.
$\varnothing_1$	=	0.101	m.	$\varnothing_2$	=	0.099	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
7/2/57	14.00	0	45.00	0	45.50	0
		20	38.20	3.305E-06	36.00	4.617E-06
		40	32.80	5.929E-06	28.20	8.408E-06
		60	27.50	8.505E-06	21.50	1.166E-05
		80	21.60	1.137E-05	14.40	1.511E-05
		100	16.40	1.390E-05	7.20	1.861E-05
		120	11.00	1.652E-05	1.80	2.124E-05
		140	6.20	1.886E-05	0.00	2.211E-05
		160	1.20	2.129E-05	0.00	2.211E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	3.203E-08	4.571E-08	3.887E-08

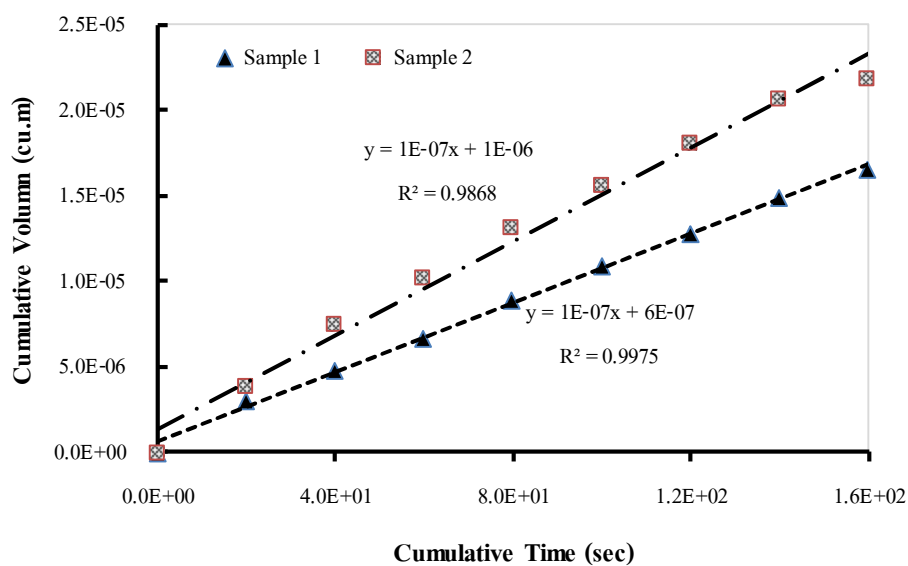


ตารางที่ ค.36 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 80DCL20FA+20CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.507\text{E-}07}{0.047}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.944\text{E-}07}{0.047}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.047}{0.100}$	m.	L_2	=	$\frac{0.047}{0.102}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.100}{0.300}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.102}{0.486}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
7/2/57	14.30	0	45.20	0	45.00	0
		20	39.00	3.013E-06	37.00	3.888E-06
		40	35.40	4.763E-06	29.50	7.533E-06
		60	31.40	6.707E-06	24.00	1.021E-05
		80	26.90	8.894E-06	17.80	1.322E-05
		100	22.80	1.089E-05	12.80	1.565E-05
		120	18.90	1.278E-05	7.80	1.808E-05
		140	14.60	1.487E-05	2.40	2.070E-05
		160	11.00	1.662E-05	0.00	2.187E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	2.925E-08	3.626E-08	3.275E-08

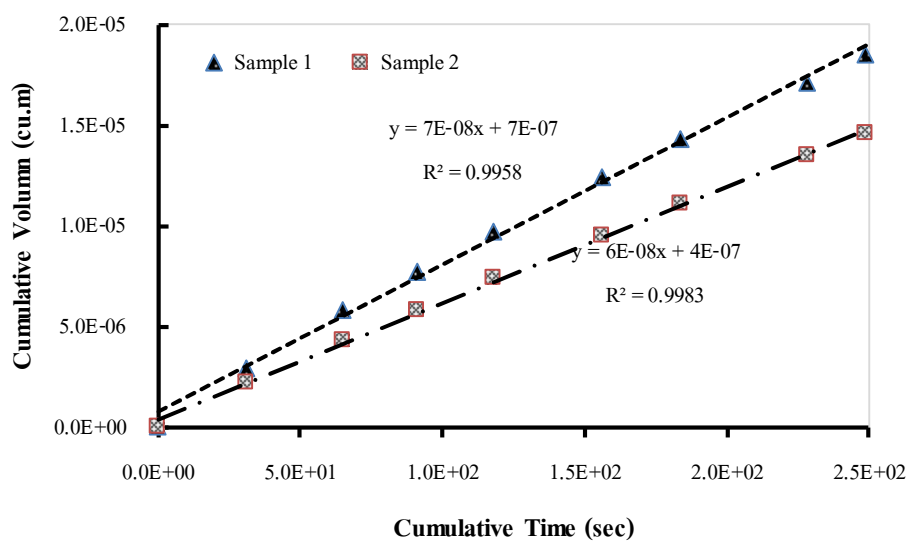


ตารางที่ ค.37 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+20CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{1.087E-07}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{6.506E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.048}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.105}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.106}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
17/2/57	11.30	0	46.50	0	46.50	0
		31	40.50	2.916E-06	41.90	2.236E-06
		65	34.50	5.832E-06	37.50	4.374E-06
		91	30.50	7.776E-06	34.50	5.832E-06
		118	26.40	9.769E-06	31.20	7.436E-06
		156	21.00	1.239E-05	26.90	9.526E-06
		184	17.00	1.434E-05	23.70	1.108E-05
		228	11.20	1.716E-05	18.70	1.351E-05
		249	8.50	1.847E-05	16.50	1.458E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.955E-08	1.152E-08	1.554E-08

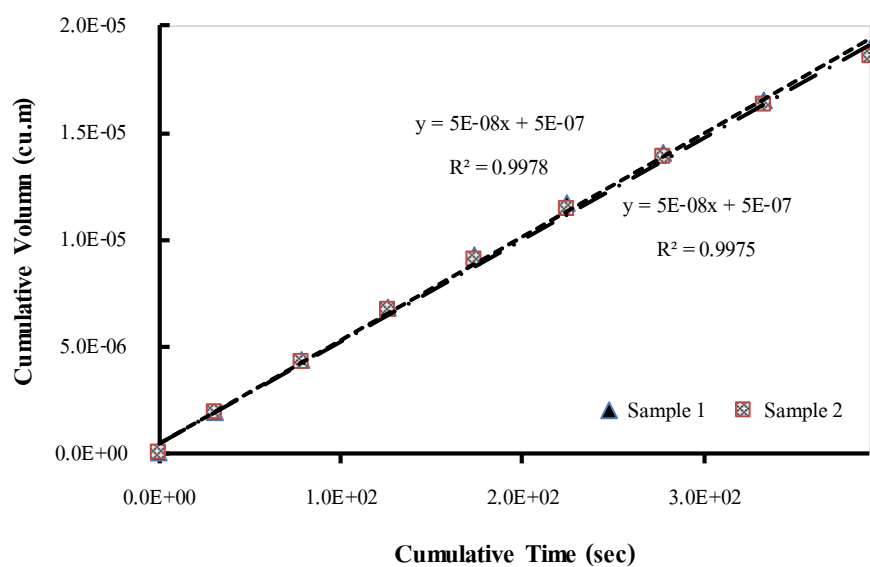


ตารางที่ ค.38 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 70DCL30FA+20CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{6.271E-08}{\quad}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{6.114E-08}{\quad}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.051}{\quad}$	m.	L_2	=	$\frac{0.048}{\quad}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.106}{\quad}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.100}{\quad}$	m.
P	=	0.300	MPa	cm^3 of tube	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
10/2/57	14.00	0	44.00	0	43.00	0
		31	40.00	1.944E-06	39.10	1.895E-06
		79	35.00	4.374E-06	34.30	4.228E-06
		126	30.00	6.804E-06	29.20	6.707E-06
		174	25.00	9.234E-06	24.30	9.088E-06
		224	20.00	1.166E-05	19.40	1.147E-05
		277	15.00	1.409E-05	14.40	1.390E-05
		333	10.00	1.652E-05	9.50	1.628E-05
		391	5.00	1.895E-05	4.80	1.857E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.185E-08	1.204E-08	1.195E-08

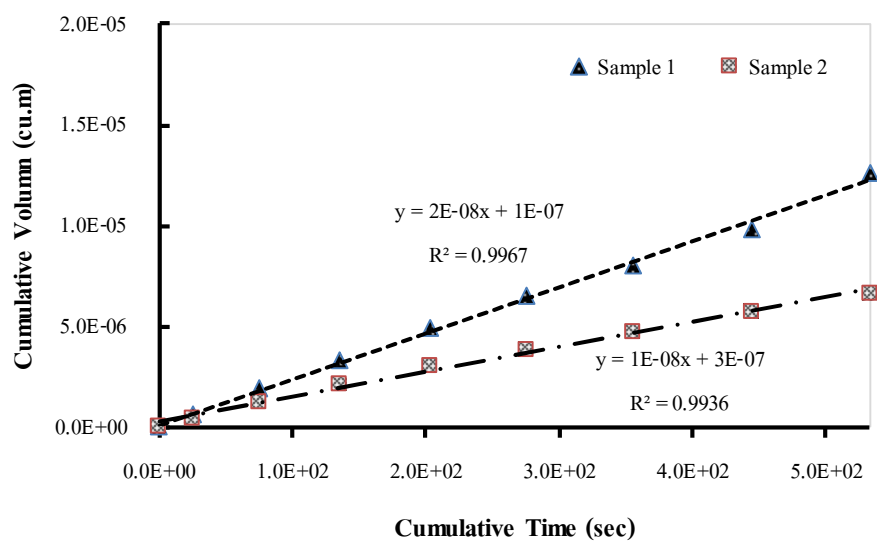


ตารางที่ ค.39 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+20CHF อายุ 28 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{2.333\text{E-}08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{1.555\text{E-}08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.049}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.049}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
6/2/57	16.30	0	44.00	0	43.50	0
		25	42.80	5.832E-07	42.70	3.888E-07
		76	40.10	1.895E-06	41.00	1.215E-06
		135	37.10	3.353E-06	39.10	2.138E-06
		204	33.80	4.957E-06	37.30	3.013E-06
		275	30.50	6.561E-06	35.60	3.839E-06
		355	27.40	8.068E-06	33.70	4.763E-06
		444	23.90	9.769E-06	31.80	5.686E-06
		533	18.00	1.264E-05	29.80	6.658E-06

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	4.157E-09	2.788E-09	3.473E-09

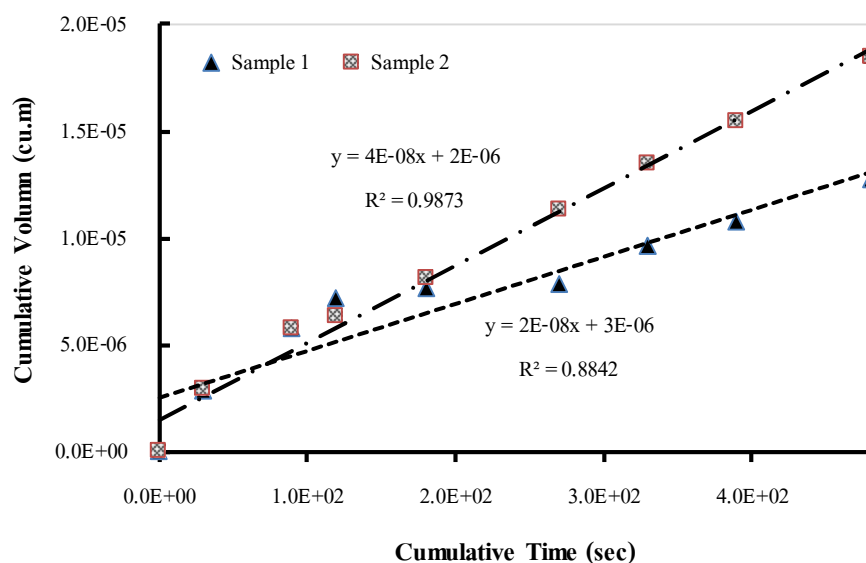


ตารางที่ ค.40 ผลการทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำ 60DCL40FA+20CHF อายุ 60 วัน

Sample 1				Sample 2			
Q_1	=	$\frac{9.396E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec	Q_2	=	$\frac{9.720E-08}{\text{m}^3/\text{sec}}$	m^3/sec
L_1	=	$\frac{0.047}{\text{m.}}$	m.	L_2	=	$\frac{0.046}{\text{m.}}$	m.
$\varnothing_1$	=	$\frac{0.107}{\text{m.}}$	m.	$\varnothing_2$	=	$\frac{0.109}{\text{m.}}$	m.
P	=	0.300	MPa	$\text{cm}^3 \text{ of tube}$	=	0.486	cm^3

Date	Time	Cumulative time (Sec)	Sample 1		Sample 2	
			Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)	Lev. water (cm)	Cumulative Vol. (m^3)
6/2/57	17.20	0	41.00	0	44.00	0
		30	35.20	2.819E-06	38.00	2.916E-06
		90	29.10	5.783E-06	32.20	5.735E-06
		120	26.20	7.193E-06	30.90	6.367E-06
		180	25.29	7.635E-06	27.30	8.116E-06
		270	24.80	7.873E-06	20.60	1.137E-05
		330	21.18	9.633E-06	16.30	1.346E-05
		390	18.90	1.074E-05	12.10	1.550E-05
		480	14.80	1.273E-05	5.90	1.852E-05

Factor K	K_1 (m/sec)	K_2 (m/sec)	K_{AV} (m/sec)
	1.606E-08	1.567E-08	1.586E-08



ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-1, M-2, M-3 และ M-4 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-1	100DCL-Control	28	97.09	0.061	0.055	0.0029	0.1	17.7	0.1	0.377	0.375
			97.09	0.061	0.055	0.0029	0.2	18.1	0.0	0.374	
		60	97.09	0.060	0.055	0.0028	0.2	19.0	0.1	0.360	0.359
			97.09	0.061	0.055	0.0029	0.2	18.6	0.1	0.357	
M-2	100DCL+5CH-Control	28	97.09	0.066	0.055	0.0035	0.1	27.0	0.1	0.208	0.202
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.2	28.1	0.0	0.195	
		60	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	28.3	0.1	0.197	0.196
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	28.4	0.1	0.196	
M-3	100DCL0FA+5CHF	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	26.4	0.1	0.210	0.213
			97.09	0.066	0.055	0.0034	0.0	26.4	0.2	0.217	
		60	97.09	0.065	0.055	0.0034	0.1	26.2	0.2	0.221	0.221
			97.09	0.065	0.055	0.0033	0.2	26.4	0.1	0.221	
M-4	90DCL10FA+5CHF	28	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.2	22.0	0.0	0.246	0.230
			97.09	0.068	0.055	0.0036	0.1	24.9	0.1	0.215	

ตารางที่ ๓.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-4, M-5, M-6 และ M-7 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT ₁	ΔT _s	ΔT ₂		
M-4	90DCL10FA+5CHF	60	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.1	25.1	0.1	0.215	0.204
			97.09	0.068	0.055	0.0036	0.1	25.0	0.1	0.193	
M-5	80DCL20FA+5CHF	28	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	23.2	0.2	0.224	0.220
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	24.0	0.2	0.216	
		60	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.2	25.6	0.1	0.202	0.201
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.2	25.9	0.1	0.200	
M-6	70DCL30FA+5CHF	28	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	22.0	0.2	0.233	0.222
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	24.1	0.1	0.211	
		60	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	24.1	0.1	0.211	0.211
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	24.1	0.2	0.211	
M-7	60DCL40FA+5CHF	28	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	22.9	0.1	0.224	0.224
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.2	23.0	0.1	0.225	
		60	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.2	26.0	0.1	0.200	0.199
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	25.9	0.1	0.198	

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-8, M-9, M-10 และ M-11 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-8	100DCL+10CH-Control	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	23.3	0.2	0.238	0.244
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	22.3	0.1	0.251	
		60	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	22.7	0.1	0.246	0.253
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	21.4	0.2	0.260	
M-9	100DCL0FA+10CHF	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.4	22.8	0.1	0.243	0.214
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.2	30.0	0.4	0.185	
		60	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.3	26.6	0.3	0.208	0.198
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.4	29.7	0.3	0.187	
M-10	90DCL10FA+10CHF	28	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.4	20.6	0.3	0.260	0.263
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.4	19.4	0.4	0.267	
		60	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.3	19.1	0.2	0.271	0.267
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.4	19.7	0.1	0.264	
M-11	80DCL20FA+10CHF	28	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.3	19.2	0.1	0.269	0.274
			97.09	0.069	0.055	0.0037	0.2	18.8	0.1	0.279	

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-11, M-12, M-13 และ M-14 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-11	80DCL20FA+10CHF	60	97.09	0.069	0.055	0.038	0.1	19.6	0.2	0.264	0.266
			97.09	0.070	0.055	0.038	0.2	19.1	0.1	0.268	
M-12	70DCL30FA+10CHF	28	97.09	0.068	0.055	0.037	0.2	26.0	0.0	0.204	0.235
			97.09	0.069	0.055	0.038	0.1	19.5	0.1	0.266	
		60	97.09	0.069	0.055	0.037	0.2	23.3	0.1	0.227	0.220
			97.09	0.070	0.055	0.038	0.1	23.8	0.2	0.213	
M-13	60DCL40FA+10CHF	28	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	29.1	0.2	0.174	0.177
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	28.7	0.2	0.180	
		60	97.09	0.070	0.055	0.0039	0.1	23.0	0.2	0.219	0.215
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	24.2	0.2	0.210	
M-14	100DCL+15CH-Control	28	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.1	29.1	0.2	0.184	0.181
			97.09	0.068	0.055	0.0037	0.1	29.9	0.2	0.177	
		60	97.09	0.068	0.055	0.0037	0.1	29.8	0.1	0.178	0.183
			97.09	0.068	0.055	0.0036	0.1	28.4	0.1	0.189	

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-15, M-16, M-17 และ M-18 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-15	100DCL0FA+15CHF	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.2	24.1	0.1	0.229	0.230
			97.09	0.065	0.055	0.0033	0.2	25.2	0.1	0.232	
		60	97.09	0.066	0.055	0.0034	0.1	28.7	0.2	0.200	0.210
			97.09	0.066	0.055	0.0034	0.1	26.4	0.2	0.219	
M-16	90DCL10FA+15CHF	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.2	27.5	0.1	0.202	0.199
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	28.2	0.2	0.197	
		60	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.2	22.6	0.1	0.245	0.247
			97.09	0.066	0.055	0.0034	0.2	23.0	0.1	0.248	
M-17	80DCL20FA+15CHF	28	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.2	22.9	0.2	0.237	0.237
			97.09	0.068	0.055	0.0036	0.2	22.9	0.2	0.236	
		60	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.2	22.5	0.1	0.239	0.213
			97.09	0.076	0.055	0.0045	0.2	23.0	0.1	0.187	
M-18	70DCL30FA+15CHF	28	97.09	0.069	0.055	0.0037	0.1	21.5	0.1	0.243	0.244
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	21.1	0.1	0.245	

ตารางที่ 1.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-18, M-19, M-20 และ M-21 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m ^o K)	K _{avg} (w/m ^o K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-18	70DCL30FA+15CHF	60	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	23.6	0.2	0.219	0.221
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	22.9	0.2	0.222	
M-19	60DCL40FA+15CHF	28	97.09	0.069	0.055	0.0038	0.2	23.0	0.1	0.225	0.221
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.0	24.0	0.1	0.216	
		60	97.09	0.069	0.055	0.0037	0.2	23.4	0.1	0.223	0.224
			97.09	0.069	0.055	0.0038	0.1	23.1	0.1	0.224	
M-20	100DCL+20CH-Control	28	97.09	0.068	0.055	0.0037	0.1	24.1	0.2	0.220	0.236
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	21.9	0.2	0.252	
		60	97.09	0.069	0.055	0.0037	0.2	20.0	0.1	0.263	0.233
			97.09	0.068	0.055	0.0037	0.2	26.3	0.2	0.203	
M-21	100DCL0FA+20CHF	28	97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	31.1	0.2	0.180	0.185
			97.09	0.066	0.055	0.0034	0.2	29.9	0.1	0.189	
		60	97.09	0.065	0.055	0.0033	0.0	32.4	0.2	0.180	0.179
			97.09	0.066	0.055	0.0034	0.0	31.9	0.2	0.178	

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-22, M-23, M-24 และ M-25 อายุ 28 และ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d_{sample} (m)	L_{sample} (m)	A_{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m°K)	K_{avg} (w/m°K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-22	90DCL10FA+20CHF	28	97.09	0.060	0.055	0.0028	0.1	26.2	0.1	0.263	0.222
			97.09	0.067	0.055	0.0035	0.1	30.6	0.1	0.182	
		60	97.09	0.066	0.055	0.0035	0.1	28.9	0.2	0.195	0.194
			97.09	0.066	0.055	0.0035	0.1	29.2	0.2	0.193	
M-23	80DCL20FA+20CHF	28	97.09	0.068	0.055	0.0036	0.2	25.1	0.1	0.213	0.220
			97.09	0.069	0.055	0.0037	0.2	23.0	0.1	0.228	
		60	97.09	0.068	0.055	0.0037	0.2	28.2	0.1	0.189	0.209
			97.09	0.069	0.055	0.0037	0.2	22.8	0.1	0.229	
M-24	70DCL30FA+20CHF	28	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	24.5	0.1	0.208	0.203
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	25.6	0.1	0.199	
		60	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	25.8	0.1	0.197	0.189
			97.09	0.070	0.055	0.0039	0.0	27.9	0.2	0.180	
M-25	60DCL40FA+20CHF	28	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	22.7	0.1	0.224	0.218
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.2	23.9	0.1	0.212	

ตารางที่ ๖.8 ผลการทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของส่วนผสม M-25 อายุ 60 วัน

No.	Mix Description	Age (day)	Q (watt)	d _{sample} (m)	L _{sample} (m)	A _{sample} (m ²)	Temperature (°C)			K (w/m°K)	K _{avg} (w/m°K)
							ΔT_1	ΔT_s	ΔT_2		
M-25	60DCL40FA+20CHF	60	97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	23.8	0.1	0.213	0.217
			97.09	0.070	0.055	0.0038	0.1	22.9	0.1	0.222	



ภาคผนวก จ

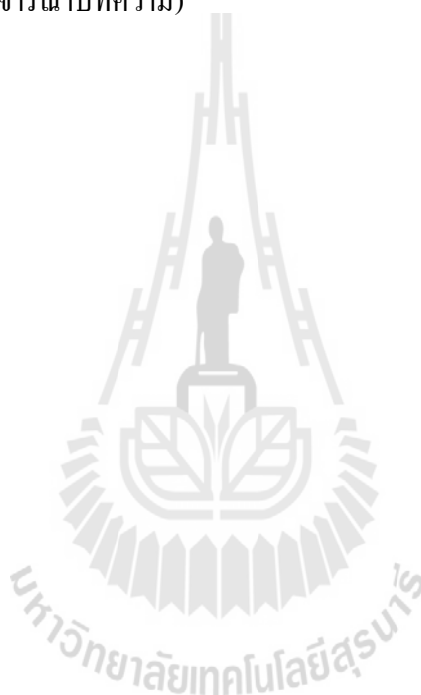
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

อภิชาติ ราชคำ และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2557). การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐดินเหนียวผสมถั่ว
ลอย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 19 ประจำปี 2557 (The National
Convention on Civil Engineering, NCCE-19), หน้า 916 - 923.

พุดพิพัทธ์ ราชคำ และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2558). การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสม
ถั่วลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
(อยู่ระหว่างการพิจารณาบทความ)





การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย

A Study of Basic Properties of Clay Brick Containing Fly Ash

อภิชาติ ราชคำ^{1,*} และ วีรวัฒน์ อินศิริ²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษากำลังอัด, หน่วยน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ และการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียว บดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ศึกษาการใช้ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุผสมเพิ่มอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก กำหนดใช้อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียวที่เหมาะสมเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนักดินเหนียวหล่อตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อมาตรฐาน 215x103x65 มม.ตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องทดสอบเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างด้วยวิธีบ่มชื้นใช้พลาสติกคลุมให้มีมิดชิด บ่มตัวอย่างที่อายุการทดสอบ 7, 28 และ 60 วัน จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนผสมแทนที่ดินเหนียวด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 7.17 กก/ซม² และ 21.66 กก/ซม², หน่วยน้ำหนักขึ้น เท่ากับ 1398.38 กก/ม³ และ 1278.82 กก/ม³, หน่วยน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 1179.65 กก/ม³ และ 1086.79 กก/ม³, ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 27.05 และ 28.47 และค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง เท่ากับ 2.18 และ 1.65 ที่อายุการทดสอบ 28 และ 60 วันตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยในการผลิตอิฐดินเหนียวช่วยปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

คำสำคัญ: อิฐดินเหนียว, กำลังอัด, การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง, หน่วยน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ

Abstract

This paper aims to study the role of influential factors on compressive strength, density, water absorption and total volumetric dry shrinkage by substituting fly ash (FA) for clay in ratio of 0 %, 10 %, 20 %, 30 % and 40 % by weight. The study of Ca (OH)₂ was used as an admixture material in ratio of 10 by weight and clay-water ratio determine at optimum value of 0.65 by clay weight. The FA-clay brick

(mixture of FA, clay and water) was mixed thoroughly for 10 min and transferred to mold with 215x103x65 mm, kept at room temperature for 48 hours. Compressive strength tests were performed after 7, 28 and 60 days of curing. The compressive strength result revealed that the replacement percentage of FA of 40 % by weight of clay provide compressive strength of 7.17 ksc and 21.66 ksc, wet unit weight of 1398.38 kg/m³ and 1278.82 kg/m³, dry unit weight of 1179.65 kg/m³ and 1086.79 kg/m³, water absorption of 27.05 % and 28.47 % and total volumetric dry shrinkage of 2.18 % and 1.65 % for 28 and 60 days, respectively. Consequently, the using of FA for clay brick can be improved suitable physical properties to use as replacement material in manufacturing of clay brick.

Keywords: Clay Brick, Compressive Strength, Total Volumetric Dry Shrinkage, Unit Weight, Water Absorption

1. บทนำ

“อิฐดินหรืออิฐดินเหนียว (Adobe or Clay Brick)” หมายถึง อิฐที่ยังไม่เข้าสู่กระบวนการเผา ถือว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดและถูกใช้มาตั้งแต่อดีตกาลจวบจนปัจจุบัน อิฐดินเหนียวจะถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่ใช้ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ อาทิเช่น บ้านดิน (Earth Housing) อิฐดินเหนียวจะมีคุณสมบัติที่ทนต่อการดูดซึมน้ำ ความร้อน เป็นฉนวนและทนต่อเสียงรบกวนได้ดี ความหนาแน่นของอิฐดินเหนียวคิดต่อลูกบาศก์เมตรจะมีความหนาแน่น 1,600–1,920 kg/m³ [1] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตโครงสร้าง ซึ่งถือว่าน้ำหนักมากพอสมควร ข้อดีอีกประการหนึ่งของอิฐที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานจากดินเหนียว คือ ด้านกำลัง, ความคงทนและการต้านทานต่อการชะล้างของน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุช่วยปรับสภาพดินเหนียว (Stabilizer) เพื่อใช้ในการผสมหรือเคลือบผิววัสดุจากดินเหนียวให้มีความสามารถในการคงทนต่อการชะล้าง

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: struc_engineer_ap@windowslive.com

ของน้ำ [2] โดยเลือกใช้วัสดุของเสียเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ เช่น เถ้าถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ กากอิปซั่ม ฯลฯ [3] มาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของอิฐดินเหนียวให้ดีขึ้น

จากงานวิจัยของ G. Cultrone and E. Sebastián [4] ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยในวัสดุอิฐดินเหนียวสำหรับปรับปรุงคุณภาพของอิฐ โดยทำการแบ่งอัตราส่วนผสมของอิฐออกเป็น 2 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนที่เผาด้วยอุณหภูมิ 800 – 1000 °C ใช้เถ้าลอยผสมร้อยละ 5 - 15 โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ไม่ได้ใช้เถ้าลอยผสม จากการวิจัย พบว่า สีของเนื้ออิฐที่ผสมเถ้าลอยจะมีเนื้อสีที่ละเอียดกว่าอิฐที่ไม่ผสมเถ้าลอย อิฐที่สามารถนำไปใช้งานได้ คือ ส่วนผสมที่มีขนาดของอนุภาคของเถ้าลอยผสมอยู่และมีการกระจายตัวของอนุภาคอยู่ช่วง 0.1 ถึง 10 ไมครอน อนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กจะช่วยลดน้ำหนัก ปรับปรุงความทนทานของอิฐ ลดการผุกร่อน ลดความพรุนภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติของเถ้าลอยยังมีส่วนช่วยลดความพรุนขนาดเล็กภายใน เพิ่มคุณสมบัติในด้านกำลัง ลดความหนาแน่น ดังนั้น การนำเถ้าลอยมาใช้ในทางปฏิบัติจึงเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่และช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้อีกทาง

X. Lingling, G. Wei, W. Tao and Y. Nanru [5] ได้ศึกษาอิฐดินเผาที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวในปริมาณสูงที่ร้อยละ 0, 50, 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าลอยที่มีความชื้นต่ำและคุณภาพสูง มาเป็นวัสดุแทนที่ดินเหนียวสำหรับทำอิฐดินเผา ศึกษาผลที่ได้จากการใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวในปริมาณสูง ผลของการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เผาและคุณสมบัติเบื้องต้นของอิฐ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดัชนีความเปราะพลาสติกของอัตราส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมที่ใช้ดินเหนียวแทนที่เถ้าลอย นอกจากนี้ ยังช่วยปรับปรุงดัชนีความเป็นพลาสติกของส่วนผสม ให้มีความชื้นเหลวที่พอเหมาะ สามารถปั้นขึ้นรูปได้ง่าย และเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 1,050 °C ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าการเผาอิฐโดยทั่วไปที่ 50–100 °C คุณสมบัติของอิฐดินเผาที่ใช้เถ้าลอยละเอียดเป็นวัสดุผสม พบว่า อิฐดินเผาที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณสูงที่อัตราส่วน 70 : 30 (เถ้าลอย:ดินเหนียว) มีค่าของกำลังอัดที่สูง การดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ลดการหดตัว ลดการแตกร้าว และมีความคงทนต่อการกัดกร่อนของน้ำแข็งเมื่ออยู่ในสภาวะแช่แข็งเป็นระยะเวลานานได้ดี

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อทดสอบหาสัดส่วนผสมของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยให้มีคุณสมบัติและสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถหล่อขึ้นรูปได้โดยง่าย
- 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังอัดในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม
- 3) เพื่อศึกษาหน่วยน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ และการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งในอัตราส่วนที่กำหนดกับอิฐดินเหนียวควบคุม

3. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

3.1.1 ดินเหนียวตากแห้งบดละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 จากแหล่งอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา ต.ด่านเกวียน อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา ซึ่งใช้สัญลักษณ์ DCL

3.1.2 เถ้าลอย เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ FA

3.1.3 ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือปูนขาวไฮเดรต จากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งใน จ.สระบุรี ซึ่งใช้สัญลักษณ์ CH

3.1.4 น้ำ เป็นน้ำประปาในพื้นที่ จ.นครราชสีมา

3.2 อัตราส่วนผสม

3.2.1 อัตราส่วนผสมของอิฐดินเหนียวควบคุมใช้ดินเหนียวล้วนร้อยละ 100 ผสมน้ำ บ่มตัวอย่างโดยการตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องทดลองที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน

3.2.2 ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของดินเหนียว

3.2.3 ใช้ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม มีคุณสมบัติช่วยยึดประสานระหว่างแร่ดินเหนียวกับเถ้าลอย ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของดินเหนียว ของส่วนผสม

3.2.4 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมทุกอัตราส่วนผสม หาได้จากการทดสอบหาค่าขีดจำกัดความชื้นเหลว ตามมาตรฐาน ASTM D4318-10 โดยเลือกปริมาณน้ำที่ใช้ผสมไม่ให้มีค่าสูงเกินกว่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียว กำหนดเลือกใช้ที่อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียว 0.65 (W/CL = 0.65) ของทุกส่วนผสม (ตารางที่ 1)

3.2.5 ทำการขึ้นรูปหล่อตัวอย่างอิฐโดยวิธีการอัดตัวและกระทุ้งแน่นลงในแบบหล่อมาตรฐาน ขนาด 215x103x65 มม ตามมาตรฐาน BS : 3921-03 [6] ดังรูปที่ 1 ตากทิ้งไว้ให้แข็งตัวในอุณหภูมิห้องทดลองระยะเวลา 48 – 72 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อ หลังจากนั้นนำไปบ่มโดยการบ่มชื้น โดยใช้พลาสติกใสคลุมให้มิดชิด เป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน ตากก้อนตัวอย่างให้แห้งในห้องทดลอง 1 วัน เพื่อไล่ความชื้น วัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 1 แบบหล่อตัวอย่างอิฐขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของอิฐดินเหนียว

No.	Mix	DCL (%)	FA (%)	CH (%)	W / CL
1	100DCL-control	100	0	0	0.65
2	100DCL0FA+10CH	100	0	10	0.65
3	90DCL10FA+10CH	90	10	10	0.65
4	80DCL20FA+10CH	80	20	10	0.65
5	70DCL30FA+10CH	70	30	10	0.65
6	60DCL40FA+10CH	60	40	10	0.65

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียด และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

3.3.1 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ, ชัดพิทักความชื้นเหลว, ชัดพิทักแบบพลาสติก และดัชนีความเป็นพลาสติกของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D4318-10 [7]

3.3.2 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเนื้อละเอียดและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอ ชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier) ตาม ASTM C188-09 [8]

3.3.3 ทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียดและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เครื่อง Mastersizer

3.3.4 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียดและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียดและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.4 การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

ทดสอบกำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเนื้อละเอียด เปรียบเทียบกับตัวอย่างอิฐดินเหนียวควบคุม ตามมาตรฐาน ASTM C67-11 [9]

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น หน่วงน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำของตัวอย่างอิฐ ตามมาตรฐาน ASTM C140-11 [10]

3.6 ทดสอบหาค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง

วิเคราะห์โดย วัดขนาด กว้างxยาวxสูง หาปริมาตรของก้อนอิฐก่อนอบแห้ง อบตัวอย่างอิฐไว้แห้งที่อุณหภูมิ 105 – 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดขนาด กว้างxยาวxสูง หาปริมาตรหลังอบแห้ง และคำนวณหาค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง (Total Volumetric Dry Shrinkage ; T.V.S) [11] ตามสมการ (1)

$$T.V.S = \left(\frac{V_p - V_f}{V_p} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดย V_p คือ ปริมาตรของก้อนอิฐก่อนอบแห้ง
 V_f คือ ปริมาตรของก้อนอิฐหลังอบแห้ง

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ

ตารางที่ 2 แสดงค่าผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน มีค่าเท่ากับ 2.81 ชัดพิทักเหลว มีค่าเท่ากับร้อยละ 66.21 ชัดจำกัดพลาสติก มีค่าเท่ากับร้อยละ 39.22 และค่าดัชนีพลาสติก มีค่าเท่ากับร้อยละ 26.99 และการจำแนกประเภทของดินเหนียวตามระบบเอกภาพ (USCS) จัดเป็นดินเหนียวประเภท ดินตะกอนที่มีความเป็นพลาสติกสูง (MH) มีลักษณะของเม็ดดินเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 2



แร่ดินเหนียวด้านกายภาพ

แร่ดินเหนียวด้านกายภาพบดละเอียด

รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของเม็ดดินตามธรรมชาติและผ่านการบดละเอียด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ

Properties	Dan Kwan Clay
Classification	
USCS	MH
Atterberg Limit	
Liquid Limit LL (%)	66.21
Plastic Limit PL (%)	39.22
Plastic Index PI (%)	26.99
Specific Gravity	2.81

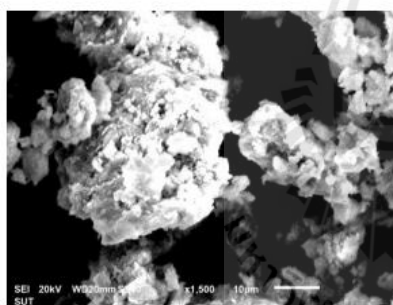
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียด และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 3 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแร่ดินเหนียวด้านกายภาพ, เนื้อละเอียดและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจากการที่นำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพขยายอนุภาคแบบส่องกราดด้วยเครื่อง

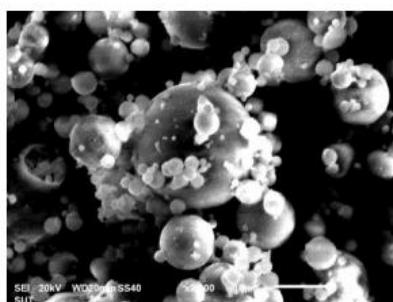
Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า แร่ดินเหนียวด้านเหนียว มีลักษณะอนุภาคเป็นผลึกเปลือกแผ่นบางซ้อนตัวเรียงกันอยู่หนาแน่น ยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม มีความพรุน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.88 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3 ก เมื่อพิจารณารูปที่ 3 ข พบว่า เถ้าลอย มีรูปร่างลักษณะของอนุภาคกลมมน เนื้อภายในแน่นและพื้นผิวภายนอกเรียบ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 8.80 ไมครอน และพิจารณารูปที่ 3 ค พบว่า ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นผลึกเล็ก ๆ กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก จับเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทั้งกลุ่มเล็กและกลุ่มใหญ่ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.63 ไมครอน โดยกราฟการกระจายขนาดของแร่ดินเหนียวด้านเหนียว, เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง Mastersizer แสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 3 ความจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแร่ดินเหนียวด้านเหนียว, เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

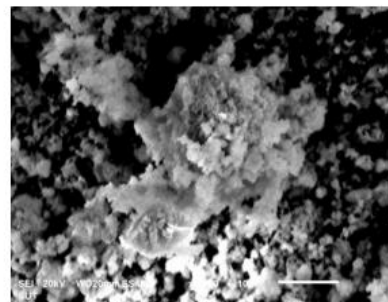
Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size
		d_{50} (micron)
DCL	2.81	10.88
FA	2.34	8.80
CH	2.02	6.63



รูปที่ ก ภาพขยาย 1500 เท่าของแร่ดินเหนียวด้านเหนียวบดละเอียด

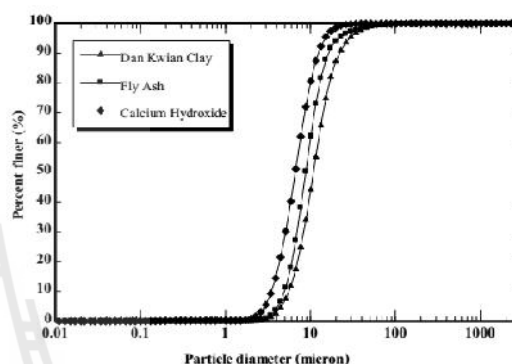


รูปที่ ข ภาพขยาย 2000 เท่าของเถ้าลอยแม่น้ำมะ



รูปที่ ค ภาพขยาย 2000 เท่าของผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุโดย SEM



รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินเหนียวด้านเหนียว, เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเหนียวด้านเหนียว, เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเหนียวด้านเหนียว, เถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า แร่ดินเหนียวด้านเหนียว มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2 = 53.34\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 23.37\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5.38\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ 80.09 %, เถ้าลอย มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2 = 35.75\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18.88\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 11.43\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ 66.06 % ซึ่งกล่าวได้ว่า เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [12] และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณสารประกอบหลักเป็น $\text{CaO} = 88.15\%$, $\text{SiO}_2 = 4.18\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.07\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.13\%$ ซึ่งมีค่ารวมกันประมาณ 93.38 % ไม่จัดว่า ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุปอซโซลาน แต่จัดเป็นวัสดุจำพวกวัสดุช่วยยึดประสาน

4.2 ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวภายนอกของก้อนอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยหลังการหล่อขึ้นรูป

รูปที่ 5 แสดงผลการสำรวจเชิงกายภาพพื้นผิวภายนอกของก้อนอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า พื้นผิวภายนอกมีสีที่เปลี่ยนไปตามการแทนที่ปริมาณเถ้าลอยในดินเหนียว ส่วนผสมที่ใช้ดิน

เหนียวส่วนมีสีน้ำตาลเข้ม ส่วนผสมที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงจะมีสีเทาไปจนถึงสีเทาอ่อน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [13] ในส่วนผสม พื้นผิวภายนอกมีลักษณะที่ผิวเรียบเสมอกัน รูปพรุน รอยแตกร้าวที่ผิวกับขอบของอิฐ การหดตัวลดน้อยลง เมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในก้อนอิฐในสัดส่วนที่มากขึ้น

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	DCL	FA	CH
Silicon Dioxide (SiO ₂)	51.34	35.75	4.18
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	23.37	18.88	1.07
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃)	5.38	11.43	0.13
Calcium Oxide (CaO)	0.16	14.38	88.15
Magnesium Oxide (MgO)	3.82	6.03	6.32
Sodium Oxide (Na ₂ O)	13.68	7.41	-
Potassium Oxide (K ₂ O)	1.24	1.79	-
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.01	4.22	0.14
Loss On Ignition (LOI)	8.42	1.79	6.93
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	80.09	66.06	5.38

DCL = Dan Kwian Clay

FA = Fly Ash

CH = Calcium Hydroxide (Ca(OH)₂) or Hydrate Lime

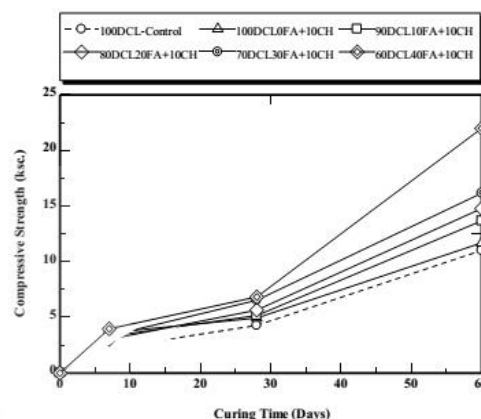


รูปที่ 5 ขนาดของก้อนตัวอย่างอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10

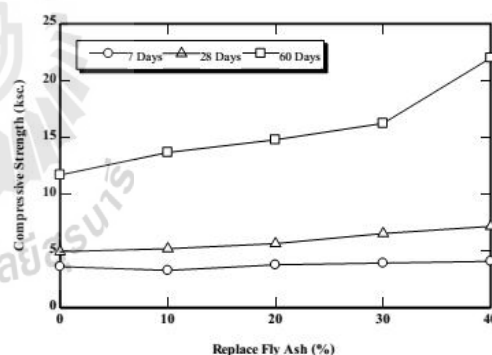
4.3 ผลการทดสอบกำลังอัด

จากรูปที่ 6 พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยจะแปรผันโดยตรงกับอายุการบ่ม ซึ่งเมื่ออายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวควบคุม ค่ากำลังอัดของอัตราส่วน 60DCL40FA+10CH มีค่าสูงสุด คือ 7.16 กก/ชม² และ 21.99 กก/ชม² ที่อายุ 28 และ 60 วัน และค่ากำลังอัดของอัตราส่วน 100DCL0FA+10CH มีค่าต่ำสุด คือ 4.94 กก/ชม² และ 11.690

กก/ชม² ที่อายุ 28 และ 60 วัน ในส่วนค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวควบคุม 100DCL- Control มีค่ากำลังอัด อยู่ที่ 4.28 กก/ชม² และ 11.01 กก/ชม² ที่อายุ 28 และ 60 วัน จากการวิเคราะห์ พบว่า กำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยในระยะปลายที่มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าอิฐดินเหนียวควบคุม เป็นผลจากออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในแร่ดินเหนียวและเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ เกิดเป็น “ปฏิกิริยาปอซโซลานิก” ซึ่งจะช่วยพัฒนาค่ากำลังอัดให้เพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะปลาย [14]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอายุการบ่ม

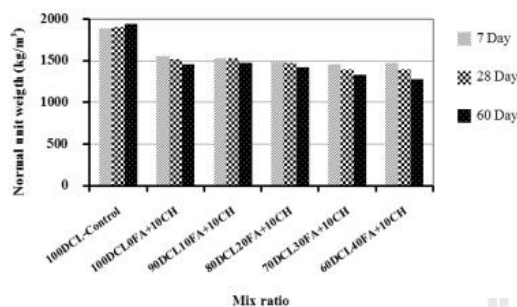


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย

จากรูปที่ 7 พบว่า ค่ากำลังอัดของอิฐดินเหนียวจะแปรผกผันกับปริมาณของเถ้าลอยที่แทนที่ในส่วนผสม คือ เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่มากขึ้น ค่ากำลังอัดมีค่าที่สูงขึ้น ตามปริมาณเถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวเทียบกับอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในดินเหนียวที่ร้อยละ 10 - 40 จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นไปอย่างช้า ทำให้มีค่ากำลังอัดต่ำในช่วงอายุ 7 วันแรก [15] หลังจากนั้นมีการพัฒนาค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาวที่

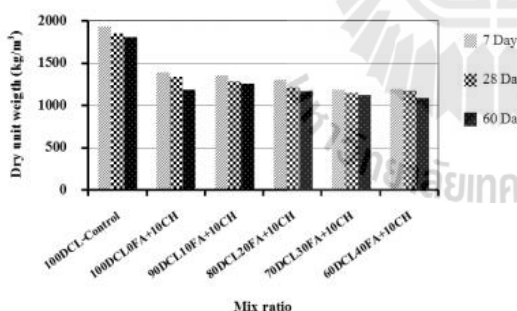
อายุ 28 และ 60 วัน อันเป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นไปอย่างสมบูรณ์ในช่วงระยะปลาย

4.4 หน่วยน้ำหนักขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอิฐดินเหนียวควบคุม

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐดินเหนียวผสม เถ้าลอยเปรียบเทียบกับอิฐดินเหนียวควบคุม หลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิ ห้องทดลอง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐรา ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่มีค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นอยู่ระหว่าง 1278.82 – 1556.28 กก/ม³ และอิฐดินเหนียวควบคุม มีค่าหน่วยน้ำหนักขึ้น อยู่ระหว่าง 1896.32 – 1950.05 กก/ม³ จากการวิเคราะห์พบว่า หน่วยน้ำหนัก ในสถานะขึ้นของอิฐจะแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอย คือเมื่อปริมาณเถ้า ลอยมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าที่ลดลง มีน้ำหนักเบา เมื่อ เปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักขึ้นของอิฐควบคุมที่มีค่าหน่วยน้ำหนักมาก

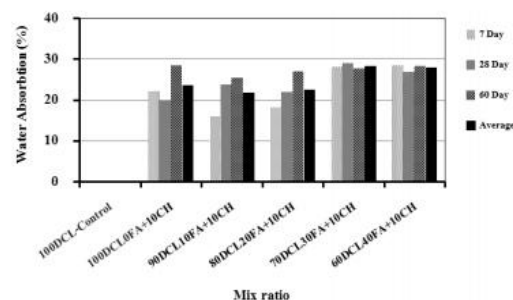


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักแบบแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอิฐดินเหนียวควบคุม

รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐดินเหนียวผสม เถ้าลอยเปรียบเทียบกับอิฐดินเหนียวควบคุม โดยการอบแห้งไล่ความชื้น ในเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 – 115 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่มีค่าหน่วย น้ำหนักแห้ง อยู่ระหว่าง 1086.79 – 1396.70 กก/ม³ และอิฐดินเหนียว ควบคุม มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง อยู่ระหว่าง 1813.39 – 1933.78 กก/ม³ จาก

การวิเคราะห์พบว่า ปริมาณความชื้นหลังการบ่มขึ้นที่อยู่ในมวลของอิฐ มี ส่วนสำคัญที่ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าที่มากกว่าค่าหน่วยน้ำหนัก แห้งเมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะมีน้ำหนักที่เบาว่า นอกจากนี้ อนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยยังช่วยลดน้ำหนักของมวลภายใน ให้มีน้ำหนักเบา เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ

4.5 การดูดซึมน้ำ



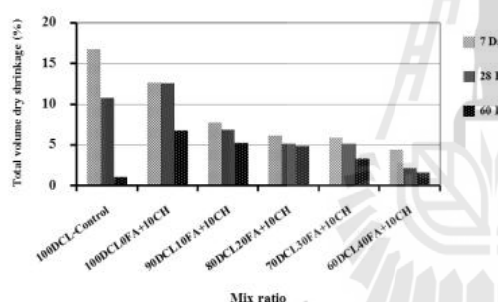
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย และผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอิฐดินเหนียวควบคุม

รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐดินเหนียวผสมเถ้า ลอยกับอิฐดินเหนียวควบคุม ของตัวอย่างอิฐในสภาพแห้งที่ถูกแช่ในน้ำ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ดินเหนียวในอัตรา ส่วนผสมร้อยละ 0, 10 และ 20 มีค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 21.85 – 23.61 อัตราส่วนผสมร้อยละ 30 และ 40 มีค่าการดูดซึมน้ำ เฉลี่ยอยู่ระหว่างร้อยละ 28.02 – 28.40 เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำของอิฐ ดินเหนียวควบคุม อยู่ที่ร้อยละ 0 กล่าวคือ ไม่มีความสามารถในการดูดซึม น้ำได้ เนื่องจากส่วนผสมเป็นดินเหนียวล้วน เมื่อวิเคราะห์ พบว่า การใช้ ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ในส่วนผสมของดินเหนียว และเถ้าลอย ทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวยึดประสานระหว่างเม็ดดินเหนียวและ สารปอซโซลาน เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานีกระหว่างออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินาที่มีอยู่ในดินเหนียวและเถ้าลอยกับแคลเซียมออกไซด์ที่มีใน ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยยึดประสาน ทำให้ อนุภาคดินเหนียวและเถ้าลอยยึดจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ไม่แตกย่อยสลาย เวลาถูกแช่น้ำเมื่อแช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน จึงช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการ ดูดซึมน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่เกิดการแตกย่อยสลายออก เมื่อถูกแช่น้ำทำให้อิฐดินเหนียวควบคุมไม่มีความทนต่อการดูดซึมน้ำ

4.6 การหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง

รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวม แบบแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยกับอิฐดินเหนียวควบคุม โดยการ อบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 – 115 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องทดลอง ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน พบว่า ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของอิฐดินเหนียว

ควบคุม 100DCL-Control มีการหดตัวแบบแห้งที่ค่อนข้างสูงระยะแรก ที่อายุ 7 วัน ที่ร้อยละ 16.71 โดยปริมาตร จากนั้นการหดตัวก็จะมีค่าที่ลดลงที่อายุ 28 และ 60 วัน อยู่ที่ร้อยละ 10.16 และ 1.08 โดยปริมาตร ตามลำดับ และค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยที่มีค่าหดตัวสูงสุดจะอยู่ที่อัตราส่วนผสม 100DCL0FA+10CH มีค่าร้อยละการหดตัวแบบแห้งระยะแรกที่อายุ 7 วัน ค่อนข้างสูงที่ร้อยละ 12.71 โดยปริมาตร หลังจากนั้นค่าการหดตัวลดลงที่อายุ 28 และ 60 วัน ที่ร้อยละ 12.60 และ 6.85 โดยปริมาตร ตามลำดับ ในส่วนค่าหดตัวสูงสุดจะอยู่ที่อัตราส่วนผสม 60DCL40FA+10CH มีค่าร้อยละการหดตัวแบบแห้งระยะแรกที่อายุ 7 วัน ค่อนข้างต่ำที่ร้อยละ 4.48 โดยปริมาตร หลังจากนั้นค่าการหดตัวลดลงที่อายุ 28 และ 60 วัน ที่ร้อยละ 2.18 และ 1.65 โดยปริมาตร ตามลำดับจากการวิเคราะห์เพิ่มเติม พบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ในอิฐดินเหนียวในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะช่วยลดการหดตัวแบบแห้งให้ต่ำลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการหดตัวของอิฐดินเหนียวควบคุมที่มีค่าการหดตัวสูง นอกจากนี้ อนุภาคนาโนเล็กของเถ้าลอยที่อยู่ในส่วนผสมมีส่วนช่วยลดการผุกร่อน ลดขนาดรูพรุนภายในลดการหดตัวได้ดี เนื่องจากอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างและช่วยอุดรูพรุน ซึ่งทำให้เนื้อมวลของอิฐแน่นขึ้น



รูปที่ 11 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 กับอิฐดินเหนียวควบคุม

5. สรุปผลการวิจัย

- ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยและผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุช่วยประสาน พบว่า ผิวภายนอกมีสีที่เปลี่ยนจากน้ำตาลเข้มไปจนถึงสีเทาอ่อน พื้นผิวดูเรียบเสมอกัน มีเนื้อมวลที่แน่นขึ้น รอยแตกร้าวที่ผิวและขอบลดน้อยลง การหดตัวลดลง และน้ำหนักเบา
- จากผลการทดสอบกำลังอัด พบว่า กำลังอัดจะแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอย กล่าวคือ ปริมาณเถ้าลอยถูกใช้แทนที่ในดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ อัตราส่วน 60DCL40FA+10CH มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 7.16 กก/ซม² และ 21.99 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน
- หน่วยน้ำหนักขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอยที่น้ำหนักเบาที่สุด คือ อัตราส่วน 60DCL40FA+10CH มีหน่วย

น้ำหนัก เท่ากับ 1278.82 กก/ม³ และ 1086.79 กก/ม³ ตามลำดับ งานวิจัยครั้งนี้ ทราบว่า หน่วยน้ำหนักของอิฐจะแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอย และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ภายในเนื้อมวลของอิฐมีส่วนทำให้หน่วยน้ำหนักขึ้นมีค่าที่มากกว่าหน่วยน้ำหนักแห้ง

- จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่า อิฐดินเหนียวที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 0 – 20 มีการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 25 และเมื่อใช้แทนที่ร้อยละ 30 – 40 ค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าร้อยละ 25
- จากผลการทดสอบร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งของอิฐดินเหนียวผสมเถ้าลอย พบว่า การหดตัวแบบแห้งแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่คือ ปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น การหดตัวลดลงตามลำดับของอายุการบ่ม ค่าร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้งมีค่าน้อยสุด คือ อัตราส่วน 60DCL40FA+10CH มีค่าอยู่ระหว่าง 1.65 – 4.48 โดยปริมาตร
- ผลการการใช้ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่ร้อยละ 10 ของส่วนผสม พบว่า อนุภาคนาโนเล็กของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการยึดประสานได้ระหว่างเม็ดดินเหนียวกับสารปอซโซลาน ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน มีส่วนทำให้เนื้อมวลภายในมีการยึดเกาะที่ดี และไม่แตกตัวเมื่อถูกความชื้น
- การศึกษานี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อดินเหนียว 0.65 ที่ได้จากการทดสอบค่าขีดจำกัดเหลวของดินเหนียว มีผลต่อปริมาณความชื้นเหลวของส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมลงในแบบหล่อได้ง่าย ไม่เหนียวหรือเหลวเกินไป เหมาะสำหรับการใช้เป็นอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย รวมถึงผู้ร่วมวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kumar, "A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development", *Construction and Building Materials*, 16(1), pp. 519-525, December.2002.
- [2] รัฐภูมิ ปรีชาดำบริษา, ธรรมบุญ เสงฆภูมิกุล และ พิชัย นิมิตรองสกุล, "การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าแกลบและวัสดุธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างต้นทุนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม", *วารสารคอนกรีต*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 17, พ.ศ.2555, หน้า 101-112.
- [3] L. Zhang, "Production of bricks from waste materials – A review", *Construction and Building Materials*, 47(1), pp. 643-655, October. 2013.

- [4] G. Cultrone and E. Sebastián, "Fly ash addition in clayey materials to improve the quality of solid bricks", *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 1178-1184, February.2009.
- [5] X. Lingling, G. Wei, W. Tao, and Y. Nanru, "Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio", *Construction and Building Materials*, 19(1), pp. 243-247, April.2005.
- [6] British Standard Institute, "BS 3921-03 : Specification for clay bricks," UK, 2003.
- [7] American Society for Testing and Materials, "ASTM D4318-10 ; Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia, USA, 2010.
- [8] American Society for Testing and Materials, "ASTM C188-09 ; Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.01, Philadelphia, USA, 2009.
- [9] American Society for Testing and Materials, "ASTM C67-11 ; Standard Test Methods For Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia, USA, 2011.
- [10] American Society for Testing and Materials, "ASTM C140-11 ; Standard Test Methods For Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia, USA, 2011.
- [11] วรินทร์ ปัญญาพัฒนศักดิ์ และ คณะ, "พฤติกรรมการหดตัวและกำลังรับแรงอัดของอิฐดินเหนียวเมื่อผสมกากซีเมนต์", *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 4, พ.ศ.2552, หน้า 283-292.
- [12] American Society for Testing and Materials, "ASTM C618-01 ; Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete", Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia, USA, 2001.
- [13] N. Degirmenci and B. Baradan, "Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls," *Construction and Building Materials*, 19(1), pp. 536-542, September.2005.
- [14] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, *ปูนซีเมนต์ ปอช โขลานและคอนกรีต*, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย(สคท.),พ.ศ. 2549, หน้า 302-316.
- [15] รุ่งโรจน์ ปิยะกานูวัฒน์ และ เอกรัตน์ รวยรวย, "การใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากฝุ่นอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์", *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 2, พ.ศ.2555, หน้า 139-145.

ประวัติผู้เขียน

นายวุฒิพัทธ์ ราชคำ เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ.2525 เริ่มต้นศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านพังโคน จำปาสามัคคีวิทยา อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร และเข้ารับการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นชั้นปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนพังโคนวิทยาคม อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร และสำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างก่อสร้าง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสกลนคร เมื่อปี พ.ศ.2544 และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างก่อสร้าง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตสกลนคร เมื่อปี พ.ศ.2546 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จากศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2550

หลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา และเริ่มทำงานที่บริษัท เอ็มซีอาร์พี คอนสตรัคชั่น จำกัด ตำแหน่งวิศวกรโยธา ช่วงปี พ.ศ.2550 – 2551 ที่หน่วยงานก่อสร้างโครงการบ้านจัดสรรมาหะชัยเมืองใหม่ อำเภอมหาชัย จังหวัดสมุทรสงคราม ต่อมาเมื่อปี พ.ศ. 2551 ได้ทำงานที่ห้างหุ้นส่วนจำกัด วาริช พ.การช่าง ตำแหน่งวิศวกรโยธา ช่วงปี พ.ศ.2551 – 2552 ประจำหน่วยงานก่อสร้างภายในเขตจังหวัดสกลนคร ต่อมาในปี พ.ศ.2552 ได้ปฏิบัติงานตำแหน่งอาจารย์ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ช่วงปี พ.ศ.2552-2554 ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาตนเองทั้งในด้านความรู้ และแนวคิดริเริ่มใหม่ๆ ในด้านงานวิจัย จึงเกิดแรงจูงใจเข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2554 ในระหว่างทำการศึกษาได้ปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนนักศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในวิชาปฏิบัติการสำรวจและปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี และเป็นผู้ช่วยนักวิจัยในการวิจัย “การผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลู่วิ่ง” และได้นำความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัย มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยเป็นอย่างดี

ผลงานวิจัยและตีพิมพ์ : ได้เสนอบทความงานวิจัยเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19 ประจำปี 2557 เรื่องการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐดินเหนียวผสมถั่วลลียง และนำเสนอบทความงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์วารสารวิชาการของวารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เรื่องการศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมถั่วลลียงและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (อยู่ระหว่างการพิจารณา)