



คุณลักษณะของยิปซัมเพสต์โดยใช้ยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร์
**Characterization of Gypsum Paste Using Flue Gas Desulfurization Sludge,
Rubber Wood Fly Ash and Kaolin**

สุวัฒนา นิคม

Suwattana Nikhom

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering (Structural Engineering)
Prince of Songkla University**

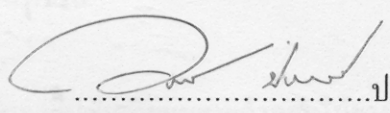
2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ คุณลักษณะของอิปซัมเพสต์โดยใช้อิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพาราและ
ดินขาวแปร
ผู้เขียน นาย สุวัฒนา นิคม
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

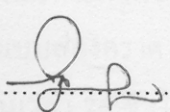
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

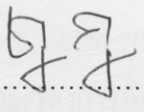


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณุพล ตันนโยภาส)

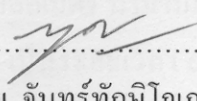
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)



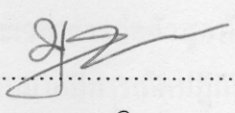
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คณุพล ตันนโยภาส)



.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์)

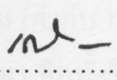


.....กรรมการ
(ดร.บุญ จันทรทักษิณภาส)



.....กรรมการ
(ดร.มณูญ มาสนิยม)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะของยิปซัมเพสต์โดยใช้ยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร
ผู้เขียน	นายสุวิธนา นิคม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของยิปซัมเทียมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรที่คัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ได้ทดสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารผสม ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยิปซัมเทียมที่ใช้ผสมต้องนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสก่อน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ออกแบบส่วนผสม 12 ส่วนผสม ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของยิปซัมเทียม: เถ้าลอยไม้ยางพารา: ดินขาวแปร 100:0:0, 90:10:0, 80:20:0, 70:30:0, 80:10:10, 70:10:20, 70:20:10, 60:20:20, 60:30:10, 50:30:20, 90:0:10, 80:0:20 ได้ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์ การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นแห้ง การดูดกลืนน้ำ สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งและกำลังอัดของแต่ละส่วนผสม โดยได้หล่อแบบลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร นำมาบ่มที่อายุ 7 วัน อายุ 28 วัน และบ่มไอน้ำความดันต่ำที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบกำลังอัด

พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมีค่าระหว่าง 13-19 นาที และ 23-32 นาที ตามลำดับ ส่วนผสมที่มียิปซัมเทียมมากมีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดี การแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราทำให้ความหนาแน่นลดลง แต่การดูดกลืนน้ำมากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูง พบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ 30% ของยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา มีความหนาแน่น 792 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งลดลงมากกว่า 24% เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของยิปซัมเทียม มีค่าการดูดกลืนน้ำ 494 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าการหดตัวแบบแห้งต่ำสุดมีค่า 0.012% สำหรับส่วนผสมที่แทนที่ 20% ของยิปซัมเทียมด้วยดินขาวแปร หนึ่งส่วนผสมที่เป็นยิปซัมเทียมล้วนให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 12.1 เมกะพาสคัล ซึ่งมากที่สุด และมีค่าการดูดกลืนน้ำต่ำสุด 202 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อีกทั้งให้ค่าสภาพนำความร้อนสูงสุด 0.185 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน แต่ส่วนผสมที่แทนที่ 30% ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด 1.14 เมกะพาสคัล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ายิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร ซึ่งเป็นวัสดุเสียจากอุตสาหกรรม มีศักยภาพที่จะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง ในรูปของบล็อกมวลเบา

คำหลัก : ยิปซัมเพสต์ เถ้าลอย ไม้ยางพารา ดินขาวแปร กำลั้งอัด บล็อกมวลเบา

Thesis Title	Characterization of Gypsum Paste Using Flue Gas Desulfurization Sludge, Rubber Wood Fly Ash and Kaolin
Author	Mr. Suwattana Nikhom
Major Program	Civil Engineering (Structural Engineering)
Academic Year	2009

ABSTRACT

The study on characterization of gypsum paste mixtures made from flu gas desulfurization (FGD) sludge, rubber wood fly ash and kaolin that passed through No 325 mesh, was carried out. The chemical and physical properties of constituent materials were determined using x-ray fluorescence spectrometer and scanning electron microscope. The FGD sludge was dried in the oven at 100 °C for 24 hours before using in the mixes. Twelve gypsum mixes with the following ratios by weight of dry FGD gypsum: rubber wood fly ash: kaolin were made; 100:0:0, 90:10:0, 80:20:0, 70:30:0, 80:10:10, 70:10:20, 70:20:10, 60:20:20, 60:30:10, 50:30:20, 90:0:10, 80:0:20. For each mix, the initial and final setting times of the pastes, drying shrinkage, dry density, water absorption, thermal conductivity in dry state and compressive strength were determined. The compressive strength were evaluated using 50 mm cube specimens air dried for 7 days, for 28 days, and those steam-cured at low pressure at 85 °C for 6 hours.

The initial and final setting times were found to be between 13-19 minutes and 23-32 minutes, respectively. Mixes with high FGD gypsum content showed good hydration reaction. Replacing FGD gypsum with rubber wood fly ash resulted in a reduction in the density and an increase in water absorption due to high permeability of the rubber wood fly ash. The mix with 30 percent of FGD gypsum replaced by rubber wood fly ash had the density of 792 kg/m³ which was more than 24 percent lower than the normal density of FGD gypsum, and the water absorption was found to be 494 kg/m³. The lowest shrinkage of 0.012 percent was obtained from specimens with 20 percent of FGD gypsum replaced by kaolin. The mix with 100 percent FGD gypsum gave the highest 28-day strength of 12.1 MPa, the highest thermal conductivity of 0.185 W/m.K, and the lowest water absorption of 202 kg/m³. The mix with 30 percent of FGD gypsum replaced by rubber wood fly ash gave the lowest compressive strength of 1.14 MPa.

The study showed that FGD sludge, rubber wood fly ash and kaolin which are

industrial wastes have the potential to be developed into a building construction material for making lightweight blocks.

Key words: gypsum paste, rubber wood fly ash, kaolin, compressive strength, lightweight blocks

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการรูปประกอบ	(12)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 เชื้อเพลิงทดแทนจากชีวมวล	4
2.2 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ายะลา	4
2.3 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ากระบี่	6
2.4 ยิปซัมเทียม	8
2.5 ดินขาว	9
2.6 การผลิตคอนกรีตบล็อก	10
2.7 การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม	12
2.8 การผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต	13
2.9 การผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำ	14
2.10 ปูนปลาสเตอร์	16
2.11 ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์	17
2.12 การบ่มคอนกรีต	17
2.13 การยัดเกาะและการแยกตัวของคอนกรีต	20
2.14 การเชื่อมของคอนกรีต	20
2.15 การจี้คอนกรีต	21
2.16 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	22
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.17 ความพรุนในเนื้อคอนกรีต	23
2.18 มาตรฐาน มอก.1505-2541 และมาตรฐาน มอก.1510-2541	23
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	25
3.2 วิธีการทดสอบยิปซัมเพสต์	26
3.3 องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.4 การหาปริมาณน้ำของเพสต์ควบคุม	38
4 ผลและอภิปรายผลการศึกษา	
4.1 ระยะเวลาการก่อตัว	41
4.2 ความหนาแน่นของยิปซัมเพสต์	45
4.3 การดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์	51
4.4 การหดตัวของยิปซัมเพสต์	55
4.5 กำลังอัดของยิปซัมเพสต์	60
4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์	73
4.7 สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง	76
4.8 โครงสร้างจุลภาค	78
4.9 การพัฒนาสู่อิฐมวลเบา	82
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รูปแสดง stress-strsin diagram ของยิปซัมเพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7gp	92
ภาคผนวก ข. รูปแสดง stress-strsin diagram ของยิปซัมเพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8gp	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. รูปแสดง stress-strsin diagram ของยิปซัมเพสต์ ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.9gp	104
ภาคผนวก ง. รูปแสดง stress-strsin diagram ของยิปซัมเพสต์ ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 1.0gp	110
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	116
ประวัติผู้เขียน	131

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา	24
2.2	ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง	24
3.1	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอัตราส่วนผสมต่างๆ	26
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม่ย่างพาราและดินขาวแปร	35
3.3	สมบัติของยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม่ย่างพาราและดินขาวแปรเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 618	38
3.4	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ควมคุม	40
4.1	ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย	45
4.2	ความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์	49
4.3	ความหนาแน่นยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน	50
4.4	ความหนาแน่นยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน	51
4.5	การดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์	53
4.6	การหดตัวของยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วันและบ่มโดยการอบไอน้ำ	56
4.7	ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน	70
4.8	ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน	71
4.9	ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อบไอน้ำแรงดันต่ำ	72
4.10	ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์	77

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า	
2.1	สถานที่เก็บถ้ำไม้ยางพารา (ก) บ่อฝังกลบถ้ำไม้ยางพารา (ข) โถดั่งเก็บถ้ำลอยไม้ยางพารา	6
2.2	ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัมเทียม (ก) สายพานกรอง (ข) ตู้เก็บยิปซัมเทียม	8
2.3	แร่ดินขาว	10
2.4	คอนกรีตบล็อก	11
2.5	การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม (ก) แบบหล่อ (ข) คอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม	12
2.6	วิธีการผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต	13
2.7	ลักษณะของฟองโฟมก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตในถังผสม	14
2.8	กระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง	15
2.9	แผนภาพขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิของการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ	19
2.10	โพรงอากาศจากการเชื่อมของคอนกรีต	21
3.1	วัสดุผสมของยิปซัมเพสต์ (ก) ยิปซัมเทียมผ่านการอบที่ 100 องศาเซลเซียส (ข) ถ้ำลอยไม้ยางพารา	25
3.2	ดินขาวแปร	26
3.3	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการทดสอบ	27
3.4	วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว (ก) ชิ้นงานยิปซัมเพสต์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความยาว (ข) ลักษณะของการฟุ้งนอตในชิ้นทดสอบ และ (ค) การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัด	30
3.5	การทดสอบสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง (ก) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ (ข) เครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน	32
3.6	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่พบในถ้ำชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับที่พบในปูนซีเมนต์	34
3.7	โครงสร้างจุลภาคของถ้ำลอยไม้ยางพารา (ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า	35
3.8	ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินขาวแปร	36
3.9	การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของยิปซัมเทียมก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	37

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแร่ของยิปซัมเทียมหลังจากอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	38
3.11 อุปกรณ์และขั้นตอนการหาปริมาณน้ำของเพสต์ควบคุม (ก) ครอบอบบรรจุยิปซัมเพสต์ และ ครอบอบสวมฝาเปิด (ข) เทยิปซัมเพสต์ลงในแบบ (ค) ปาดยิปซัมเพสต์ที่ปากครอบอบสวม (ง) คึงครอบอบสวมออก (จ) ปาดผิวหน้าให้เรียบ	40
4.1 แนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย	41
4.2 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเพสต์ต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ที่อัตราส่วนผสม RWFA0MKL0, RWFA10MKL0, RWFA20MKL0 และ RWFA30MKL0	42
4.3 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่อัตราส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20	43
4.4 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ในยิปซัมเพสต์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้ง	47
4.5 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20	48
4.6 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ในยิปซัมเพสต์แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนน้ำ	53
4.7 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนน้ำที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20	54

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.8	เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA0MKL0 และ RWFA10MKL0 (ข) RWFA20MKL0 และ RWFA30MKL0	57
4.9	เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10 และ RWFA10MKL20 (ข) RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20	58
4.10	เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL10 และ RWFA30MKL20 (ข) RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20	59
4.11	พฤติกรรมยิปซัมเพสต์เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง	62
4.12	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วน	62
4.13	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL0 (ข) RWFA20MKL0	63
4.14	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL0 (ข) RWFA10MKL10	64
4.15	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL20 (ข) RWFA20MKL10	65
4.16	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10	66
4.17	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL20 (ข) RWFA0MKL10	67
4.18	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม RWFA0MKL20	68

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	69
กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่อายุบ่ม 7 วัน	
4.20	70
กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่อายุบ่ม 28 วัน	
4.21	71
กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่บ่ม โดยการอบไอน้ำแรงดันต่ำ	
4.22	73
ความสัมพันธ์ของกำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วันต่อค่าความหนาแน่นแห้ง	
4.23	74
โมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์ทุกส่วนผสม (ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP (ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.9GP	
4.24	75
โมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์ทุกส่วนผสม (ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8GP (ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP	
4.25	76
การพืดของยิปซัมเพสต์ (ก) พืดแบบเนียน (ข) พืดแบบแยกออก	
4.26	77
สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม RWFA0MKL0-0.7GP, RWFA0MKL0-0.8GP, RWFA0MKL0-0.9GP, RWFA0MKL0-1.0GP, RWFA10MKL0-0.7GP และ RWFA0MKL10-0.7GP	
4.27	79
ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า	
4.28	80
ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า	
4.29	81
ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมผสมดินขาวแปร ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า	
4.30	82
ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมผสมดินขาวแปร ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.7GP กำลังขยาย 5,000 เท่า	
4.31	83
ยิปซัมเพสต์ขนาด 30x20x5 เซนติเมตร	
4.32	83
ยิปซัมเพสต์ที่ถูกเลือกเป็นชิ้นเล็ก	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การก่อสร้างที่อยู่อาศัยจำเป็นต้องมีผนังเพื่อแบ่งพื้นที่และเพิ่มความเป็นสัดส่วนให้กับอาคาร ช่วยป้องกันผู้อาศัยและทรัพย์สินจากโจรสู้ร้ายและสภาพดินฟ้าอากาศต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นลมพายุ หรือความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพิ่มความสวยงามให้กับองค์อาคาร ทำให้ผู้อยู่อาศัยมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ผนังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยสามารถแบ่งเป็นสองชนิดคือ ผนังเบา ซึ่งจะมีคานมารับผนังหรือไม่ก็ได้วัสดุที่ใช้ได้แก่ ไม้อัด แผ่นยิปซัม กระฉก อลูมิเนียม อีกชนิดหนึ่งคือผนังหนัก ซึ่งต้องอาศัยคานมารับผนังวัสดุที่ใช้ได้แก่ ผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก ผนังก่ออิฐฉาบปูน ผนังอิฐบล็อก ผนังคอนกรีตมวลเบาฉาบปูน

ในสภาพสิ่งแวดล้อมปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพดินฟ้าอากาศอย่างรุนแรง ประเทศไทยหน้าฝนเกิดพายุฝนและน้ำท่วม ในฤดูร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นทุกปี ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้การก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยนิยมนำอิฐมวลเบามาใช้ในการก่อสร้าง เพราะนอกจากจะกันเสียงกันความร้อนและมีน้ำหนักเบาแล้วยังสามารถเลื้อยเป็นชั้นตามขนาดที่ต้องการได้ ก่อสร้างง่ายลดน้ำหนักของอาคารและค่าไฟฟ้าในส่วนของค่าปรับอากาศ แต่อิฐมวลเบาที่ใช้อยู่มีราคาสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญหรืออิฐบล็อก แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการหาวัสดุทดแทนที่มีราคาถูกหาง่ายมาผลิตเป็นอิฐมวลเบาทดแทนของเดิมที่มีราคาสูง โดยยังคงคุณลักษณะเด่นของอิฐมวลเบาไว้ไม่ว่าจะเป็นความสามารถต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และการต้านทานความร้อน

ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ายะลาได้ใช้ไม้อย่างพาราเป็นเชื้อเพลิงที่ให้อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส ในระบบปิด ผลที่ตามมาคือมีปริมาณแถ้าไม้อย่างพาราและแถ้าลอยไม้อย่างพาราเกิดขึ้นวันละหลายตัน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการจัดเก็บ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้อาศัยบริเวณใกล้เคียง สำหรับโรงไฟฟ้ากระบี่จะใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue gas desulfurization) หรือที่เรียกว่า FGD เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันปนอยู่ในเชื้อเพลิง โดยใช้น้ำหินปูนบดสเปรย์สวนทิศการเคลื่อนที่ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 145 องศา

เซลเซียส น้ำหินปูนจะแยกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียจนเกิดเป็นผลึกยิปซัมเทียม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และนำไปจัดเก็บเพื่อนำไปทิ้งหรือใช้งานอื่น ๆ ต่อไป

มีการนำเถ้าลอยไม้ยางพาราและยิปซัมเทียมไปใช้ประโยชน์น้อยมาก ซึ่งเป็นการเสียพื้นที่ในการจัดเก็บ โดยสูญเปล่าและนอกจากนี้ทำให้เกิดมลภาวะจากการฟุ้งกระจายของเถ้าไม้ยางพารา แต่จากการพิจารณาเบื้องต้นขององค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมเทียมพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพียงแต่ในยิปซัมเทียมและเถ้าลอยไม้ยางพารามีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมากจำเป็นต้องใช้ดินขาวเข้าทดแทน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าลอยไม้ยางพารามีคุณสมบัติที่สามารถจะพัฒนาเพื่อใช้ในการลดน้ำหนักยิปซัมเพสต์ ซึ่งหากได้ผลที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้งานได้จะเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างและยังเป็นการช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาคุณลักษณะของวัสดุยิปซัมเพสต์โดยใช้ยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพารา และดินขาว
2. ปรับปรุงสมบัติของยิปซัมเพสต์ให้มีสมบัติตามเกณฑ์ มอก. 1505-2541 ขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำและ มอก. 1510-2541 แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีและองค์ประกอบแร่วิทยาของยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร
2. ศึกษาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของยิปซัมเพสต์
3. ศึกษาตัวอย่างยิปซัมเพสต์ทั้งทางกายภาพ เชิงกลและ โครงสร้างจุลภาค ได้แก่ ค่าความหนาแน่นแห้ง ค่าการดูดกลืนน้ำ การหดตัว สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง กำลังอัดและ โครงสร้างทางจุลภาคของยิปซัมเพสต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาอิพซัมเพสต์เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุมวลเบาทดแทนอิฐมวลเบาที่มีราคาสูง
2. ลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้อิพซัมเทียมและถ้ำลอยไม้ยางพารา
3. เป็นส่วนช่วยส่งเสริมและสนับสนุน ให้มีการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างท้องถิ่น

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เชื้อเพลิงทดแทนจากชีวมวล

ประเทศไทยมีทรัพยากรพลังงานอยู่หลากหลายประเภท ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน นอกจากนี้พลังงานดังกล่าวนี้ยังมีพลังงานทดแทนพลังงานหลัก (core energy) ในการผลิตไฟฟ้าได้อีก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือพลังงานชีวมวล เป็นต้น หากกล่าวถึงที่มาของพลังงานไฟฟ้าชีวมวลแล้วคือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ซึ่งในภาคใต้มีปริมาณมากคือ กากปาล์ม และเศษไม้ยางพารา อย่างไรก็ตามการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันมีข้อจำกัดเพราะปริมาณวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับผลผลิตทางการเกษตรในแต่ละช่วงเวลา จึงไม่เหมาะกับการลงทุนในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ การใช้เป็นพลังงานทดแทนในประเทศไทยยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากพลังงานทดแทนดังกล่าวมีลักษณะกระจายอยู่ตามธรรมชาติ และไม่มีควมสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตในแต่ละปี นอกจากนี้เชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดมลพิษหากไม่มีระบบการจัดการมลพิษที่ดี ดังนั้นจึงควรศึกษาหาแนวทางในการนำของเสียจากกากเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อันเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดกับสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

2.2 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ายะลา

โรงไฟฟ้ายะลามีกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 20.2 เมกะวัตต์ จัดเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลที่ใช้เศษไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติและถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงพื้นฐานของโรงไฟฟ้าทั่วไป โดยโรงไฟฟ้ายะลาจะใช้ระบบโครงสร้างห้องเผาไหม้หม้อไอน้ำเป็นแบบ traveling grate stoker โดยมีโครงสร้างของตะแกรงจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา คล้ายดินตะขาบรถถึง ความดันของหม้อไอน้ำสูงมากกว่า 60 บาร์ขึ้นไป ระบบนี้เหมาะสำหรับเชื้อ

เพลิงชนิดเดียวกันและมีสัดส่วนเชื้อเพลิงมากเช่น แกลบ ปาล์ม น้ำมัน และ ไม้ยางพารา โรงไฟฟ้าที่ใช้ระบบนี้มีหลายแห่งเช่น โรงไฟฟ้าร้อยเอ็ดกรีน โรงไฟฟ้าอุทองไบโอแมสและโรงไฟฟ้าบัวสมหมาย อย่างไรก็ตามระบบนี้ไม่เหมาะกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลายชนิดพร้อมกัน เพราะเชื้อเพลิงจะเผาไหม้หมดไม่พร้อมกัน

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเริ่มจากการให้ความร้อนแก่หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ จากนั้นส่งไอน้ำเข้ากังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าการทำงานเริ่มจากนำน้ำดิบมาบำบัดให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด จากนั้นใช้ปั๊มน้ำ (boiler feed pump) ส่งน้ำที่บำบัดแล้วเข้าในหม้อผลิตไอน้ำ (boiler) ซึ่งได้รับความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล น้ำที่เดือดจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ ผ่านไปยังกังหันไอน้ำ (condensing turbine) เพื่อให้เกิดการหมุน ได้กระแสไฟฟ้า ในส่วนของไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำจะมีความดันต่ำมากและยังคงมีสภาพเป็นไอน้ำ ต้องทำให้กลับคืนเป็นน้ำ โดยผ่านเครื่องควบแน่น (condenser) และหอระบายความร้อน (cooling tower) จากนั้นน้ำดังกล่าวจะถูกปั๊มกลับเข้าในหม้อผลิตไอน้ำอีกครั้ง หมุนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมอยู่ระหว่างร้อยละ 15-20 ซึ่งน้ำที่จะนำมาใช้ในการผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ ต้องผ่านการบำบัดก่อนเพื่อป้องกันปัญหาตะกรันและการกัดกร่อนของท่อน้ำตะกรันที่เกิดจากความกระด้าง (hardness) และปริมาณแร่ซิลิกา (silica) ในน้ำ ความกระด้างเกิดจากการมี Ca^{2+} และ Mg^{2+} เมื่อจับตัวกับสารไบคาร์บอเนต CO_3^{2-} ที่ละลายอยู่ในน้ำ ก่อให้เกิดตะกรันในท่อ น้ำ ส่วนซิลิกาสามารถละลายในน้ำร้อนได้ดีกว่าน้ำเย็น ดังนั้นถ้าอุณหภูมิน้ำสูงขึ้นมากปัญหาของตะกรันจะรุนแรงขึ้น ตะกรันจะไปเกาะติดใบพัดของกังหันไอน้ำและคอนเดนเซอร์ อาจมีผลให้โรงไฟฟ้าหยุดทำงานกะทันหัน ปัญหานี้พบมากในน้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดิน เนื่องจากน้ำฝนมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) เมื่อไหลลงสู่ใต้ดิน จะผ่านชั้นดินที่มีการเน่าสลายของสารอินทรีย์ จะทำให้เกิดความเป็นกรดมากขึ้น และเมื่อผ่านชั้นหินปูนซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) เกิดการละลายของหินปูน ทำให้ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ยิ่งมากขึ้น ความกระด้างเพิ่มขึ้น

ผลจากการเผาไหม้ไม้ยางพาราในระบบปิดจะได้ถ้าไม้ยางพารา ถั่วลย ไม้ยางพาราและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าไม้ยางพาราที่ออกมาจากเตาเผาจะถูกนำไปไว้ฝังกลบในบ่อ ดังรูปที่ 2.1(ก) โดยภายในบ่อจะพ่นน้ำอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย ส่วนถั่วลย ไม้ยางพาราที่มีน้ำหนักเบาจะถูกเก็บไว้ในโกดังเก็บถั่วลย ไม้ยางพาราดังรูปที่ 2.1(ข) เพื่อรอการขนย้ายไปกำจัดต่อไป ที่ผ่านมาได้มีการวิจัยเพื่อนำถั่วลย ไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ โดยนำคุณลักษณะเด่นได้แก่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่สูงและอนุภาคถั่วลย ไม้ยางพาราที่มีความพรุนสูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยลดน้ำหนักคอนกรีต อามิเต็งและดุนพล (2551) ได้ผลิต

คอนกรีตมวลเบาจากหินพัมมิช โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและเถ้าแกลบ พบว่า ปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 สถานที่เก็บเถ้าไม้ยางพารา (ก) บ่อฝังกลบเถ้าไม้ยางพารา (ข) โกดังเก็บเถ้าลอยไม้ยางพารา

2.3 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ากระบี่

โรงไฟฟ้ากระบี่เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีก๊าซเสียเกิดขึ้นส่วนหนึ่งคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเกิดจากสารกำมะถันที่เจือปนอยู่ในน้ำมันเตารวมตัวกับก๊าซออกซิเจนระหว่างการเผาไหม้ ทางโรงไฟฟ้ากระบี่ได้ใช้กระบวนการยิปซัมจากหินปูน (limestone gypsum process) ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นระบบการกำจัดก๊าซแบบเปียก (wet type fuel gas) เพราะมีต้นทุนต่ำและใช้พื้นที่น้อย อีกทั้งยังใช้หินปูนที่มีอยู่ในบริเวณใกล้เคียงมาใช้ในกระบวนการ ซึ่งขั้นตอนในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ระบบเตรียมน้ำหินปูน (slurry preparation system) จะใช้หินปูนจากเหมืองแร่ในจังหวัดกระบี่ โดยหินปูนดังกล่าวจะถูกชั่งน้ำหนักและลำเลียงไปเก็บไว้ในอาคารเก็บหินปูน (limestone unloading) หลังจากนั้นนำหินปูนมาบดและผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมเก็บไว้ในถังพัก (slurry tank) น้ำหินปูนจะถูกปั๊มจากถังพักไปยังเครื่องแยกขนาด (hydro cyclone) เพื่อแยกหินปูนขนาดใหญ่กลับไปบดซ้ำอีกครั้ง ส่วนหินปูนที่ผ่านเครื่องแยกขนาดจะนำไปเก็บไว้ที่ถังป้อนน้ำหินปูน (limestone slurry storage tank) เพื่อสูบน้ำหินปูนไปใช้ในระบบอื่นต่อไป ระบบดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีกรไหลวนของน้ำหินปูนเพื่อป้องกันหินปูนตกตะกอนและอุดตันภายในท่อ

2. ระบบจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (absorber system) อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีลักษณะคล้ายหอคอยโดยภายในจะฉาบด้วยสารทนกรดเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ด้านล่างจะเป็นอ่างบรรจุน้ำหिनปูน ส่วนด้านบนจะมีชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ภายในเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีลักษณะเป็นรวงผึ้ง ดังนั้นเมื่อก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงผ่านเข้ามา จะถ่ายเทความร้อนให้น้ำภายในท่อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนก๊าซไอเสียที่ออกมาจะมีอุณหภูมิลดลง น้ำร้อนภายในท่อมจะไหลไปยังอุปกรณ์แรกแลกเปลี่ยนความร้อนอีกชุดหนึ่งที่ติดตั้งบริเวณทางออกของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อถ่ายเทความร้อนให้ก๊าซไอเสียร้อนขึ้น ที่ส่วนกลางของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีหัวฉีดสเปรย์น้ำหिनปูนให้กระจายเป็นละอองฝอยเล็กๆ เพื่อให้น้ำหिनปูนผสมกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น

การทำงานของระบบดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเริ่มต้นจากก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำผ่านพัดลมดูดอากาศ (induce draft fan) ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ไหลผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาในอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อุณหภูมิของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะลดลงเหลือ 117 องศาเซลเซียส ก๊าซไอเสียดังกล่าวจะเข้าผสมกับละอองน้ำหिनปูน น้ำส่วนหนึ่งจะระเหยกกลายเป็นไอน้ำกับก๊าซไอเสีย อุณหภูมิก๊าซไอเสียจะเย็นลงจนถึงจุดอิ่มตัวประมาณ 75 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่พ่นออกจากหัวฉีดได้ถูกออกแบบไว้ให้มีปริมาณสูงกว่าอัตราการระเหยมาก จึงทำให้มีน้ำผสมหिनปูนบางส่วนตกลงมาอย่างต่อเนื่องด้านล่างของอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และน้ำหिनปูนเหล่านี้จะละลายเอาก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากก๊าซไอเสียโดยอัดอากาศเข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นจนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาดังสมการที่ 2.1



จากปฏิกิริยาดังกล่าวก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ปนอยู่น้อยมาก ก๊าซไอเสียจะผ่านตะแกรงขนาดเล็กเพื่อดักละอองน้ำที่ออกและเพิ่มอุณหภูมิก๊าซไอเสียเป็น 89 องศาเซลเซียส ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

3. ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม (gypsum dewatering system) ยิปซัมเหลวจากอุปกรณ์ดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะถูกสูบโดยเครื่องดูดซับ (Absorber blow down pump) ไปยังเครื่องแยกยิปซัม โดยส่วนที่เป็นน้ำจะไหลไปยังถังกรอง (filtrate tank) ส่วนที่เป็นผลึกจะถูกลำเลียงไปกรองที่สายพานกรอง (belt filter) ซึ่งมีลักษณะเป็นสายพานที่มีรูพรุน (รูปที่ 2.2(ก)) ที่

ส่วนใต้ของสายพานจะติดอยู่กับระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) เพื่อดูดน้ำออกจากยิปซัมเทียม น้ำที่แยกออกมาจะนำไปเก็บไว้ในถังล้าง (cloth wash tank) เพื่อนำกลับไปใช้ซ้ำ ส่วนผลึกยิปซัมจะถูกลำเลียงไปตามสายพานเพื่อนำไปเก็บไว้ในถังเก็บยิปซัมดังรูปที่ 2.2(ข) โดยเฉลี่ยแล้วจะมีปริมาณยิปซัมเทียมเกิดขึ้น 12 ตันต่อชั่วโมง



(ก)

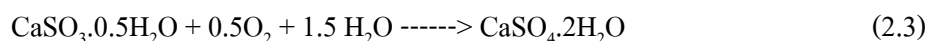
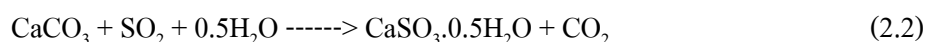


(ข)

รูปที่ 2.2 ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัมเทียม (ก) สายพานกรอง (ข) ถังเก็บยิปซัมเทียม

2.4 ยิปซัมเทียม

ยิปซัมเทียมเป็นยิปซัมที่เกิดจากการสังเคราะห์ของก๊าซไอเสียจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (desulfurization) โดยใช้น้ำหินปูนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจน ดังสมการที่ 2.2-2.3 (Li and Sadakata, 1999)



ยิปซัมเทียมมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็ก มีสีขาวปนเทาซึ่งเกิดจากเขม่าที่เผาไหม้น้ำมันเตาเป็นมลทินเจือปนเกาะอยู่ที่ผิวยิปซัมเทียม ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.24 หากนำยิปซัมเทียมมาเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้โมเลกุลของน้ำแยกตัวออกเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) ยิปซัมเทียมในถังเก็บยิปซัมจะมีความชื้นอยู่ เพราะสายพานกรอง (belt filter) ไม่สามารถแยกน้ำออกจากยิปซัมได้หมด ปัจจุบันยิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่จะมีการนำไปใช้ต่อในการผลิตปูนซีเมนต์ แต่เนื่องจากในสภาวะการณปัจจุบัน

จังหวัดกระบี่ไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ใช้ยิปซัมเป็นวัตถุดิบในการผลิตรองรับ จึงทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดยิปซัมเทียมอีกด้วย

อุตสาหกรรมที่ใช้ยิปซัมส่วนใหญ่มักจะใช้ยิปซัมธรรมชาติเป็นหลัก เพราะมีความบริสุทธิ์สูง ในอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะถูกเติมลงไป ในปูนเม็ดประมาณ 3-5% ของน้ำหนักปูน ก่อนจะนำไปบดและบรรจุถุง ยิปซัมทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงเพื่อชะลอการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ และทำให้ปูนจับตัวกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ๆ ได้ดี เช่น ทราย ทำให้มีกำลังอัดสูง ใช้เป็นตัวเพิ่มออกซิเจน (oxidizing agent) ในอุตสาหกรรมเครื่องแก้ว เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตซอสก์ ยิปซัมบอร์ด ดินสอสี และหัวไม้ขีดไฟ นอกจากนี้ยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปใช้ในการทำรูปแกะสลักและการตกแต่งภายใน (คณพล, 2552)

ภาณุวัฒน์และสำราญ (2547) ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวอ่อนบางกอก จากการก่อสร้างทางโครงการที่ สป.4100 สายบ้านคลองสวนถึงบ้านคลองกระออม จังหวัดสมุทรปราการ โดยใช้แร่ยิปซัมจากอำเภอดงเจริญ จังหวัดพิจิตร ซึ่งใช้ยิปซัมแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าหากแทนที่ยิปซัมร้อยละ 5 ในดินเหนียวค่าแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซจะลดลงเมื่อเทียบกับดินเหนียวที่ไม่แทนที่ยิปซัม นอกจากนี้ค่าแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมในดินเหนียวเป็นร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบการบวมตัวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยิปซัมในดินเหนียวสูงขึ้น

2.5 ดินขาว

ดินขาวเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซรามิก(รูปที่ 2.3) ได้จากกระบวนการแต่งแร่จากสายแร่ดินขาว สูตรทางเคมีของดินขาวคือ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ โดยมีส่วนประกอบของอะลูมินา ออกไซด์ ซิลิกาออกไซด์และน้ำร้อยละ 39.5, 46.5 และ 14.0 จุดเด่นของดินขาวคือ มีอะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก (คณพลและอัครเดช, 2544) จุดเด่นของวัสดุที่มีอะลูมินาสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์สามารถก่อให้เกิดสารปอซโซลานขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีการนำดินขาวมาเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้ดินขาวจะเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐาน (amorphous) ที่เรียกว่า ดินขาวแปร (metakaolin) นี้จะมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีเช่นกัน (คณพลและวิระพงษ์, 2548)

คณพลและอัครเดช (2544) ได้ทำการหลอมออร์ตาร์โดยใช้หางแร่ดินขาวแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยบ่มด้วยน้ำปูนเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน

พบว่าหากแทนที่ด้วยหางแร่ดินขาวที่ร้อยละ 20 ช่วยเพิ่มความคงทนต่อกรดได้ดีขึ้น สามารถเป็นอัตราส่วนสำหรับประยุกต์ทางโครงสร้างและมีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นมอร์ต้าร์มวลเบา



รูปที่ 2.3 แร่ดินขาว

เจริญชัยและปริญญา (2550) ได้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยได้ทำการทดลองใช้ดินขาวเผาที่ระยะเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน หาอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิในการเผาดินขาวที่เหมาะสมอยู่ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้กำลังอัดมอร์ต้าร์ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งส่วนผสมของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวที่ 1.33 นี้ให้กำลังอัดที่ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Arikan et al. (2009) ได้นำดินขาวซึ่งมีราคาถูกมาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศา โดยใช้เวลาเพียงแค่ 1 ชั่วโมง ทำให้ดินขาวกลายเป็นดินขาวแปร สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มกำลังอัดให้แก่คอนกรีต

2.6 การผลิตคอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อกผลิตจาก ปูนซีเมนต์ ทราย หินเกล็ด และน้ำ วิธีการทำเริ่มจากนำปูนซีเมนต์ผสมทราย หินเกล็ดและน้ำผสม เข้าด้วย ทั่งไว้ประมาณ 15-20 นาที หลังจากนั้นนำไปใส่ในแบบเหล็กใช้เครื่องอัดๆให้แน่น แล้วนำออกจากแบบไปบ่ม 7-14 วัน จนมีความแข็งแรงตามที่กำหนด คอนกรีตบล็อกจะถูกผลิตในลักษณะอุตสาหกรรมมากกว่าอิฐมอญ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะกลวง (Hollow Concrete Block) ดังรูปที่ 2.4 เป็นที่นิยมใช้มากเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และ

ไม่มีปัญหาในขั้นตอนการก่อสร้างเนื่องจากช่างมีความเคยชินในการทำงานอยู่แล้ว อีกทั้งยังสามารถทำงานได้เร็วเพราะมีขนาดก้อนใหญ่กว่าอิฐมอญ และจากลักษณะที่มีรูกลวงตรงกลางทำให้ช่องอากาศภายในนั้นเป็นฉนวนในการกันความร้อนที่ดี แต่ข้อเสียคือ จะเปราะและแตกง่าย การตอกตะปูยึดผูกต้องทำที่ปูนก่อหรือเสาเอ็นคานเอ็น ที่สำคัญน้ำจะซึม ได้ดีกว่าอิฐมอญจึงไม่เหมาะกับการใช้งานบริเวณที่สัมผัสความชื้นอยู่ตลอดเวลา และคอนกรีตบล็อกที่วางขายขายกันทั่วไปส่วนใหญ่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานเพราะขาดการควบคุมคุณภาพและไม่ได้รับการบ่มที่ถูกต้องวิธี

สมิตรและปริญญา (2549) ได้ผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาจากเถ้าลอยลิกไนต์ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกรันเหล็ก โดยนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในการเตรียมส่วนผสมใช้เถ้าลอยลิกไนต์ กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกรันเหล็กแทนที่ในอัตราส่วน 10:70:20 และ 5:60:35 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่ช่องว่างในคอนกรีตบล็อกมวลเบา เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมวลเบาจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1192-1757 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้กำลังอัดขั้นต่ำที่ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้คอนกรีตบล็อกมวลเบายังมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำมากอยู่ระหว่าง 0.133-0.190 วัตต์ต่อองศาเซลเซียสซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ มอก.58-2530 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

ชัยชาญและคณะ (2550) ได้ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาที่ทำจากปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อยและทราย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อยและทรายที่ 45:25:25:5 โดยน้ำหนักให้กำลังอัด ความหนาแน่นและการดูดกลืนน้ำที่อายุบ่ม 28 วันเท่ากับ 43.13 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 1,045 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และร้อยละ 5.71 ตามลำดับ จากการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าแกลบและเถ้าชานอ้อยจะเริ่มเกิดขึ้นชัดเจนที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 2.4 คอนกรีตบล็อก

ที่มา : <http://www.kapook.com>

2.7 การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม

การผลิตคอนกรีตมวลเบาจะใช้เม็ดโฟม (expandable polystyrene) หรือใช้เศษโฟมมาบดย่อยด้วยเครื่องบดโฟมให้เป็นเม็ดขนาดเล็ก เพื่อนำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตเบา การผลิตจะเริ่มจากนำปูนซีเมนต์ทราย น้ำ และน้ำยา P1 (bio chemical) ใส่ในเครื่องผสมคอนกรีต หลังจากนั้นจึงเติมเม็ดโฟมลงไป ผสมจนเม็ดโฟมกระจายตัวในเนื้อมอร์ตาร์สม่ำเสมอจึงเทลงในแบบหล่อ (รูปที่ 2.5(ก)) ทิ้งไว้อย่างน้อย 12 ชั่วโมง จึงแกะแบบแล้วนำมาบ่มต่อโดยใช้กระสอบป่านคลุมไว้ และพรมน้ำให้เปียกอยู่ตลอดเวลาทิ้งไว้ 12 วันก็สามารถนำออกมาใช้งานได้ จุดเด่นของคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟมได้แก่มีน้ำหนักเบา กันความร้อนและกันเสียงได้ดี มีอายุการใช้งาน ก่อสร้างเร็วสามารถหล่อเป็นขนาดต่างๆตามที่ต้องการได้ดังรูปที่ 2.5(ข) ข้อเสียของคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟมคือปูนฉาบจะไม่เกาะตรงบริเวณเม็ดโฟม การฉาบนิยมใช้ใช้ลวดกรงไก่เป็นตัวประสานเป็นทั้งเหล็กกรับการขยายตัวจากอุณหภูมิ (temperature steel) และเป็นทั้งเหล็กกรับแรงดึง (tension bonding steel) โดยการซึ่งลวดกรงไก่เข้าที่ผนังก่ออิฐ ค่อยๆสลัดปูนลงไปทีละชั้น พอสลัดได้ที่ ก็ค่อยฉาบผิวให้เรียบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องบดน้ำแข็งมาบดเศษโฟมที่ไม่ใช้แล้ว เพื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และทรายในอัตราส่วน 0.5:1:4 เพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นอิฐมวลเบาผสมเศษโฟมบด จากการทดลองคอนกรีตมวลเบาผสมเศษโฟมบดพบว่ามีความเบากว่าอิฐมอญถึง 2 เท่า ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการดูดกลืนน้ำต่ำ (สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2551)



(ก)



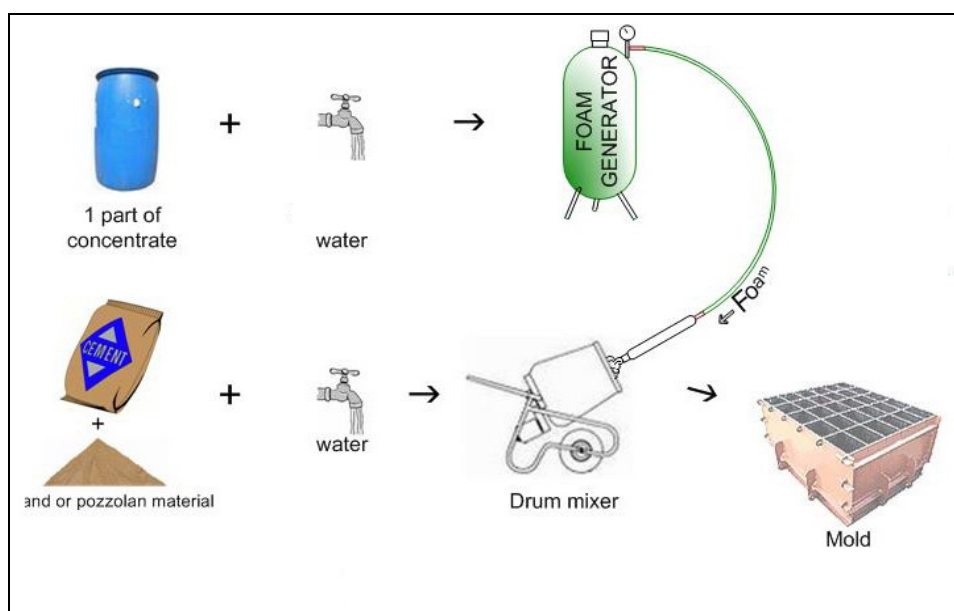
(ข)

รูปที่ 2.5 การผลิตคอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม (ก) แบบหล่อ (ข) คอนกรีตมวลเบาจากเม็ดโฟม

ที่มา : <http://www.centralthai.com>

2.8 การผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต

วิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากโฟมคอนกรีต (รูปที่ 2.6) อาศัยหลักการผสมฟองโฟมชนิดพิเศษ (รูปที่ 2.7) นำมาปั่นให้ขึ้นฟองก่อนแล้วจึงนำมาจัดผสมกับซีเมนต์เพสต์ เทลงในแบบที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 1 วันแล้วจึงแกะแบบ หลังจากนั้นนำไปบ่มต่ออย่างน้อย 7 วันก่อนนำไปใช้งาน ฟองโฟมที่แทรกในเนื้อคอนกรีตจะทำให้มีช่องอากาศกระจายตัวอยู่ในจำนวนมาก ดังนั้นความหนาแน่นจึงน้อยลงด้วย อิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีตสามารถผลิตได้ง่ายสามารถทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้ ขนาดก้อนอิฐขึ้นอยู่กับแบบที่ใช้หล่อ แต่ข้อเสียคือการควบคุมคุณภาพอิฐมวลเบาทำได้ยาก



รูปที่ 2.6 วิธีการผลิตอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต

ที่มา <http://www.tumcivil.com>

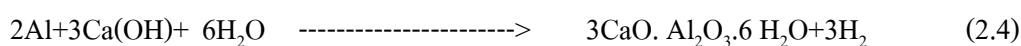
Kunhanandan Nambiar and Ramaurthy (2007) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการกระจายตัวของช่องว่างจากโฟมอินทรีย์โดยใช้น้ำผสมในอัตราส่วน 1:5 เพื่อให้เกิดความพรุนในอิฐมวลเบา ทำการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องของคุณสมบัติของวัสดุกับปริมาณการกระจายตัวของฟองอากาศโดยใช้กล้องจุลทรรศน์หาปริมาณช่องว่างของอิฐมวลเบาพบว่า ปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อให้กำลังอัดลดลง การผสมแล้วลอยลงไปทำให้การกระจายตัวของโฟมคอนกรีตดีขึ้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากโฟมคอนกรีตที่มีขนาดเล็ก ทำให้มีกำลังอัดได้ดีและค่าการดูดกลืนน้ำต่ำ



รูปที่ 2.7 ลักษณะของฟองโฟมก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตในถังผสม
ที่มา <http://www.tumcivil.com>

2.9 การผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำ

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตอิฐมวลเบาอบไอน้ำประกอบด้วย ทรายละเอียด ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัมและผงอะลูมิเนียม การผสมจะเริ่มจากการนำทรายละเอียดกับยิปซัมมาผสมกันก่อน แล้วจึงเติมปูนซีเมนต์ ปูนขาวและผงอะลูมิเนียมตามลงไป กวนส่วนผสมให้เข้ากันก่อนแล้วจึงค่อยๆ เติมน้ำลงไปในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประมาณ 0.3 หลังจากนั้นเทลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งอิฐมวลเบาแข็งตัว แกะแบบออกนำเข้าเครื่องตัดและเครื่องทำโครงตาข่าย หลังจากนั้นนำอิฐมวลเบาเข้าเครื่องอบไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง (autoclaved aerated concrete) โดยใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 2 บาร์ดังรูปที่ 2.8 ทิ้งไว้ให้อิฐมวลเบาเย็นตัวลงอย่างช้าๆ ก็สามารถนำมาใช้งานได้ การเกิดช่องว่างในอิฐมวลเบาเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของปูนขาวและผงอะลูมิเนียมได้ก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ 2.4



ก๊าซไฮโดรเจนจะกระจายตัวและแทรกในเนื้อคอนกรีตในลักษณะทำให้เกิดโพรงปิด(close cell) ช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ในอิฐมวลเบาแต่ละก้อนจะมีมีฟองอากาศมากประมาณร้อยละ 75 ทำให้มีน้ำหนักเบา ส่วนการอบไอน้ำแรงดันสูงเป็นวิธีการเพิ่มกำลังอัดให้กับอิฐมวลเบา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดเวลาในการผลิต อิฐมวลเบาที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูงจะเปลี่ยนสีจากสีเทาเป็นสีขาว มีกำลังอัดสูงมีความแข็งแรงทนทาน ก่อสร้างง่ายใช้เวลาสั้น

สามารถตอกตะปูบนเนื้ออิฐได้ ใช้ความหนาปูนฉาบน้อย จากที่กล่าวมาจึงทำให้อิฐมวลเบาอบไอน้ำได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกว่าอิฐมวลเบาชนิดอื่น โดยเฉพาะที่פקอาศัย แต่ข้อเสียคือมีราคาสูงนอกจากนี้ยังต้องใช้ปูนฉาบและปูนก่อชนิดพิเศษและมักเกิดการร่อนของปูนฉาบ

ที่มา <http://www.vcharkarn.com>.



รูปที่ 2.8 กระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง

ที่มา <http://www.qcon.co.th>.

Benjamin (1960) ได้ทดลองผลิตคอนกรีตฟรูน (foam concrete) โดยใช้สารเคมีเพื่อทำให้เกิดฟองก่อนแล้วจึงผสมกับคอนกรีต ได้คอนกรีตฟรูนที่มีความหนาแน่น 0.79-0.95 ตันต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัด 31.6-52.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีการหดตัวที่ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 0.2-0.6 มีสมบัติเด่นคือเป็นฉนวนกันความร้อน

Zhao et al. (2009) ได้นำหางแร่นี้ที่มีซิลิกอนน้อยมาผลิตเป็นอิฐไม่รับแรงด้วยกระบวนการอัดและอบไอน้ำ ใช้ตะกรันแอลคาไลหรือแก้วลอยเป็นวัสดุประสาน ผลที่ได้ทำให้กำลังอัดและกำลังคัตสูงถึง 16.1 MPa และ 3.8 MPa การหดตัวแบบแห้งต่ำ มีความคงทนต่อการเอียงแฉียงและการละลาย

ประชุม (2550) ได้ใช้น้ำยางพารามาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการรับกำลังและสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำโดยใช้ปูนซีเมนต์ ทรายละเอียด ปูนขาวและยิปซัมในอัตราส่วน 1:1:0.05:0.05 โดยน้ำหนัก ใช้ผงอะลูมิเนียมร้อยละ 0.3 ของส่วนผสมทั้งหมด มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ในการเตรียมน้ำยางพาราจะใช้สารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นร้อยละ 15 ในสัดส่วนร้อยละ 3 ของน้ำหนักยางพารา โดยผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการวิจัยพบว่าค่าความหนาแน่นและกำลังอัดจะแปรผกผันต่อปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น แต่ทำ

ให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอิฐมวลเบาทั่วไปเล็กน้อย ปริมาณน้ำย่างพาราที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัยคือร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ให้ค่ากำลังอัด 115 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นแห้ง 1.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและร้อยละการหดตัว 0.139

Laukaitis and Fiks (2005) ได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบการดูดซับเสียงของคอนกรีตมวลเบาที่อบด้วยไอน้ำแรงดันสูง 3 ชนิด ประกอบด้วย คอนกรีตมวลเบาจากปูนซีเมนต์ คอนกรีตมวลเบาจากปูนซีเมนต์ผสมปูนขาวและคอนกรีตมวลเบาจากโฟมคอนกรีต โดยใช้การวัดการแทรกสอดของคลื่นเสียงเป็นตัววัดปริมาณฟองอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนน้ำในคอนกรีตมวลเบา พบว่าคอนกรีตมวลเบาจากปูนซีเมนต์ผสมปูนขาวให้ผลดีที่สุด

2.10 ปูนปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีมนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลายาวนานมาก หลักฐานเก่าแก่ที่สุดเกี่ยวกับปูนปลาสเตอร์พบที่ดินแดนอนาโตเลีย (ปัจจุบันคือประเทศตุรกี) และซีเรีย เมื่อ 9,000 ปีมาแล้ว เช่นเดียวกับชาวอียิปต์โบราณที่มีการผลิตปูนปลาสเตอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในการก่อสร้างปิระมิด ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 กรุงปารีสได้ชื่อว่าเป็นเมืองหลวงของปูนปลาสเตอร์ เนื่องจากกษัตริย์ฝรั่งเศสได้ออกกฎหมายให้ชาวกรุงปารีสใช้ปูนปลาสเตอร์ฉาบบ้านไม้เพื่อป้องกันไฟไหม้ จนทำให้เกิดโรงงานผลิตปูนปลาสเตอร์ขนาดใหญ่ที่ซานกรุงปารีสเพื่อรองรับความต้องการใช้งานดังกล่าว จนเป็นที่มาของคำว่า plaster of Paris อันเป็นชื่อเรียกปูนปลาสเตอร์ในภาษาอังกฤษที่ใช้กันในปัจจุบัน

ประโยชน์ของปูนปลาสเตอร์ที่สำคัญคือ ใช้ในการหล่อแบบเป็นชิ้นงาน เช่น หน้ากาก ตุ๊กตาและสิ่งของประดับบ้าน ทำฝือกสำหรับคนไข้ที่ประสบอุบัติเหตุกระดูกแขนหรือขาหัก ใช้พิมพ์รอยมือหรือเท้าสำหรับศึกษาและงานสืบสวน รวมถึงทำแบบพิมพ์สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก การใช้ปูนปลาสเตอร์ทำแบบสำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกมีข้อดีหลายประการ เนื่องจากปูนปลาสเตอร์มีความแข็งแรงและผิวหน้าเรียบ สามารถเก็บรายละเอียดต่างๆ ของต้นแบบได้ดี รวมถึงมีรูพรุนมาก จึงสามารถดูดน้ำออกจากเนื้อดินได้ ทำให้เนื้อดินแห้งเร็วกว่าการใช้วัสดุอื่นทำแบบ นอกจากนี้ยังมีราคาถูกอีกด้วย ข้อควรระวังในการทำแบบปูนปลาสเตอร์คือ จะต้องกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนปลาสเตอร์กับน้ำออกให้หมด มิฉะนั้นจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง และการดูดกลืนน้ำของแบบที่ได้

ที่มา : http://www.artmolds.com/ali/history_plaster.html

2.11 ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์

การผลิตปูนปลาสเตอร์จะนำยิปซัมมาเผาที่อุณหภูมิ 130 องศาเพื่อขจัดน้ำออก แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ในโครงผลึกจะมีน้ำ 2 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 1 หน่วย เมื่อนำยิปซัมมาเผา น้ำบางส่วนจะระเหยออกไปกลายเป็นปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมซัลเฟตไฮมีไฮเดรต ในโครงผลึกจะมีน้ำเพียง 1 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 2 หน่วยดังสมการที่ 2.5



ปฏิกริยาดังกล่าวนี้เป็นปฏิกริยาแปรผันได้ ดังนั้นเมื่อเติมน้ำให้กับปูนปลาสเตอร์ จะทำปฏิกริยากับน้ำเกิดเป็นผลึกรูปเข็มของยิปซัมและกลายเป็นก้อนแข็งอีกครั้งดังสมการที่ 2.6



กระบวนการดังกล่าวนี้จะกินเวลาประมาณ 20-30 นาที ซึ่งยาวนานพอที่ปูนปลาสเตอร์เหลวจะไหลตัวในแบบพิมพ์ได้อย่างอิสระ ปูนปลาสเตอร์จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมมากกับการหล่อแบบให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ ปูนปลาสเตอร์ที่เริ่มแข็งตัวใหม่จะค่อนข้างร้อนเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนปลาสเตอร์จะคลายความร้อนออกมาด้วยนั่นเอง แต่ในการใช้งานปูนปลาสเตอร์มีข้อเสียคือ ปูนปลาสเตอร์ไม่สามารถแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปูนปลาสเตอร์เป็นสารที่ละลายน้ำได้

2.12 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตคือการช่วยให้ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่องและป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตโดยการรักษาอุณหภูมิและลดการสูญเสียน้ำ วิธีการบ่มอาจทำได้หลายวิธีโดยการให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว คอนกรีตจำเป็นต้องได้รับการบ่มทันทีหลังจากคอนกรีตเริ่มแข็งตัวแล้ว และควรบ่มต่อไปจนกระทั่งคอนกรีตมีกำลังตามต้องการ การบ่มที่ดีจะต้องสามารถป้องกันคอนกรีตไม่ให้เกิดการสูญเสียน้ำไม่ว่าจะด้วยความร้อนหรือลมไม่ให้คอนกรีตร้อนหรือเย็นเกินไป ไม่สัมผัสสารเคมีที่มีอันตรายต่อคอนกรีต และไม่ถูกชะล้างจากน้ำฝน

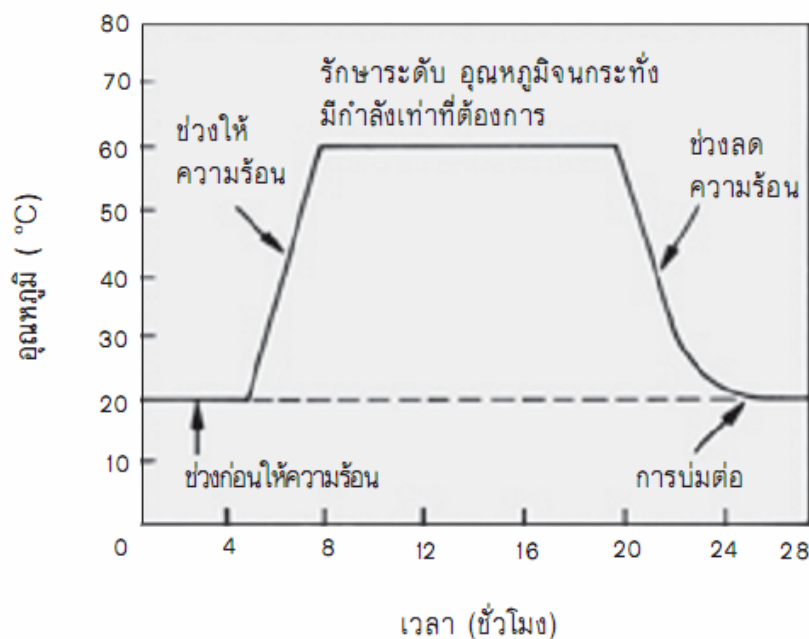
หลังจากเทคอนกรีตเสร็จใหม่ๆ นอกจากนี้อาจหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือน การกระแทก การรับน้ำหนักมากเกินไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้นๆ ของคอนกรีต โดยวิธีการบ่มสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การบ่มคอนกรีตโดยการเพิ่มน้ำ วิธีการนี้จะใช้วิธีเพิ่มน้ำหรือความชื้นแก่คอนกรีตโดยตรง ในระยะที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการปล่อยให้น้ำขังบริเวณผิวหน้าคอนกรีต หรือใช้วัสดุที่เปียกชื้นคลุมผิวไว้ตลอดเวลา วิธีนี้นอกจากเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตจึงเหมาะกับบริเวณที่มีอากาศร้อน

2. การบ่มคอนกรีตโดยการป้องกันการการสูญเสียน้ำ วิธีการนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้ออกสู่ภายนอกโดยใช้วัสดุปิดทับ ทำหน้าที่เป็นแผ่นคลุมผิวคอนกรีตไว้เพื่อลดการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีต โดยส่วนใหญ่จะให้แผ่นพลาสติกคลุมผิวไว้ หรือน้ำยาบ่มคอนกรีตทาผิวคอนกรีต

3. การบ่มด้วยไอน้ำที่แรงดันต่ำ วิธีการนี้จะใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 40-100 องศา ในการเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีต วิธีการนี้สามารถเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีตได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาน้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิปกติ การบ่มด้วยวิธีนี้หากใช้อุณหภูมิต่ำกำลังอัดประลัยจะสูงกว่าการใช้อุณหภูมิสูง สิ่งที่สำคัญสำหรับการบ่มวิธีนี้อีกอย่างคือต้องทำการควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและต่อเนื่อง จนถึงอุณหภูมิที่เราต้องการและรักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่ตามระยะเวลาที่กำหนด ก่อนจะทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โดยมีอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิตั้งที่ประมาณ 20-30 องศาต่อชั่วโมงดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิห้องหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วประมาณ 2-6 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเบื้องต้นเสร็จสิ้นก่อน

4. การบ่มด้วยไอน้ำที่แรงดันสูง วิธีการนี้จะใช้สำหรับการบ่มที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียสจึงจำเป็นต้องเพิ่มความกดดันในภาชนะปิด เพื่อให้อุณหภูมิไอน้ำสูงเกิน 100 องศา ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “autoclave” วิธีนี้โดยส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิอยู่ประมาณ 160-210 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6-20 บรรยากาศ การบ่มด้วยไอน้ำแรงดันสูงที่สภาวะดังกล่าวคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีซึ่งมีสมบัติที่ดีกว่าการบ่มโดยวิธีทั่วไปและการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ โดยพบว่า การบ่มด้วยวิธีนี้ช่วยให้เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้เทียบเท่าการบ่มปกติที่ 28 วันสามารถนำไปใช้งานภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังช่วยให้การหดตัวและการร้าวเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ในทางปฏิบัติการบ่มวิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงมากจึงนิยมใช้บ่มกับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)



รูปที่ 2.9 แผนภาพขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิของการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ
ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

สุรเชษฐ์และคณะ (2548) ได้ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐมวลเบา แล้วนำไปบ่มด้วยกระบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง โดยใช้ไอน้ำที่แรงดัน 1.75 เมกะพาสคัล พบว่าการอบไอน้ำแรงดันสูงทำให้เกิดผลึก tobermolite ซึ่งทำให้อิฐมวลเบามีความแข็งแรงขึ้น สามารถรับกำลังได้ดี และเถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนช่วยเพิ่มกำลังอัด และลดความหนาแน่นให้กับอิฐมวลเบา

หากพิจารณาขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อก อิฐดินประสานและอิฐมวลเบาจากโฟมคอนกรีต หลังจากแกะแบบแล้วผู้ผลิตอิฐส่วนใหญ่ มักจะผึ่งอิฐไว้ในที่ร่มและใช้น้ำส่วนเกินที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในก้อนอิฐเพื่อบ่มก้อนอิฐ ทั้งนี้เพื่อลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการผลิต ถึงแม้จะได้อิฐที่คุณภาพไม่ดีนัก งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการบ่มโดยการนำอิฐมวลเบาบ่มไว้ในอุณหภูมิห้องโดยไม่แช่น้ำ เพราะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้มีค่าสูงจึงทำให้มีน้ำส่วนเกินตกค้างในคอนกรีตมาก ส่วนการบ่มอีกวิธีที่ใช้คือการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังอัดให้คอนกรีตให้สามารถนำไปใช้งานได้ทันที โดยไม่ต้องรอครบกำหนดอายุบ่ม และวิธีการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำมีค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ยุ่งยากเหมือนกระบวนการบ่มด้วยขบวนการอบไอน้ำแรงดันสูง

2.13 การยึดเกาะและการแยกตัวของคอนกรีต

คุณลักษณะของคอนกรีตที่ดีทั่วไปต้องมีการกระจายตัวของมวลรวมสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อน การกระจายตัวที่สม่ำเสมอของมวลรวมนี้ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานยึดเกาะกับมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบได้อย่างทั่วถึง ทำให้คอนกรีตรับกำลังได้ดี หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวระหว่างมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบซึ่งมีสาเหตุหลักๆจากการใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตไม่เหมาะสม ใช้มวลรวมที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมาก และมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงเกินไป อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากกระบวนการในการทำงาน เช่น การลำเลียงคอนกรีตให้ไหลในรางที่ยาวมากๆ และการจี้คอนกรีตมากเกินไป วิธีที่ใช้ในการป้องกันการแยกตัวของคอนกรีตสามารถทำได้ โดยเริ่มจากการคัดเลือกมวลรวมให้มีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันมีการกระจายตัวของขนาดคละดี ออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งาน อาจใช้น้ำยาลดน้ำตามความเหมาะสม และใช้เครื่องจี้คอนกรีตอย่างถูกวิธีไม่จี้คอนกรีตมากหรือน้อยเกินไป

2.14 การเยิ้มของคอนกรีต

การเยิ้มคือสภาวะการคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งมักจะเกิดขึ้นขณะทำการจี้คอนกรีต โดยจะสังเกตเห็นว่ามีน้ำส่วนหนึ่งลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งน้ำส่วนเกินนี้เกิดขึ้นขณะจี้คอนกรีต มวลรวมจะจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่ชิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการดันตัวของน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยสุดลอยขึ้นสู่ด้านบน เกิดเป็นโพรงอากาศดังรูปที่ 2.10 การเยิ้มจะส่งผลเสียต่อคอนกรีตใน 3 ลักษณะคือ

1. ผิวด้านบนของคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงกว่าบริเวณอื่น ทำให้เมื่อคอนกรีตแข็งตัวกำลังอัดบริเวณผิวด้านบนต่ำ เกิดการแตกร้าวและเป็นฝุ่น
2. น้ำที่ลอยตัวขึ้นสู่ผิวด้านบนคอนกรีตบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้ได้มวลรวมหยาบและเหล็กเสริม ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ตรงบริเวณนี้ลดลงมาก เมื่อคอนกรีตแข็งตัวอาจเกิดเป็นโพรงขึ้น
3. การดันตัวของน้ำแทรกผ่านมอร์ตาร์บางครั้งอาจทำให้เกิดโพรงรูเล็ก (capillary pores) กระจายบริเวณผิวหน้าคอนกรีตทำให้คอนกรีตบริเวณนี้มีกำลังได้ไม่ดีนัก โดยเฉพาะหากคอนกรีตมีน้ำอยู่ในโพรงแล้วน้ำภายในโพรงเกิดการแข็งตัวขึ้น จะดันคอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ปัญหานี้มักพบในคอนกรีตที่ใช้ทำผนังห้องเย็น



รูปที่ 2.10 โพรงอากาศจากการเยิ้มของคอนกรีต

ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

2.15 การจี้คอนกรีต

การจี้คอนกรีต คือกระบวนการไล่ฟองอากาศออกจากคอนกรีตสด ทำให้มวลรวมเรียงตัวชิดยิ่งขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะมีช่องว่างน้อยลง หากทำการจี้คอนกรีตอย่างถูกวิธีจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ไม่แยกตัวและเป็นโพรง เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต และระหว่างคอนกรีตกับมวลรวม ช่วยลดการแตกร้าวเพิ่มความแข็งแรงให้คอนกรีต การจี้คอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีตามลักษณะเครื่องมือดังนี้

1. การใช้แรงคนกระทุ้งคอนกรีต วิธีการนี้เหมาะสำหรับการหล่อคอนกรีตปริมาณน้อย โดยหลังจากเทคอนกรีตลงในแบบเสร็จแล้วจะใช้ไม้หรือเหล็กกระทุ้งจนคอนกรีตในแบบหล่อแน่น ในการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐานที่ใช้เหล็กกระทุ้งในแบบหล่อ โดยกระทุ้ง 3 ชั้นๆ ละ 35 ครั้ง

2. การใช้เครื่องจี้คอนกรีต จะใช้เครื่องจี้คอนกรีตซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์และหัวจี้ วิธีนี้จะใช้หัวจี้จุ่มลงในคอนกรีตสด โดยหัวจี้จะปล่อยคลื่นความถี่ประมาณ 70-200 เฮิรตซ์ การใช้เครื่องจี้คอนกรีต จะต้องจุ่มหัวจี้ลงไปในแนวค้ำในเนื้อคอนกรีต และดึงขึ้นช้าๆ ทุกๆ ระยะ 0.5-1 เมตร เพื่อให้ไล่ฟองอากาศให้มากที่สุดและควรหลีกเลี่ยงการดึงหัวจี้ขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้คอนกรีตเป็นโพรง

3. การใช้เครื่องเขย่าคอนกรีต วิธีการนี้จะใช้แบบหล่อติดไว้กับเครื่องเขย่า ซึ่งวางบนพื้นที่ยึดหยุ่น คอนกรีตและแบบหล่อจะถูกเขย่าไปพร้อมๆ กัน โดยใช้ความถี่ประมาณ 50-150

เสิร์ช วิธีนี้มักใช้กับคอนกรีตอัดแรงหรือคอนกรีตที่มีขนาดบาง ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและปริมาณฟองอากาศน้อยกว่าการใช้เครื่องจี้คอนกรีต

จากที่กล่าวมาเป็นการจี้คอนกรีตทันทีหลังจากคอนกรีตถูกเทลงในแบบหล่อ ภายหลังจากการจี้คอนกรีตในครั้งแรกแล้ว ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง ควรทำการจี้คอนกรีตซ้ำ เพื่อทำการขจัดน้ำที่เยิ้มออกมาจากคอนกรีต การจี้คอนกรีตซ้ำช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ถึงร้อยละ 15 แต่ถ้าหากทิ้งคอนกรีตไว้นานเกินไปแล้วทำการจี้ซ้ำอาจทำให้คอนกรีตเสียหายได้

ที่มา: ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน (เครื่องซีเมนต์ไทย, 2548)

หากพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ซึ่งต้องการผลิตยิปซัมเพสต์เพื่อนำมาใช้เป็นอิฐสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ในการทดลองนี้จึงนำเครื่องจี้คอนกรีตมาใช้ในการกระบวนกรหล่อยิปซัมเพสต์ เพราะชิ้นงานมีขนาดเล็กและวิธีการนี้ช่วยให้ได้ยิปซัมเพสต์ที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อน อีกทั้งยังช่วยลดการเยิ้มของยิปซัมเพสต์

2.16 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่างๆของคอนกรีตเช่น กำลังอัดคอนกรีต ความสามารถเทได้ การเยิ้ม และปริมาณฟองอากาศในคอนกรีต หากพิจารณาเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ที่ประมาณ 0.28 แต่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์นี้ไม่สามารถใช้ในงานก่อสร้างต่างๆไปได้ เนื่องจากคอนกรีตสดจะแห้งมากจนไม่สามารถเทเข้าแบบได้ ซึ่งโดยปกติในงานโครงสร้างต่างๆ ไปมักจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ที่ประมาณ 0.35 ขึ้นไป ทำให้คอนกรีตอยู่ในลักษณะเหลวและสามารถเทเข้าแบบได้ นอกจากนั้นน้ำยังช่วยเคลือบผิวมวลรวมให้เปียกทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะได้โดยรอบ แต่ถ้าหากใช้น้ำมากเกินไปจะเกิดน้ำส่วนเกินซึ่งน้ำส่วนเกินนี้จะส่งผลให้มีการแยกตัวของมวลรวม เกิดการเยิ้มของคอนกรีต มีโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้เกิดการหดตัว กำลังอัดและคุณภาพของคอนกรีตลดลง

Neville (1999) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตพบว่า เมื่อคอนกรีตได้รับการบดอัดให้มีช่องว่างของอากาศน้อยกว่า ร้อยละ 1 ของปริมาตรทั้งหมด กำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นั่นคือถ้าใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูง อย่างไรก็ตามหากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำเกินไปก็ทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์

2.17 ความพรุนในเนื้อคอนกรีต

หากพิจารณาความถ่วงจำเพาะของส่วนประกอบหลักในอิฐมวลเบาแล้วพบว่า คอนกรีตและทรายมีความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ประมาณ 3.15 และ 2.60 แต่เมื่อผลิตเป็นอิฐมวลเบาแล้ว ทำให้อิฐมวลเบามีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ภายในเนื้ออิฐมีความพรุนสูงนั่นเอง ความพรุนนี้อาจมาจากก๊าซไฮโดรเจนจากผงอะลูมิเนียมหรือ ฟองอากาศจากสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งแต่ละวิธีทำให้เกิดลักษณะของความพรุนที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อคุณลักษณะอิฐมวลเบาในด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นกำลังอัด การดูดกลืนน้ำ การหดตัวและการต้านทานความร้อน โดยทั่วไปความพรุนของอิฐมวลเบาที่ดีต้องมีลักษณะเป็นโพรงปิด (close cell) ขนาดเล็กไม่เชื่อมต่อกัน มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและเป็นทรงกลม ความพรุนในลักษณะนี้จะทำให้คอนกรีตมีกำลังได้ดี มีน้ำหนักเบาการดูดกลืนน้ำต่ำ กันเสียง กันความร้อนได้ดี

โดยทั่วไปความพรุนของคอนกรีตเกิดจาก 2 สาเหตุคือฟองอากาศที่อยู่ในคอนกรีตสดและฟองอากาศจากช่องว่างในมวลรวม อีกสาเหตุเกิดจากการที่มีน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันภายหลังจากคอนกรีตแข็งตัวและน้ำส่วนเกินได้ระเหยออกไปทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ซึ่งปริมาณความพรุนนี้จะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความพรุนของมวลรวมและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ถ้ำลอยไม้ยางพาราเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดในยิปซัมเพสต์ เพราะในอนุภาคถ้ำลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชนิดอื่น และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงเพื่อให้เกิดช่องว่างจากการระเหยของน้ำส่วนเกินหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.18 มาตรฐาน มอก.1505-2541 และมาตรฐาน มอก.1510-2541

สำหรับมาตรฐาน มอก.1505-2541 ขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำและ มอก.1510-2541 แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์และคุณภาพคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ค่าความหนาแน่นแห้งและค่ากำลังอัดคอนกรีตเป็นเกณฑ์ โดยแบ่งเป็น 4 ชั้นคุณภาพ มาตรฐานทั้งสองจะแตกต่างกันที่ มอก.1510-2541 มีข้อกำหนดเรื่องสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งเพิ่มขึ้นมาซึ่งทั้งหมดประกอบด้วย

1. ความหนาแน่นแห้งและความต้านทานแรงอัดต้องมีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 2.1
2. อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวไม่เกินร้อยละ 0.05

3. การดูดกลืนน้ำไม่เกิน 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
4. ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งต้องมีค่าไม่เกินตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)		ชนิด	ความหนาแน่นแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เดซิเมตร)
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	2.5	2.0	0.4	0.31 ถึง 0.40
			0.5	0.41 ถึง 0.50
4	5.0	4.0	0.6	0.51 ถึง 0.60
			0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
6	7.5	6.0	0.7	0.61 ถึง 0.70
			0.8	0.71 ถึง 0.80
8	10.0	8.0	0.8	0.71 ถึง 0.80
			0.9	0.81 ถึง 0.90
			1.0	0.91 ถึง 1.00

ตารางที่ 2.2 ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง

ชนิด	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
สภาพนำความร้อนสูงสุด (วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน)	0.097	0.124	0.151	0.178	0.205	0.232	0.259

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1510-2541)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ยิปซัมเทียม ใช้ยิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่ นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1(ก) โดยสังเกตการเปลี่ยนรูปผลึกของยิปซัมเทียมซึ่งเป็นผลึกมันวาว หากอบแล้วจะเป็นผงละเอียดสีเทาไม่มีความวาวนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

2. เถ้าลอยไม้ยางพารา ได้จากกระบวนการเผาไหม้ไม้ยางพาราเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้ายะลา มีสีน้ำตาล นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ดังรูปที่ 3.1(ข)

3. ดินขาวแปร ใช้ดินขาวจากบริษัทมินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด จังหวัดระนอง นำมาเผาให้แตกตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สีเปลี่ยนจากขาวเป็นสีชมพูอ่อน นำมาคัดขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ดังรูปที่ 3.2

4. น้ำ ใช้น้ำประปาสะอาด

การออกแบบส่วนผสมยิปซัมเพสต์จะแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10, 20 และ 30 กับดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 ในยิปซัมเทียมโดยใช้สัญลักษณ์ดังตาราง 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 วัสดุผสมของยิปซัมเพสต์ (ก) ยิปซัมเทียมผ่านการอบที่ 100 องศาเซลเซียส (ข) เถ้าลอยไม้ยางพารา



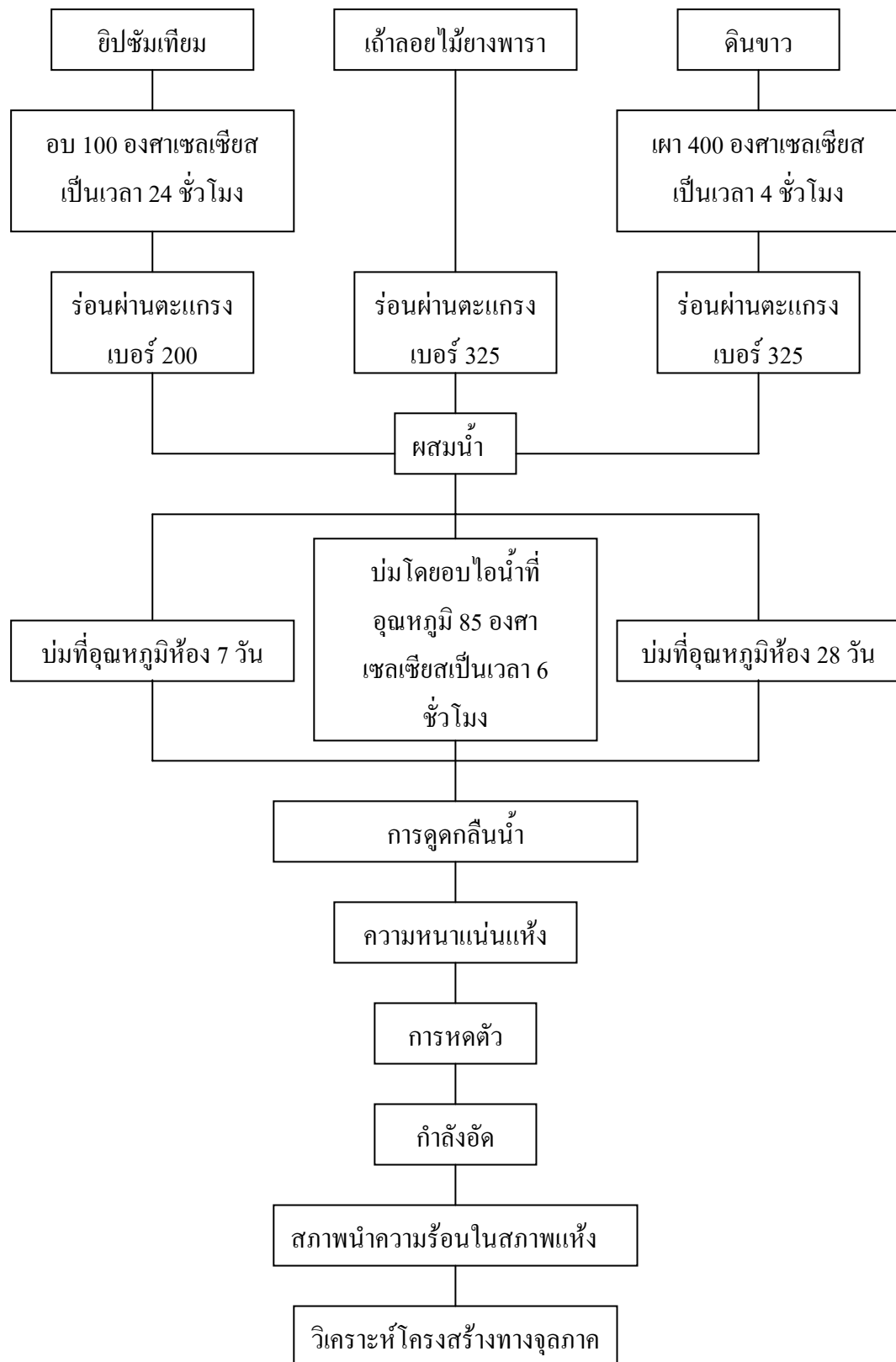
รูปที่ 3.2 ดินขาวแปร

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอัตราส่วนผสมต่างๆ

ยิปซัมเทียม(%)	เถ้าลอยไม้ยางพารา(%)	ดินขาวแปร(%)	สัญลักษณ์
100	0	0	RWFA0MKL0
90	10	0	RWFA10MKL0
80	20	0	RWFA20MKL0
70	30	0	RWFA30MKL0
80	10	10	RWFA10MKL10
70	10	20	RWFA10MKL20
70	20	10	RWFA20MKL10
60	20	20	RWFA20MKL20
60	30	10	RWFA30MKL10
50	30	20	RWFA30MKL20
90	0	10	RWFA0MKL10
80	0	20	RWFA0MKL20

3.2 วิธีการทดสอบยิปซัมเพสต์

ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติทางกายภาพยิปซัมเพสต์ ได้แก่ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดยิปซัมเพสต์ การดูดกลืนน้ำ การหดตัว ความหนาแน่นแห้ง สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการทดสอบ

3.2.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว โดยทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายตามมาตรฐาน ASTM C 191-92(1998) ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นคือระยะเวลาที่ยิปซัมเพสต์สามารถผสม เทหรืออัดแน่นได้ นั่นคือระยะเวลาที่เริ่มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จมในเนื้อยิปซัมเพสต์เป็นระยะ 15 มิลลิเมตรในเวลา 30 วินาที ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย คือระยะเวลาที่ยิปซัมเพสต์เริ่มแข็งตัวและกำลังพัฒนา กำลังอัด โดยใช้เข็มสำหรับหาระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายกดลงด้วยน้ำหนักของตัวเองแล้วเมื่อปล่อยเข็มให้สัมผัสผิวของยิปซัมเพสต์จะเกิดรอยสัมผัสเฉพาะที่กึ่งกลางของเข็ม แต่ขอบวงแหวนจะมองเห็นได้จางๆ

3.2.2 กำลังอัดยิปซัมเพสต์

การทดสอบกำลังอัดของยิปซัมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 โดยหล่อก้อนลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนด้านละไม่เกิน ± 1 มิลลิเมตร ทำการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน และบ่มโดยใช้ไอน้ำแรงดันต่ำ ค่าที่ได้จากการทดสอบเฉลี่ยจากจำนวน 3 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างทั้งหมดรวม 432 ก้อน อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบต้องประกอบด้วยคุณลักษณะดังนี้ เครื่องมือที่ใช้วัดความยาวต้องวัดได้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร เครื่องกดต้องอ่านได้ละเอียดถึง 100 นิวตัน และสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มแรงอัดระหว่าง 0.05-0.20 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้ใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Hounsfield รุ่น H100KS

3.2.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์

ในการทดลองจะใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Hounsfield รุ่น H100KS เครื่องอัดแรงสามารถอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 นิวตัน และควบคุมอัตราการเพิ่มแรงอัดระหว่าง 0.05 ถึง 0.02 นิวตันต่อวินาที โดยควบคุมระยะยวบตัวที่ความเร็ว 0.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการเชื่อมโยงสัญญาณกับคอมพิวเตอร์ที่บันทึกเก็บข้อมูลค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนระยะยวบตัวต่อความยาวของตัวอย่างยิปซัมเพสต์ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ตำแหน่งร้อยละ 45 ของกำลังอัดสูงสุดดังแสดงผลไว้ในภาคผนวก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้นี้เป็นค่าโดยประมาณ เพราะระยะที่ได้นั้นเป็นระยะยวบตัวของแท่งคดไม่ใช่ระยะยวบตัวของก้อน

ยิปซัมเพสต์ และพื้นที่หน้าตัดยิปซัมเพสต์ที่ใช้หาค่ากำลังอัดก็เป็นหน้าตัดของยิปซัมเพสต์ก่อนทำการทดสอบ ซึ่งความเป็นจริงแล้วขณะยิปซัมเพสต์รับแรงอัด พื้นที่ของหน้าตัดยิปซัมเพสต์ก็จะมี การขยายตัวออก

3.2.4 การดูตกน้ำ

การทดสอบการดูตกน้ำของยิปซัมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 การเตรียมชิ้นทดสอบจะหล่อก้อนลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 มิลลิเมตร เครื่องมือที่ใช้วัดต้องมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 1 มิลลิเมตรและเครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม วิธีทดสอบเริ่มจาก อบชื้นทดสอบจนแห้งสนิทให้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิปกติไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดขนาดมิติทั้งสามด้าน นำชิ้นทดสอบมาแช่ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นจากน้ำใช้ผ้าชุบน้ำเช็ดผิวแล้วชั่งน้ำหนัก โดยต้องทำการชั่งน้ำหนักให้เสร็จภายใน 3 นาที ค่าการดูตกน้ำคือค่าน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดกลืนต่อปริมาตรชิ้นทดสอบ

3.2.5 การหดตัว

การทดสอบการหดตัวของยิปซัมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 วิธีเตรียมชิ้นทดสอบจะทำการหล่อชิ้นทดสอบขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรและสูง 160 มิลลิเมตร โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4(ก) ก่อนหล่อชิ้นทดสอบได้ทำการฟุ้งนอตตัวผู้เบอร์ 10 ที่บริเวณส่วนหัวและส่วนท้ายของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.4(ข) โดยให้หัวนอตฝังในเนื้อยิปซัมเพสต์อย่างน้อย 1.5 เซนติเมตร เครื่องมือที่ใช้ทดสอบต้องมีลักษณะดังนี้ เครื่องวัดความยาวต้องสามารถวัดละเอียดได้ถึง 0.005 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.4(ค)) เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม อ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 43 ± 2 วิธีทดสอบจะนำชิ้นทดสอบอบจนแห้งสนิทจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็น ชั่งมวลและวัดความยาวของชิ้นทดสอบโดยถือเป็นมวลในสภาวะแห้ง กำหนดหาค่าปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 40 นำชิ้นทดสอบไปแช่ในอ่างน้ำโดยผิวทดสอบต้องอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำไม่น้อยกว่า 3 เซนติเมตร เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเก็บในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ชั่งมวลและวัดความยาวทุกวันจนมวลชิ้นทดสอบมีปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 40 โดยให้ค่า

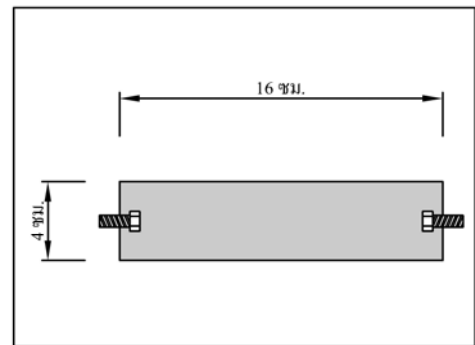
นี่เป็นค่าเริ่มต้นในการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว วัดความยาวชิ้นทดสอบทุกๆ 3 วันจนความยาวเข้าสู่สภาพสมดุล โดยชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่าร้อยละ 0.003 ต่อ 3 วัน โดยค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวได้จากสมการ 3.1

$$R = (I_1 - I_2) / I_1 \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ R คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาว

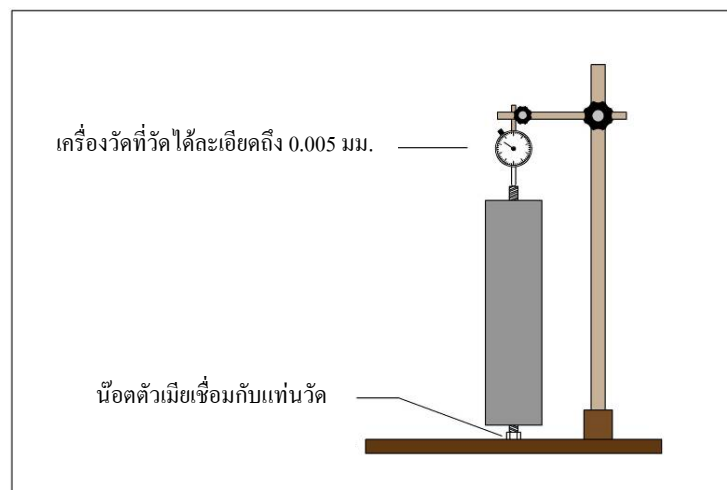
I_1 คือ ความยาวชิ้นทดสอบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 40

I_2 คือ ความยาวชิ้นทดสอบเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว (ก) ชิ้นงานยิปซัมเพสต์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความยาว (ข) ลักษณะของการฝังนอตในชิ้นทดสอบ และ (ค) การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัด

3.2.6 ความหนาแน่นแห้ง

การทดสอบความหนาแน่นแห้งของยิปซัมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 การเตรียมชิ้นทดสอบจะหล่อก้อนลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร โดยกำหนดความคลาดเคลื่อนแต่ละด้านไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เครื่องมือที่ใช้วัดความยาวต้องมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร และเครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 1 กรัม วิธีการทดสอบเริ่มจาก อบชิ้นทดสอบจนแห้งสนิทจนได้น้ำหนักคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส วัดขนาดมิติทั้งสามด้านและชั่งน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นแห้งได้จากค่าน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังอบต่อปริมาตรชิ้นทดสอบ

3.2.7 สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง

การทดสอบสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1510-2541 วิธีเตรียมชิ้นทดสอบจะทำการหล่อชิ้นทดสอบขนาดกว้าง 305 มิลลิเมตร ยาว 305 มิลลิเมตรและลึก 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5(ก) จำนวน 2 ชิ้น โดยในแต่ละชิ้น มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 โดยมีมิติความยาวและความกว้างคลาดเคลื่อนได้ 3 มิลลิเมตรและความหนาให้คลาดเคลื่อนได้ 1 มิลลิเมตร เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยเครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน (guarded-hot-plate apparatus) ตามที่มาตรฐาน AAC 11.2 ได้กำหนดดังแสดงในดังรูปที่ 3.5(ข) วิธีทดสอบวัดขนาดและชั่งมวลชิ้นทดสอบ กำหนดค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร จัดวางชิ้นทดสอบในเครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง ให้นำสัมผัสของชิ้นทดสอบแนบกับแผ่นให้ความร้อนและแผ่นรับความร้อน โดยมีแผ่นโฟมยางซิลิโคนหนา 3 มิลลิเมตร อยู่ระหว่างหน้าสัมผัส ปรับเครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนโดยให้แผ่นความร้อนส่วนกลางและแผ่นให้ความร้อนส่วนคูมมีอุณหภูมิต่างกันไม่เกิน ± 0.5 เคลวิน เพื่อให้แน่ใจว่าการถ่ายเทความร้อนในชิ้นทดสอบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าสัมผัสจนสภาวะทดสอบอยู่ในสภาพสมดุล อ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบ ทั้งด้านที่ติดกับแผ่นให้ความร้อนและแผ่นรับความร้อน เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 12 ถึง 24 ชั่วโมง โคนการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้งควรห่างกันไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง เมื่อพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ด้านนั้นๆที่อ่าน 3 ครั้งสุดท้ายแตกต่างกันอยู่ในช่วง ± 0.5 เคลวิน โดยค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งหาได้จากสมการ 3.2

$$R = (Q_w / 2A) \times (D / dT) \quad (3.2)$$

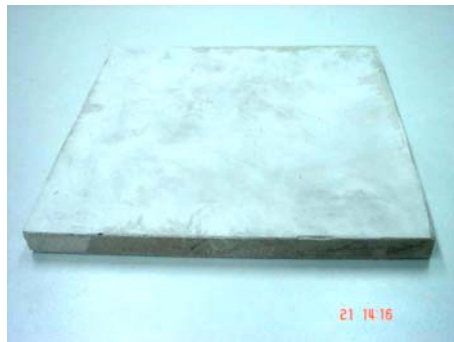
เมื่อ R คือ ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง (วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน)

เมื่อ Q_w คือ กำลังเฉลี่ยของเครื่องทดสอบสภาพนำความร้อน (วัตต์)

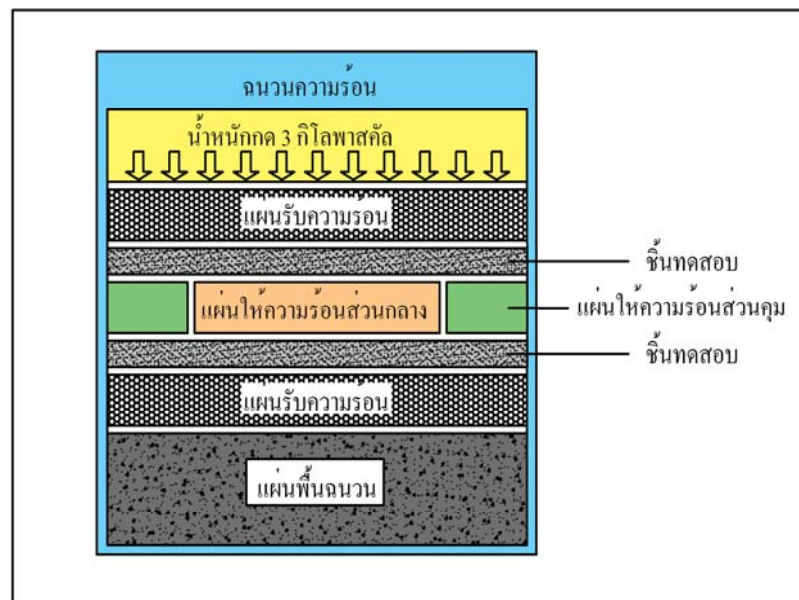
D คือ ความหนาชั้นทดสอบ (เมตร)

dT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผิวสัมผัสด้านที่ให้ความร้อนกับด้านที่รับความร้อน(เคลวิน)

A คือ พื้นที่ของแผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง (ตารางเมตร)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 การทดสอบสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง (ก) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ (ข) เครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน

3.2.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบแร่ของวัสดุ

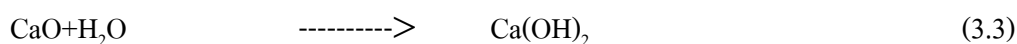
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่มีกำลังอัดสูงสุดที่ และยิปซัมเพสต์ที่มีกำลังอัดสูงสุดที่ใช้ดินขาวแปรและเถ้าลอยไม้ยางพาราแทน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JEOL JSM-5800LV ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

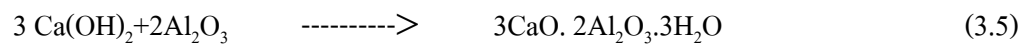
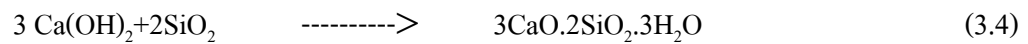
3.3 องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางกายภาพของวัสดุมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะได้เข้าใจถึงคุณลักษณะเด่นและข้อจำกัดบางประการของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งวัสดุชนิดเดียวกันอาจจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันตามที่มาและวิธีการเตรียม

3.3.1 เถ้าลอยไม้ยางพารา

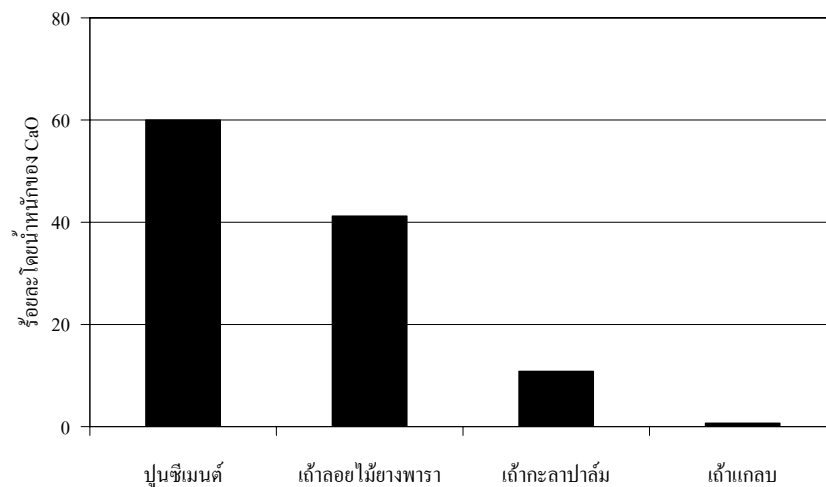
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพาราโดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer ตารางที่ 3.2 พบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยไม้ยางพารามีสูงถึงร้อยละ 41 เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยชนิดอื่น แต่น้อยกว่าปูนซีเมนต์อยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 3.6 ผลรวมของปริมาณ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์และไอรอนออกไซด์เท่ากับร้อยละ 3.66 และปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 5.5 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C 618 แล้วเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน เนื่องจากผลรวมของปริมาณ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์และไอรอนออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 50 และปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เกินร้อยละ 5 ถึงแม้ว่าเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน แต่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่สูงก็เป็นปัจจัยหลักในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เพราะซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออน และไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารเชื่อมประสานขึ้นดังสมการ 3.3-3.5



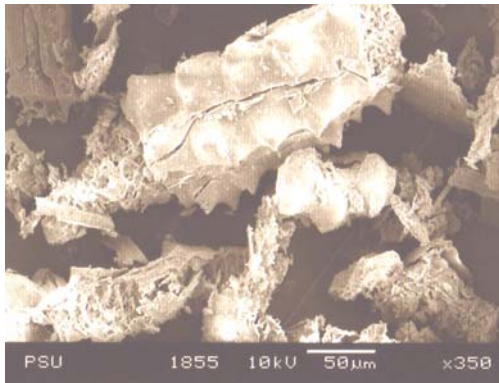


จากสมการทางเคมีข้างต้นหากต้องการให้ได้สารประสานที่ดี จำเป็นต้องมี CaO เพื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

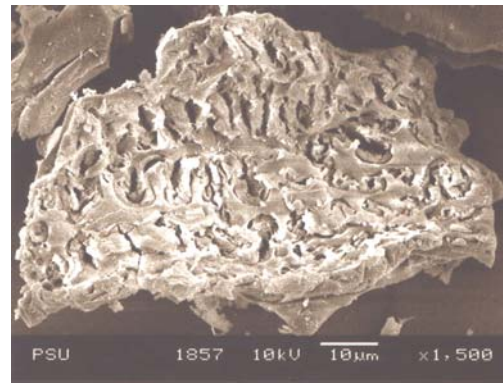
จากผลการตรวจแก้าลอยไม้ยางพารา (อาบีเค็ง, 2551) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าความพรุนเท่ากับ 9.23 และ 17.72 ตารางเมตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่าแก้าลอยไม้ยางพารามีค่าความพรุนสูงมาก เมื่อทำการการวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของอนุภาค โดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าที่กำลังขยาย 350 และ 1,500 เท่า (รูปที่ 3.7(ก) และรูปที่ 3.7(ข)) อนุภาคแก้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมมีความพรุนภายในอนุภาคสูง ทำให้ยิปซัมเพสต์มีน้ำหนักเบา เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 10,000 เท่า บนพื้นที่ผิวแก้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะคล้ายเม็ดทรายเรียงตัวกันอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง



รูปที่ 3.6 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่พบในเ้าชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับที่พบในปูนซีเมนต์
ที่มา : อภิรักษ์ (2551)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 โครงสร้างจุลภาคของถ่านลอยไม้ยางพารา (ก) กำลังขยาย 350 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า

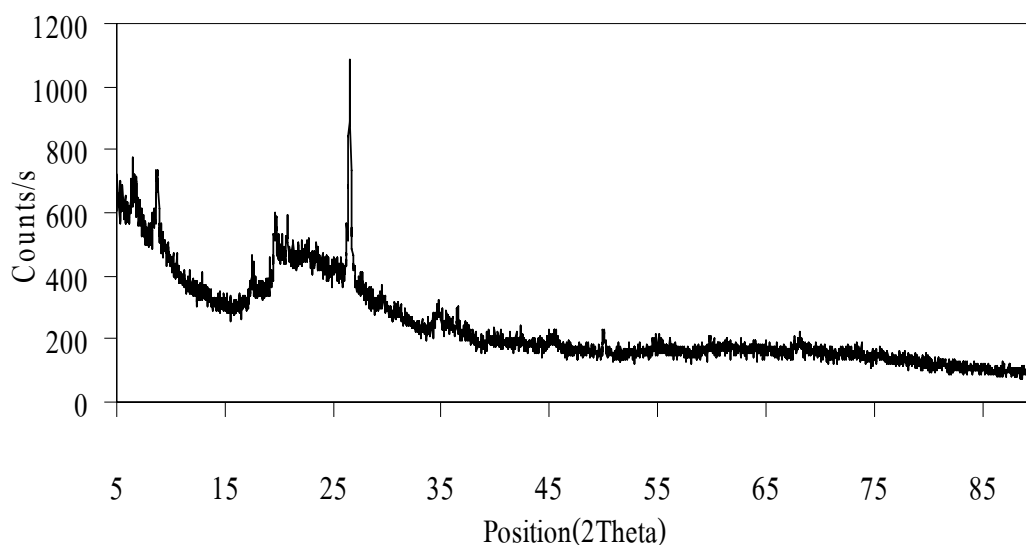
ที่มา : อามิเค็ง (2551)

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของขี้ปซัมเทียม ถ่านลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร

องค์ประกอบทางเคมี	ขี้ปซัมเทียม (%)	ถ่านลอยไม้ยางพารา (%)	ดินขาวแปร (%)
CaO	70.43	41.19	
SiO ₂	14.41	2.57	49.62
Al ₂ O ₃	2.66	0.53	36.24
Fe ₂ O ₃	3.63	0.56	1.70
MgO	1.38	4.52	-
K ₂ O	0.97	16.11	2.30
TiO ₂	0.22	-	-
P ₂ O ₅	-	3.06	-
SO ₃	3.78	5.54	-
Cl	-	0.82	-
MnO ₂	-	1.36	-
ZnO	-	0.12	2.24
Rb	-	0.18	0.11
SrO	0.08	0.16	-

3.3.2 ดินขาวแปร

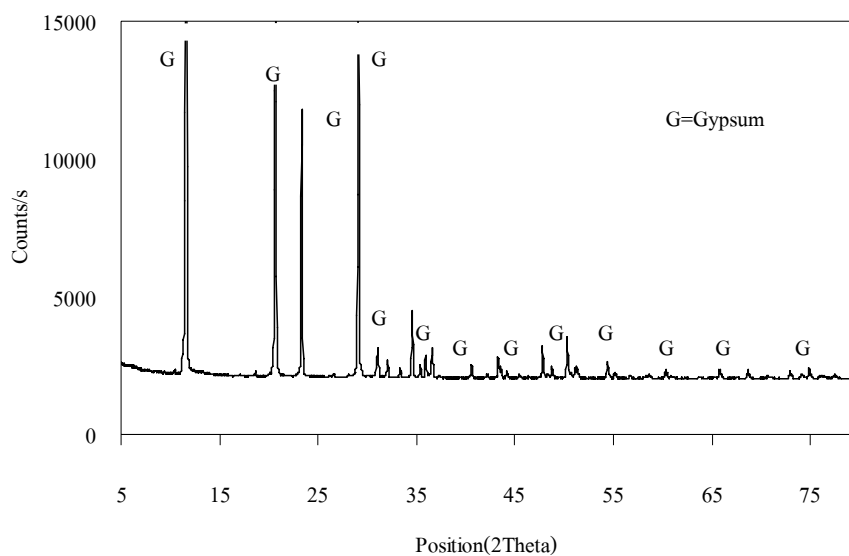
นำดินขาวมาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD) ดังรูปที่ 3.8 พบว่าดินขาวแปรได้เปลี่ยนลักษณะกายภาพเป็นอสัณฐานเป็นส่วนใหญ่ ไม่ปรากฏมีมุมระนาบชนิดแร่ปรากฏขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการเผาเตรียมดินขาวแปรมีวัฏภาค (phase) ที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี นอกจากนี้ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวแปรและยิปซัมเทียบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ดังตารางที่ 3.2 พบว่าดินขาวแปรมีผลรวมของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์และไอรอนออกไซด์ร้อยละ 87.6 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C 618 แล้วดินขาวแปรมีสมบัติเทียบได้กับสารปอซโซลานชนิด N เนื่องจากผลรวมของปริมาณ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์และไอรอนออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 ไม่มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และโซเดียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ จากคุณลักษณะดังกล่าว ดินขาวแปรมีแนวโน้มที่สามารถนำไปพัฒนาสมบัติคอนกรีตพูนได้ ซึ่ง Arikian et al. (2009) ได้เผาดินขาวที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่าหากเพิ่มเวลาในการเผาจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง พบว่าดินขาวแปรได้เปลี่ยนลักษณะกายภาพเป็นอสัณฐานหมดแล้ว ไม่ปรากฏมีมุมระนาบชนิดแร่ดินขาวเกิดขึ้น



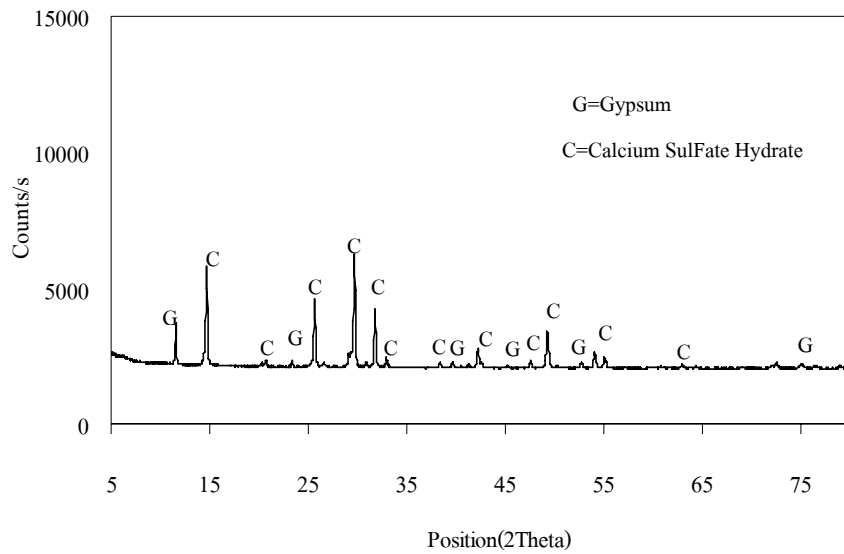
รูปที่ 3.8 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินขาวแปร

3.3.3 ยิปซัมเทียม

ยิปซัมเทียมจากโรงไฟฟ้ากระบี่เป็นสารสังเคราะห์ที่เหลือจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C 618 แล้วไม่จัดเป็นสารปอซโซลาน เพราะผลองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมเทียมโดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer ดังตารางที่ 3.3 พบว่าผลรวมของปริมาณ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์และไอรอนออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก นำยิปซัมเทียมที่ไม่ได้ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและผ่านการอบมาตรฐานตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction-XRD) ดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 พบว่ายิปซัมเทียมบางส่วนได้แปรสภาพจากยิปซัมเทียม ($\text{CaSO}_4 \cdot (0.5\text{H}_2\text{O})$) เป็น ($\text{CaSO}_4 \cdot (0.6\text{H}_2\text{O})$) หลังจากอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของยิปซัมเทียมก่อนอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของยิปซัมเทียมหลังจากอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 สมบัติของยิปซัมเทียม เถ้าลอยไม่ยางพาราและดินขาวแปรเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 618

องค์ประกอบทางเคมี	ยิปซัมเทียม(%)	เถ้าลอยไม่ยางพารา(%)	ดินขาวแปร(%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	20.70	3.66	87.56
SO_3	3.78	5.54	-
Na_2O	-	-	-

3.4 การหาปริมาณน้ำของเพสต์ควมคุม

ทำการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากที่สุดที่ยิปซัมเพสต์ยังคงสภาพเป็นพลาสติก ซึ่งยิปซัมเทียมและดินขาวแปรที่มีน้ำหนักรวมมากกว่าเถ้าลอยไม่ยางพาราไม่ตกตะกอนและน้ำไม่ถูกดันขึ้นสู่ด้านบนเนื่องจากการจมตัวของดินขาวแปร อันเนื่องมาจากวัสดุประสานที่นำมาผสมไม่สามารถกักน้ำ เพราะหากปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานในการผสมน้อยจะทำให้อิฐมวลเบาที่มีความหนาแน่นมาก ในทางกลับกันหากปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานมากเกินไปจะทำให้เกิดการแยก

ส่วนออก ส่งผลให้กำลังอัดลดลง ค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานนี้จะนำมาใช้เป็นเพสต์ควมคุมที่ ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด โดยทำการทดลองดังนี้

1) เตรียมแบบทดสอบสำหรับทดลองหาปริมาณน้ำของยิปซัมเพสต์ จะ ประกอบด้วยกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง 10 เซนติเมตร และกระบอกสวมฝาเปิดเส้น ผ่านศูนย์กลางและความสูง 10 และ 5 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.10(ก)

2) ชั่งน้ำหนักแบบทดสอบเปล่า นำยิปซัมเทียม ดินขาวแปรและเถ้าลอยไม่ ยางพารา ในแต่ละอัตราส่วนตามที่ได้ออกแบบการทดลองมาผสมให้เข้ากัน เติมน้ำประมาณ 0.6 เท่าของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดหรือจนกว่าจะสังเกตเห็นน้ำส่วนเกินเริ่มเยิ้มออกมาขณะผสม นำ ยิปซัมเพสต์เทลงในแบบทดสอบให้เต็ม (รูปที่ 3.10(ข))

3) ใช้แท่งเหล็กแคะแบบทดสอบเบาๆเพื่อให้ยิปซัมเพสต์ไหลเข้าไปใน แบบทดสอบจนเต็ม ใช้เกรียงเหล็กปาดยิปซัมเพสต์ส่วนที่เกินออกดังรูปที่ 3.10(ค)

4) ทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที ดึงกระบอกเปิดส่วนบนออก(รูปที่ 3.10(ง)) ใช้เกรียง เหล็กปาดยิปซัมเพสต์ส่วนที่เกินออกดังรูปที่ 3.10(จ) ในขั้นตอนนี้เป็นการกำจัดยิปซัมเพสต์ส่วนที่ เกิดการเยิ้มและน้ำส่วนเกินออก

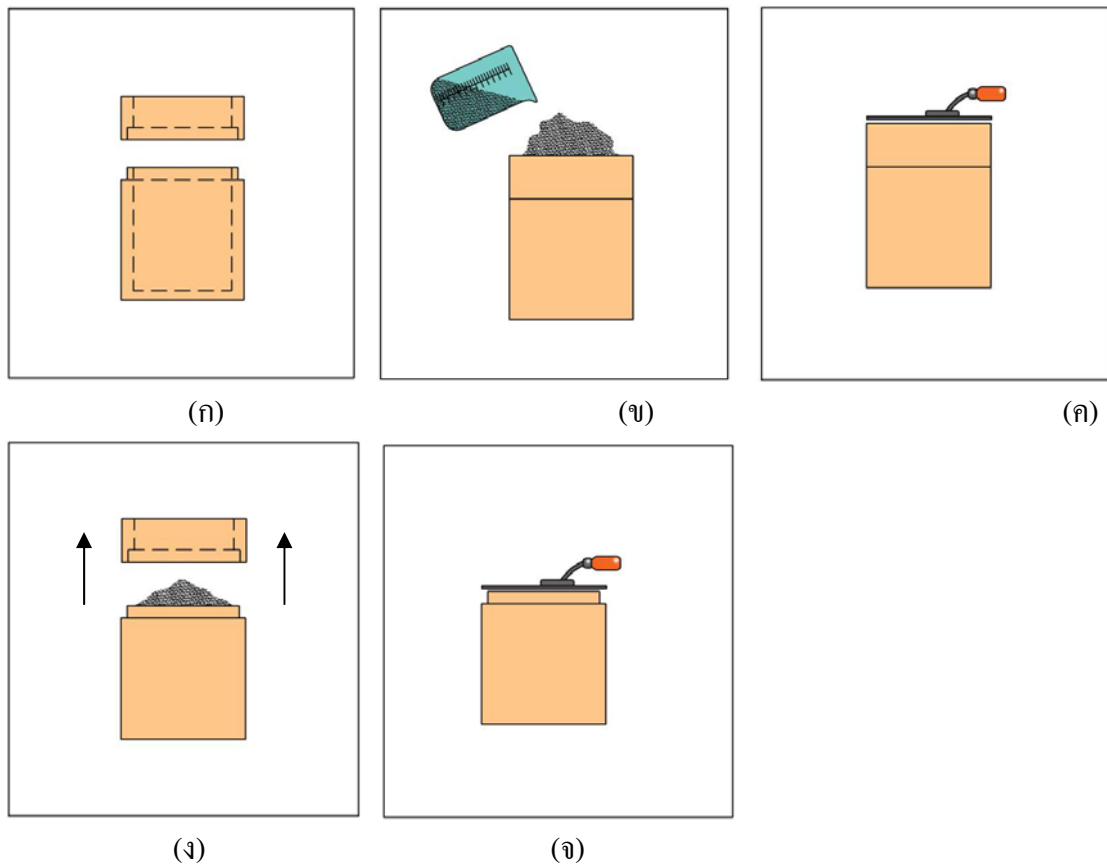
5) ชั่งน้ำหนักแบบทดสอบโดยให้เป็นน้ำหนักรวมของแบบทดสอบและยิปซัม เพสต์ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนัก แบบทดสอบโดยน้ำหนักที่ได้นี้เป็นน้ำหนักของแบบทดสอบและยิปซัมเพสต์ที่ไล่น้ำออกจนหมด ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ควมคุมได้จากสมการ 3.6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ได้นี้จะป็นค่าโดยประมาณเพื่อนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการทดลอง เนื่องจากจะมีน้ำบางส่วนถูก ดึงเข้าไปรวมตัวกับยิปซัมเทียมที่อบแล้วไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงไม่สามารถทราบค่าปริมาณน้ำ ที่แท้จริงในการหล่อยิปซัมเพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ควมคุมที่ได้จะใช้ สัญลักษณ์ 1.0GP ดังตารางที่ 3.4 และทำการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง 0.9, 0.8 และ 0.7 ของเพสต์ควมคุมโดยใช้สัญลักษณ์ 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP ตามลำดับ

$$\text{อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์ควมคุม} = (C_2 - C_3) / (C_3 - C_1) \quad (3.6)$$

โดย C_1 คือน้ำหนักแบบทดสอบเปล่า

C_2 คือน้ำหนักแบบทดสอบและยิปซัมเพสต์

C_3 คือน้ำหนักแบบทดสอบและยิปซัมเพสต์ที่ไล่น้ำออกจนหมด



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์และขั้นตอนการหาปริมาณน้ำของเพสต์คววม (ก) ครอบกบบรรจุยิปซัมเพสต์ และ ครอบกบสวมฝาเปิด (ข) เทยิปซัมเพสต์ลงในแบบ (ค) ปาดยิปซัมเพสต์ที่ปากครอบกบสวม (ง) ดึงครอบกบสวมออก (จ) ปาดผิวหน้าให้เรียบ

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของเพสต์คววม

สัญลักษณ์	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานที่ 1.0GP	สัญลักษณ์	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานที่ 1.0GP
RWFA0MKL0	0.584	RWFA20MKL10	0.723
RWFA10MKL0	0.688	RWFA20MKL20	0.733
RWFA20MKL0	0.694	RWFA30MKL10	0.741
RWFA30MKL0	0.720	RWFA30MKL20	0.759
RWFA10MKL10	0.706	RWFA0MKL10	0.633
RWFA10MKL20	0.716	RWFA0MKL20	0.641

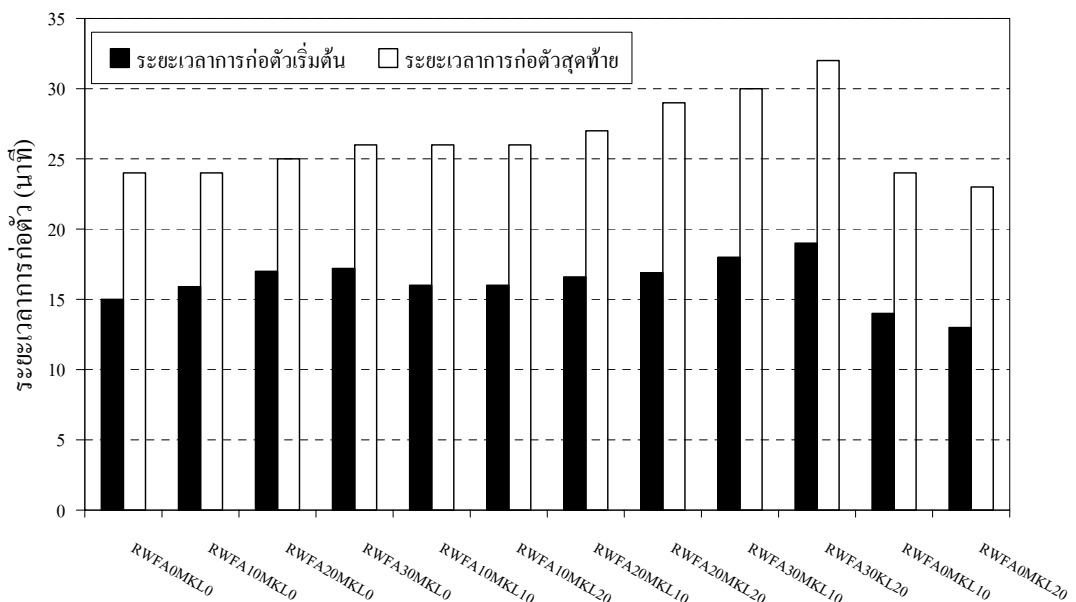
บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการศึกษา

พฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา และดินขาวแปร ซึ่งส่งผลกระทบต่อยิปซัมเพสต์ในประเด็นต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว ความหนาแน่นแห้ง การดูดกลืนน้ำ กำลังอัด การหดตัว และสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง นำมาเปรียบเทียบในแต่ละอัตราส่วนผสมทุกอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเทียม โดยเฉพาะสมบัติด้านกำลังอัดและความหนาแน่นแห้ง ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานในการประเมินคุณภาพของยิปซัมเพสต์

4.1 ระยะเวลาการก่อตัว

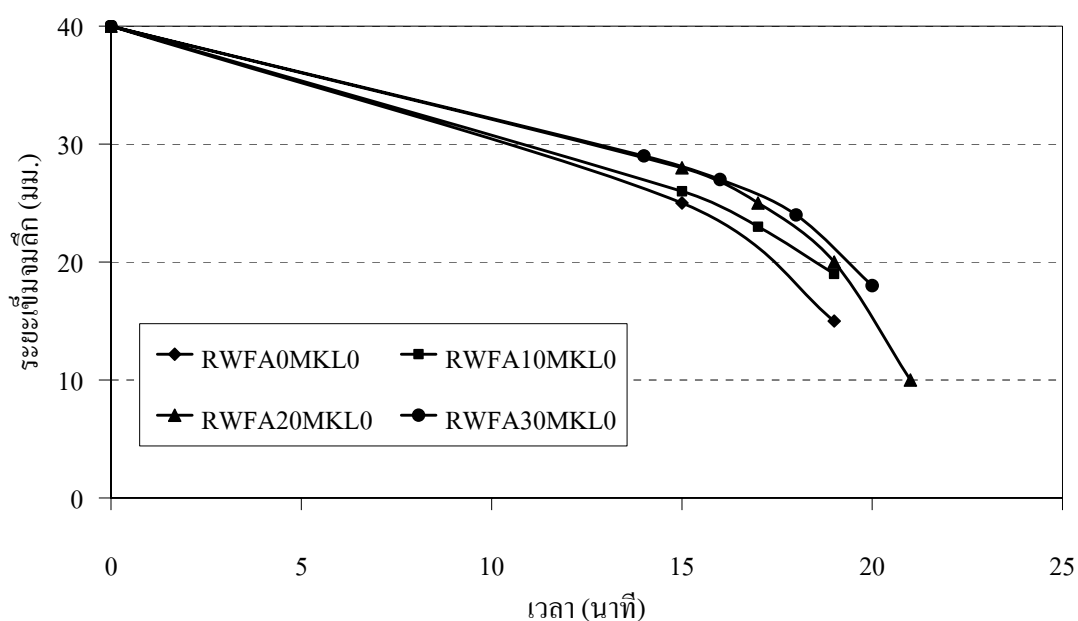
ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของยิปซัมเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10, 20 และ 30 กับดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงผลความแปรปรวนดังรูปที่ 4.1



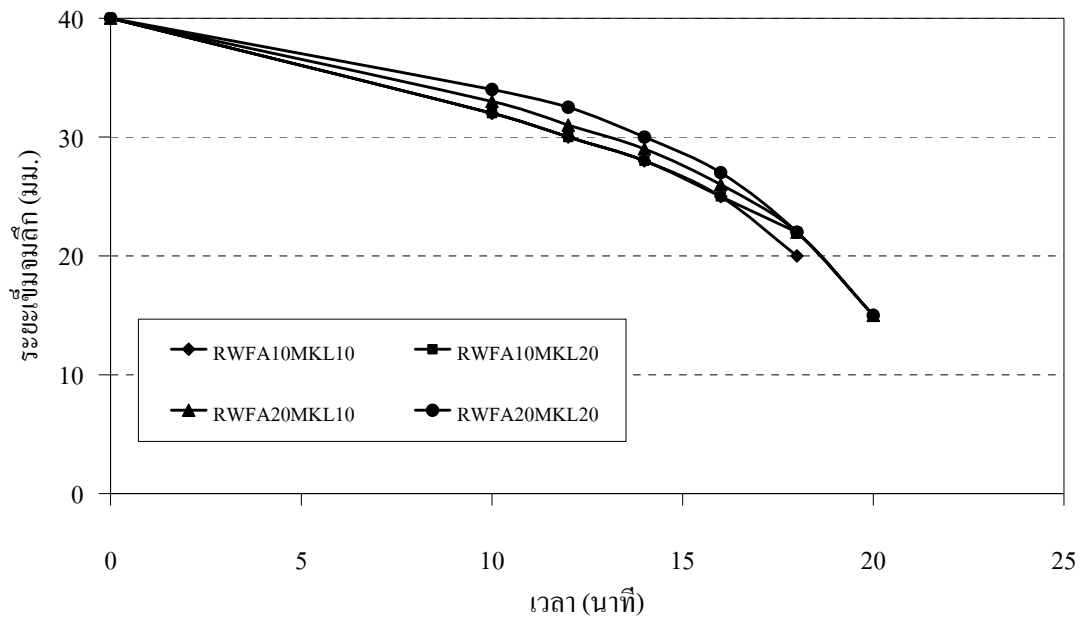
รูปที่ 4.1 แนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย

4.1.1 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

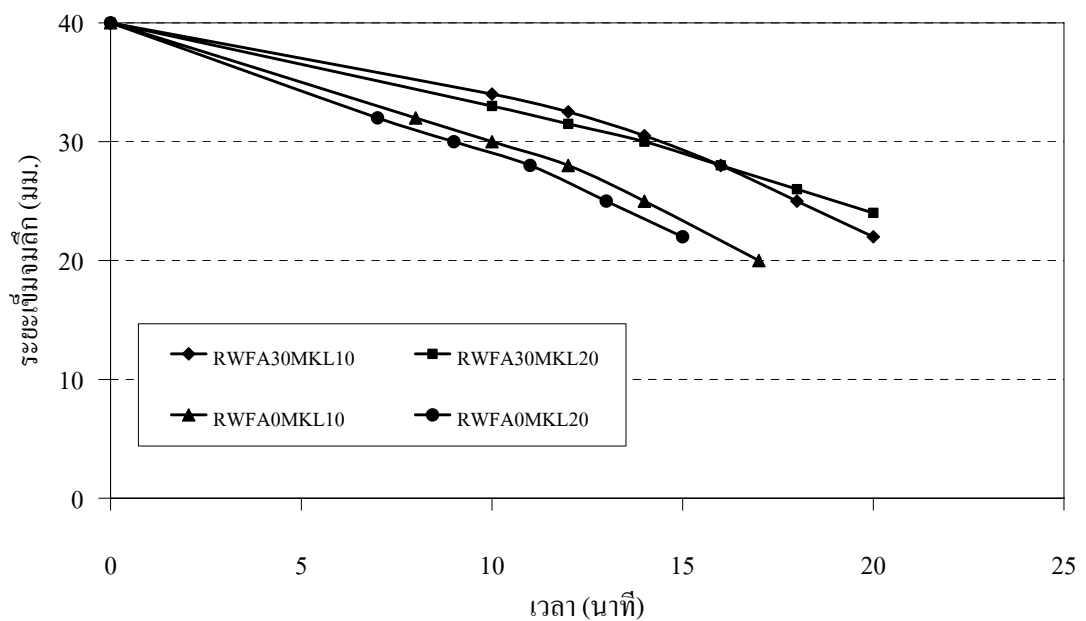
พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของยิปซัมเทียมล้วน (RWFA0MKL0) เท่ากับ 15 นาที แต่เมื่อนำเถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ในยิปซัมเทียมร้อยละ 10, 20 และ 30 กลับพบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.9, 17.0 และ 17.2 นาที ตามลำดับดังรูปที่ 4.2 แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยไม้ยางพารา จะไปชะลอการแข็งตัวของยิปซัมเพสต์ ช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นได้นานขึ้นประมาณร้อยละ 4.7 ในทางกลับกันปริมาณดินขาวแปรที่เพิ่มขึ้นในยิปซัมเพสต์จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นลดลง หากแทนที่ดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ร้อยละ 10 และ 20 จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นลดลงเท่ากับ 14 และ 13 นาที ดังรูปที่ 4.3(ข)



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเพสต์ต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ที่อัตราส่วนผสม RWFA0MKL0, RWFA10MKL0, RWFA20MKL0 และ RWFA30MKL0



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยไม่ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่อัตราส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20

4.1.2 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย

ในแง่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของยิปซัมเทียมล้วน(RWFA0MKL0) เท่ากับ 24 นาที แต่เมื่อทดลองแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเทียมร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายอยู่ระหว่าง 24-26 นาที แสดงว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพารามากขึ้น จะสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายได้นานขึ้นประมาณร้อยละ 13 เนื่องจากเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเทียมมากขึ้น ทำให้ยิปซัมเพสต์มีความต้องการปริมาณน้ำมากขึ้น น้ำที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกกักเก็บไว้ในอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารา ซึ่งมีช่องว่างคล้ายโพรงฟองน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันในยิปซัมเทียมถูกหน่วงไว้ ยิปซัมเพสต์จึงแข็งตัวช้าลง ในทางกลับกันหากแทนที่ด้วยดินขาวแปรจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายลดลงในช่วง 23-24 นาที ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อปริมาณดินขาวแปรสูงขึ้นระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายจะลดลง เนื่องจากดินขาวแปรมีความละเอียดสูงกว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา

พรนราชน์และคณพล (2546) ได้ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมากขึ้น และความต้องการน้ำของมอร์ตาร์มากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะเถ้าปาล์มมีลักษณะกลมผิวหยาบมีความพรุนสูง

วีรชาติและคณะ (2546) ได้บดเถ้าปาล์มเพื่อให้อนุภาคมีขนาดเล็กกลงกลับทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายลดลง เพราะอนุภาคเถ้าปาล์มหลังจากบดแล้วจะมีปริมาณความพรุนและโพรงอากาศลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้ความต้องการน้ำลดลงด้วย

ในการทดลองในครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าการลดปริมาณยิปซัมเทียม โดยแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเพสต์ เมื่อปริมาณยิปซัมเทียมลดลงทำให้ปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสียน้ำจากความร้อนก็จะลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสม RWFA10MKL0, RWFA20MKL0 และ RWFA30MKL0 มีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเป็น 24, 25 และ 26 นาทีตามลำดับ จากผลการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่าถ้ายิปซัมเทียมถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามากกว่าร้อยละ 30 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายก็จะแปรผันตามปริมาณเถ้าไม้ยางที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย

สัญลักษณ์	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น(นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย(นาที)
RWFA0MKL0	15.0	24.0
RWFA10MKL0	15.9	24.0
RWFA20MKL0	17.0	25.0
RWFA30MKL0	17.2	26.0
RWFA10MKL10	16.0	26.0
RWFA10MKL20	16.0	26.0
RWFA20MKL10	16.6	27.0
RWFA20MKL20	16.9	29.0
RWFA30MKL10	18.0	30.0
RWFA30MKL20	19.0	32.0
RWFA0MKL10	14.0	24.0
RWFA0MKL20	13.0	23.0

4.2 ความหนาแน่นของยิปซัมเพสต์

ตามมาตรฐาน มอก.1505-2541 ชั้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำและมาตรฐานมอก.1510-2541 แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ จะใช้ค่าความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเป็นตัวกำหนดชนิดของคอนกรีตมวลเบาและประเภทการใช้งาน แต่ในการใช้งานจริงค่าความหนาแน่นแห้งไม่ใช่ค่าความหนาแน่นที่เกิดขึ้นจริงในยิปซัมเพสต์ หลังจากหล่อก้อนตัวอย่างแล้วน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงตกค้างและค่อยๆ ระเหยออกไปทีละน้อยตามสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในสภาวะปรกติยิปซัมเพสต์จะมีน้ำตกค้างไว้ภายในเสมอ โดยที่เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นก็จะลดลงจนเข้าใกล้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งความหนาแน่นของยิปซัมเพสต์ได้รับอิทธิพลจากอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม่ย่างพาราในยิปซัมเพสต์

4.2.1 ความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์

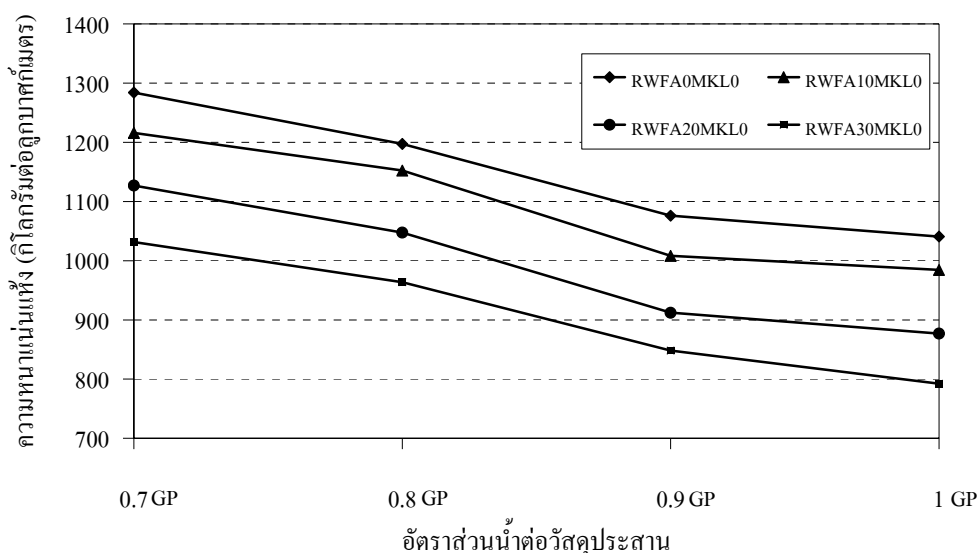
ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนและยิปซัมเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 กับดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP ดังตารางที่ 4.2 พบว่ายิปซัมเทียมล้วนเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปร ส่งผลทำให้ความหนาแน่นแห้งของยิปซัมเพสต์ลดลง สาเหตุจากเถ้าลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูง ส่วนดินขาวแปรมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 เมื่อเปรียบเทียบกับยิปซัมเทียมที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.46 การแทนที่ด้วยดินขาวแปรทำให้ความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิเดชและคุณพล (2551) ที่ใช้เถ้าไม้ยางพาราและเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมวลรวมหินพัมมิช ซึ่งความหนาแน่นรวมของคอนกรีตจะลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบและเถ้าลอยไม้ยางพารามากขึ้น ในทุกอายุการบ่มเนื่องจากเถ้าแกลบมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ คุณพลและอัครเดช (2546) ได้ทดลองมอร์ตาร์ผสมหางแร่ดินขาวโดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของมอร์ตาร์จะลดลงตามปริมาณหางแร่ดินขาวที่เพิ่มขึ้นเพราะความถ่วงจำเพาะของหางแร่ดินขาวมีค่าเฉลี่ย 2.43 น้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่า 3.15

สำหรับผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุประสานพบว่ายิปซัมเทียมแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP มีค่า 1284, 1216, 1127 และ 1032 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.4 ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 1.0GP จะมีความหนาแน่นแห้งลดลงต่ำสุดเหลือ 1041, 984, 877 และ 792 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับหรือลดลงประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 1.0GP เป็น 0.9GP อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแห้งจะน้อยกว่าช่วงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.9GP เป็น 0.8GP เพราะอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 1.0GP นี้ทำลายการยึดเกาะระหว่างอนุภาควัสดุประสานโดยน้ำจะเคลือบผิวรอบวัสดุประสานเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชันช่องว่างในยิปซัมเพสต์จึงมีสูง และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงเป็น 0.9GP ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพราะยังมีน้ำเคลือบผิวรอบวัสดุประสานอยู่ แต่ถ้าหากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.8GP ค่าความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะน้ำเคลือบผิวรอบวัสดุประสานน้อยลงทำให้การเรียงกันของวัสดุประสานชิดกันมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นแห้งของยิปซัมเพสต์เพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.7GP ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพราะปริมาณช่องว่างที่น้ำ

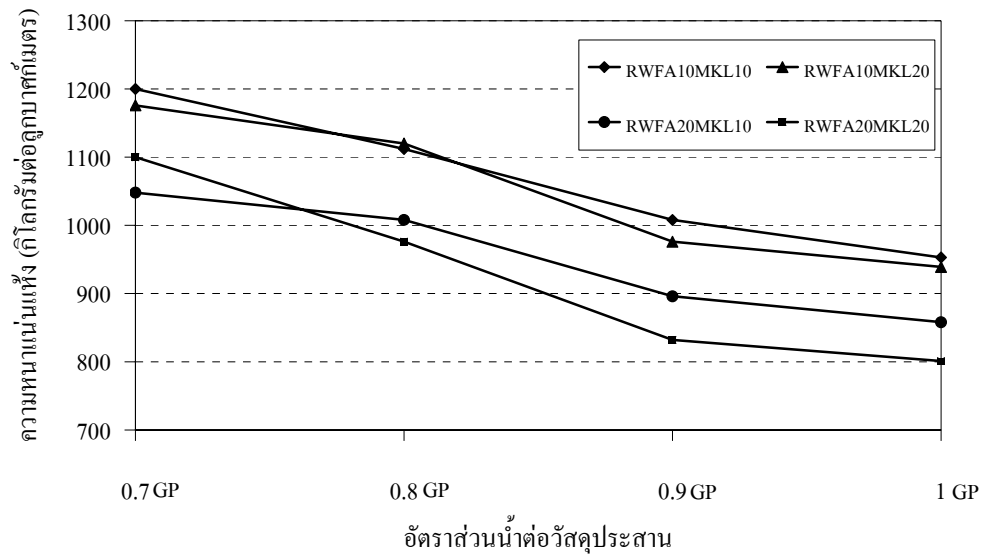
สามารถเข้าไปแทนที่มีจำกัด วัสดุประสานมีน้ำเป็นตัวหล่อลื่นน้อยลงต้องใช้พลังงานในการจี้ ยิปซัมเพสต์สูงขึ้น ทำให้การเรียงตัวของอนุภาคชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ยิปซัมเพสต์มีความหนาแน่นแห้งมากขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นยิปซัมเทียมแทนที่ด้วยดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแห้งสูงสุดในช่วงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.9GP เป็น 0.8GP เหมือนกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา แต่ในช่วงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8GP เป็น 0.7GP พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของช่วงนี้ก็ยังมีความหนาแน่นแห้งสูงกว่าเมื่อแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา โดยมีสาเหตุมาจากอนุภาคของดินขาวแปรที่มีขนาดเล็กมากกว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา นอกจากนี้การการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในสัดส่วนร้อยละ 30 และ 20 ในยิปซัมเทียมส่งผลให้ยิปซัมเพสต์มีความหนาแน่นแห้งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆในทุกๆอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งที่ 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP เป็น 719, 776, 920 และ 992 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับดังรูปที่ 4.5(ข)

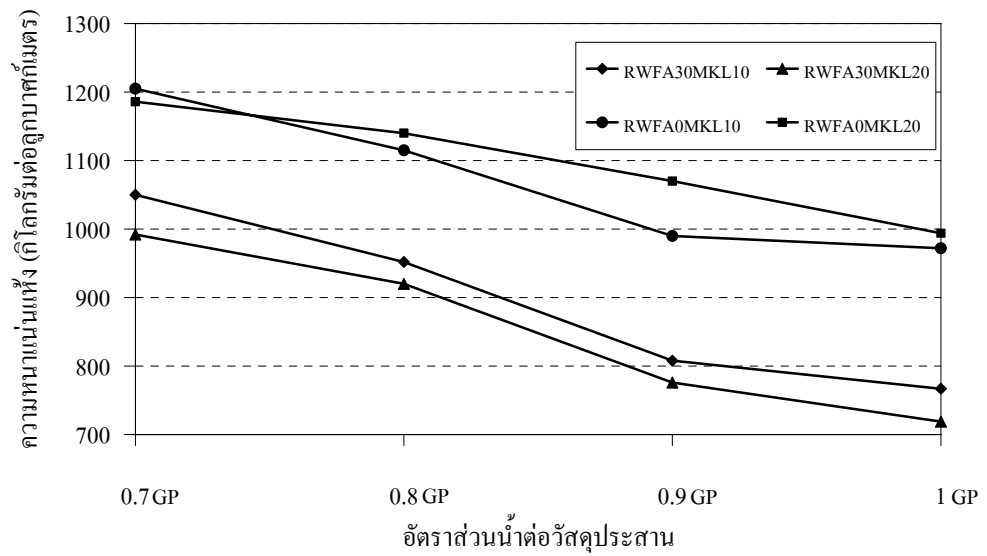
เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ายิปซัมเทียม การแทนที่วัสดุประสานในยิปซัมเทียมส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลงตามปริมาณมวลรวมที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้จากเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรร้อยละ 30 และ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP ยิปซัมเพสต์มีความหนาแน่นแห้ง 719 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.4 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ในยิปซัมเพสต์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 การแทนที่เถ้าลอยไม้อย่างพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์

สัญลักษณ์	ค่าความหนาแน่นแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	1041	1076	1197	1284
RWFA10MKL0	984	1008	1152	1216
RWFA20MKL0	877	912	1048	1127
RWFA30MKL0	792	848	964	1032
RWFA10MKL10	953	1008	1112	1200
RWFA10MKL20	939	976	1120	1176
RWFA20MKL10	858	896	1008	1048
RWFA20MKL20	801	832	976	1100
RWFA30MKL10	767	808	952	1050
RWFA30MKL20	719	776	920	992
RWFA0MKL10	972	990	1115	1205
RWFA0MKL20	994	1070	1140	1186

4.2.2 พฤติกรรมความหนาแน่นของยิปซัมเพสต์ที่บ่ม

ในการใช้งานจริง ยิปซัมเพสต์ทั่วไปที่นำมาใช้งานจะมีค่าความหนาแน่นจริงไม่ใช่ความหนาแน่นแห้ง การทดลองในครั้งนี้จึงคือน้ำหนักของน้ำในยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วันและ 28 วัน โดยเริ่มต้นหลังจากหล่อในแบบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบนำก้อนยิปซัมเพสต์เก็บไว้ในห้องที่อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส หาค่าความหนาแน่นที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 โดยจากตารางจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของยิปซัมเพสต์จะลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำส่วนเกินในยิปซัมเพสต์ค่อยๆ ระเหยออกไปเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จากการทดลองหากปริมาณแฉะลดยังคงพาราที่แทนที่ในยิปซัมเพสต์มากขึ้น ค่าความหนาแน่นจะลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบที่อายุบ่มของยิปซัมเพสต์ที่ 7 วันกับอายุบ่ม 28 วัน ทั้งนี้เพราะอนุภาคแฉะลดยังคงพาราที่มีลักษณะพรุนทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำจึงสามารถกักเก็บน้ำไว้ในอนุภาคได้มากในขณะที่เดียวกันก็สามารถคายน้ำออกจากอนุภาคได้ดี

เช่นกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นยิปซัมเพสต์จะสัมพันธ์กับปริมาณการดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์ สอดคล้องกับ Tonnyopas et al. (2006) ซึ่งได้หาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าเชื้อเพลิงกะลาปาล์มน้ำมัน พบว่าค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงกะลาปาล์มที่เพิ่มขึ้นและการดูดกลืนน้ำจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของมอร์ตาร์

ถ้าความหนาแน่นยิปซัมเพสต์หลังจากบ่มที่ 7 วันเป็น 28 วันมีค่าลดลงมาก แสดงว่ายิปซัมเพสต์มีช่องว่างภายในที่สามารถระเหยออกไปได้มาก ในทางกลับกันหากยิปซัมเพสต์ได้รับน้ำก็สามารถดูดกลืนน้ำเข้ามาอีกเก็บไว้ภายในก้อนได้มากเหมือนกัน

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน

สัญลักษณ์	ความหนาแน่นแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	1360	1394	1472	1554
RWFA10MKL0	1424	1440	1496	1544
RWFA20MKL0	1296	1328	1416	1440
RWFA30MKL0	1256	1368	1408	1440
RWFA10MKL10	1304	1440	1472	1488
RWFA10MKL20	1280	1424	1496	1528
RWFA20MKL10	1320	1344	1400	1472
RWFA20MKL20	1248	1280	1416	1456
RWFA30MKL10	1240	1264	1344	1400
RWFA30MKL20	1168	1200	1312	1376
RWFA0MKL10	1331	1387	1430	1490
RWFA0MKL20	1367	1417	1432	1510

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

สัญลักษณ์	ความหนาแน่นแห้ง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	1304	1364	1394	1491
RWFA10MKL0	1240	1312	1360	1400
RWFA20MKL0	1176	1256	1328	1360
RWFA30MKL0	1104	1184	1248	1312
RWFA10MKL10	1200	1264	1312	1344
RWFA10MKL20	1216	1248	1272	1328
RWFA20MKL10	1160	1296	1336	1368
RWFA20MKL20	1136	1240	1176	1280
RWFA30MKL10	1064	1168	1200	1240
RWFA30MKL20	1008	1184	1216	1264
RWFA0MKL10	1294	1371	1400	1430
RWFA0MKL20	1324	1368	1391	1489

4.3 การดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์

ผลการทดสอบหาค่าการดูดกลืนน้ำยิปซัมเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 กับดินขาวแปรในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP ดังตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณการดูดกลืนน้ำแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์ โดยค่าการดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ พบว่าหลังจากที่ยิปซัมเพสต์แข็งตัวแล้วน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ถูกดึงดูดด้วยพันธะโควาเลนต์รอบมวบรวมได้ระเหยออกไป เกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในเนื้อยิปซัมเพสต์และเกิดจากความพรุนในอนุภาคของเถ้าลอยไม้ยางพาราเองด้วย นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเทียมมากส่งผลให้เกิดโพรงรูเล็ก (Capillary pores) เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระได้ดันตัวขึ้นแทรกผ่านเนื้อยิปซัมเพสต์ทำให้เกิดโพรงเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณผิวหน้ายิปซัมเพสต์

จากรูปที่ 4.6 ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนมีค่าดูดกลืนน้ำต่ำสุด โดยที่อัตราส่วนน้ำ 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP ที่ค่า 284, 253, 216 และ 202 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เนื่องจากยิปซัมเพสต์ที่ไม่มีเถ้าลอยไม้อย่างพาราและดินขาวแปรปนอยู่ โดยเฉพาะเถ้าลอยไม้อย่างพาราที่มีความพรุนในอนุภาคสูงทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำคอยดูดซับน้ำ ทำให้เมื่อแทนที่ยิปซัมด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพาราร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยไม้อย่างพาราทำให้ค่าการดูดกลืนน้ำสูงขึ้น โดยการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพาราร้อยละ 30 ทำให้ค่าการดูดกลืนน้ำสูงสุด ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP มีค่าเท่ากับ 494, 460, 440 และ 409 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7(ข) เมื่อแทนที่ด้วยดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 นำมาเปรียบเทียบกับการแทนที่ด้วยไม้อย่างพารา พบว่าค่าการดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยดินขาวแปรมีอัตราการดูดกลืนน้ำน้อยกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพาราประมาณร้อยละ 47-56 เพราะอนุภาคของดินขาวมีความพรุนน้อยกว่าเถ้าลอยไม้อย่างพารามาก ทำให้การกักเก็บน้ำไว้ในอนุภาคน้อยอีกทั้งอนุภาคดินขาวแปรที่มีขนาดเล็กได้กระจายตัวในช่องว่างระหว่างเถ้าลอยไม้อย่างพาราและยิปซัมเทียมทำให้ช่องว่างลดลง ส่งผลให้การดูดกลืนน้ำลดลงไปด้วย

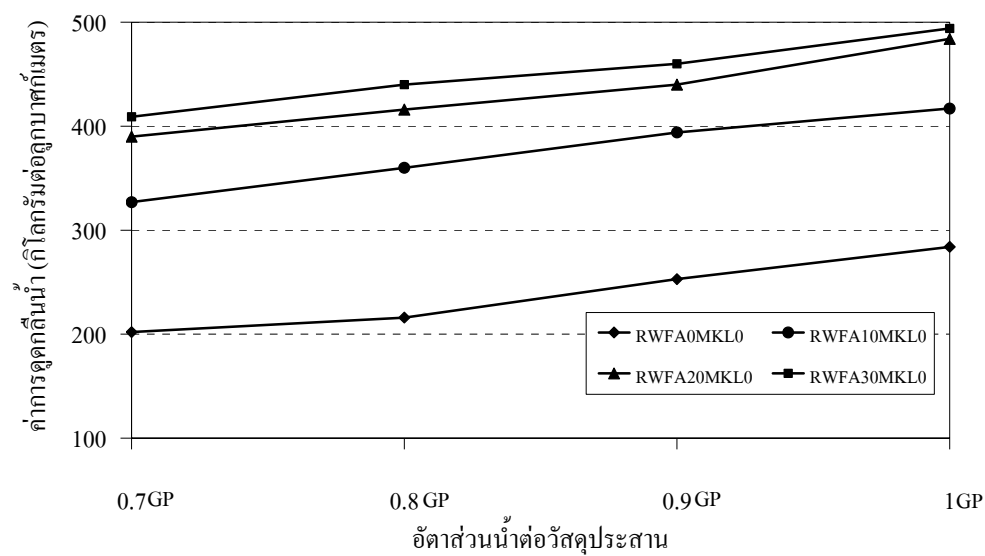
อาบีเต็งและคณูพล (2551) ได้ทำการหาค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตหินพัมมิช โดยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยไม้อย่างพารา พบว่าค่าการดูดกลืนน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยไม้อย่างพาราในปูนซีเมนต์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเถ้าลอยไม้อย่างพาราเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนน้ำ

บุรฉัตร (2544) ได้ทดสอบสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว พบว่าเมื่อร้อยละการแทนที่ของเถ้าฟางข้าวมีปริมาณสูงค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะของเถ้าฟางข้าวมีลักษณะพรุนพื้นผิวขรุขระ อีกทั้งการแทนที่เถ้าฟางข้าวที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น เพราะโมเลกุลของน้ำสามารถเกาะบริเวณผิวของอนุภาค จึงทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในอนุภาคเถ้าฟางข้าวได้มากขึ้น

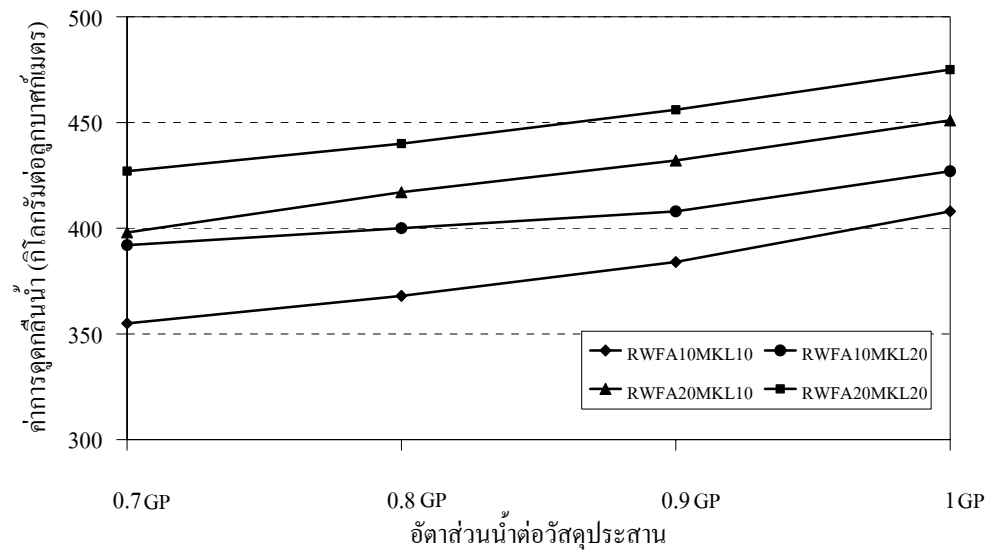
จากที่กล่าวมาข้างต้นหากนำเถ้าจากการเผาถ่านเชื้อเพลิงที่ได้จากการเกษตรเช่น เถ้ากะลาปาล์ม เถ้าแกลบ เถ้าไม้อย่างพารามาใช้เป็นส่วนผสมในยิปซัมเพสต์ เถ้าเหล่านี้ส่งผลกระทบในการเพิ่มค่าการดูดกลืนน้ำในคอนกรีตเพราะอนุภาคของเถ้ามีความพรุนสูง ต่างกับเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งอนุภาคมีลักษณะกลม ช่องว่างภายในน้อย เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์จะลดช่องว่าง ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำลดลง

ตารางที่ 4.5 การดูคกคืนน้ำของยิปซัมเพสต์

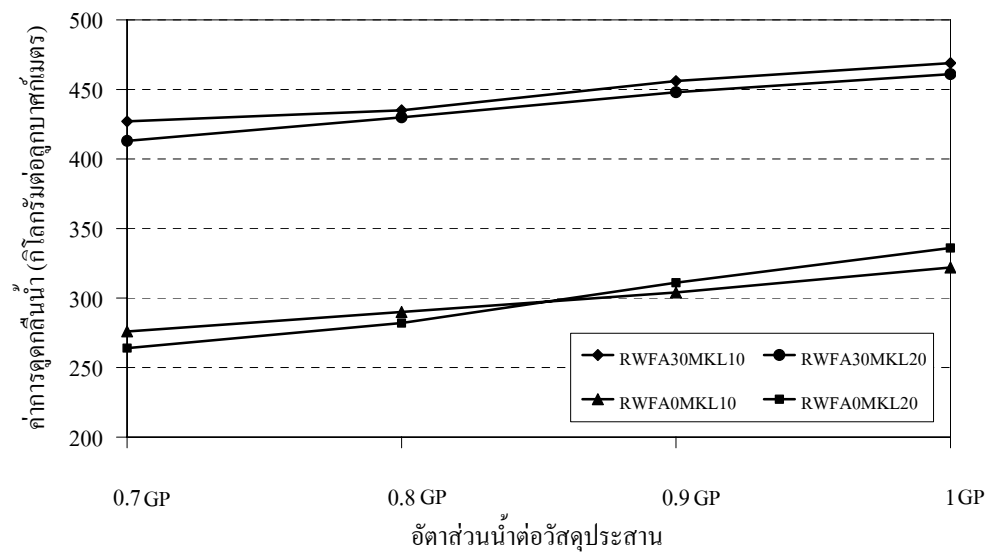
สัญลักษณ์	การดูคกคืนน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	284	253	216	202
RWFA10MKL0	417	394	360	327
RWFA20MKL0	484	440	416	390
RWFA30MKL0	494	460	440	409
RWFA10MKL10	408	384	368	355
RWFA10MKL20	427	408	400	392
RWFA20MKL10	451	432	417	398
RWFA20MKL20	475	456	440	427
RWFA30MKL10	469	456	435	427
RWFA30MKL20	461	448	430	413
RWFA0MKL10	322	304	290	276
RWFA0MKL20	336	311	282	264



รูปที่ 4.6 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ในยิปซัมเพสต์แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่งผลต่อค่าการดูคกคืนน้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนน้ำที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10, RWFA10MKL20, RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10, RWFA30MKL20, RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20

4.4 การหดตัวของยิปซัมเพสต์

ผลการทดสอบการหดตัวของยิปซัมเพสต์โดยแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 กับ 10 และ 20 ตามลำดับที่อายุบ่ม 28 วันและบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำ ดังตารางที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยไม้ยางพาราและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในยิปซัมเพสต์ เป็นสาเหตุหลักของการหดตัวของยิปซัมเพสต์ โดยค่าการหดตัวจะมากที่สุดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 30 ที่อายุบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 1.0GP มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.069 ดังรูปที่ 4.8(ก) และรูปที่ 4.8(ข) แต่ในทางกลับกันหากเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ พบว่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์มีแนวโน้มที่จะลดลง โดยการแทนที่ด้วยดินขาวแปรร้อยละ 20 ของปริมาณยิปซัมเทียมทำให้มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.012 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.9GP ดังรูปที่ 4.10(ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Gleize et al. (2007) ที่ศึกษาผลกระทบของมอร์ตาร์จากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวแปรและผงควอตซ์ ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ที่ส่งผลต่อการหดตัวจากการอบไอน้ำของมอร์ตาร์ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.3 และ 0.5 พบว่ามอร์ตาร์อบไอน้ำที่ใช้ดินขาวหดตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์อบไอน้ำที่ใส่ผงควอตซ์

การเติมดินขาวแปรเพิ่มในยิปซัมเพสต์ที่มียิปซัมเทียมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจะช่วยลดค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยเพิ่มดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 ดังรูปที่ 4.9(ก) พบยิปซัมเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจะมีค่าการหดตัวลดลงเมื่อปริมาณดินขาวแปรมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP มีค่าร้อยละ 0.037 และ 0.033 ค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 20 โดยเพิ่มดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 มีค่า 0.042 และ 0.039 ดังรูปที่ 4.9(ข) เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์จากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP จนถึง 0.8GP ค่าการหดตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะผลกระทบจากการเกิดโพรงรูเล็กและช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ซึ่งทั้งสองเป็นสาเหตุหลักของการหดตัวที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อสังเกตค่าการหดตัวจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8GP จนถึง 0.7GP แล้วค่าการหดตัวจะลดลงน้อยมากเพราะในช่วงนี้ยิปซัมเพสต์มีผลกระทบจากการเกิดโพรงรูเล็กและช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้น้อย

จากการเปรียบเทียบค่าการหดตัวที่อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันแต่บ่มโดยใช้ไอน้ำแรงดันต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าการบ่มด้วยไอน้ำแรงดันต่ำทำให้ค่าการหดตัวลดลงเมื่อเทียบกับการบ่มเป็นเวลา 28 วัน ทุก

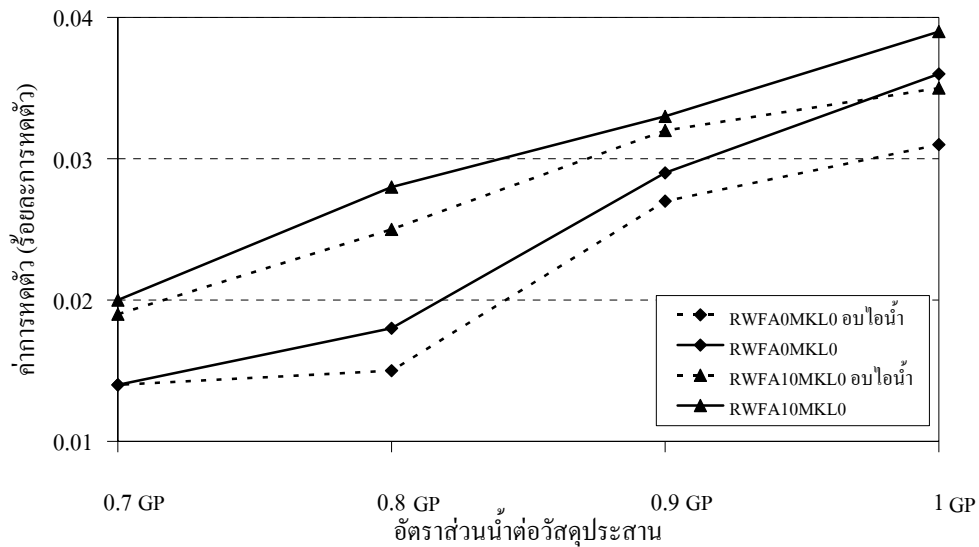
อัตราส่วนผสมและทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ดังนั้นการอบไอน้ำสามารถลดการหดตัวซึ่งเป็นสาเหตุการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง ของยิปซัมเฟสค์ได้

ตารางที่ 4.6 การหดตัวของยิปซัมเฟสค์ที่อายุบ่ม 28 วันและบ่ม โดยการอบไอน้ำ

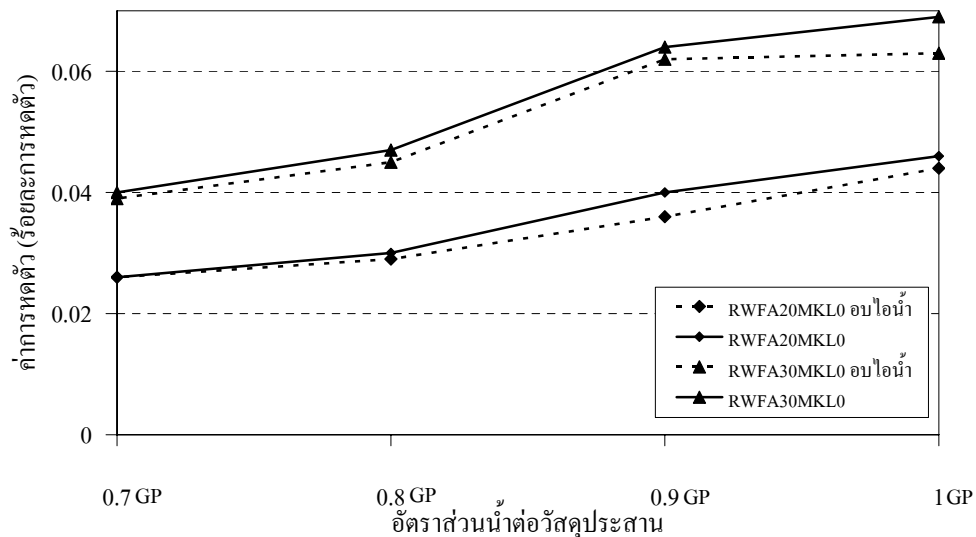
สัญลักษณ์	ผลทดสอบการหดตัว (ร้อยละการหดตัว)							
	อายุบ่ม 28 วัน				อบไอน้ำแรงดันต่ำ			
	1.0 GP	0.9 GP	0.8 GP	0.7 GP	1.0 GP	0.9 GP	0.8 GP	0.7 GP
RWFA0MKL0	0.036	0.029	0.018	0.014	0.031	0.027	0.015	0.014
RWFA10MKL0	0.039	0.033	0.028	0.020	0.035	0.032	0.025	0.019
RWFA20MKL0	0.046	0.040	0.030	0.026	0.044	0.036	0.029	0.026
RWFA30MKL0	0.069	0.064	0.047	0.040	0.063	0.062	0.045	0.039
RWFA10MKL10	0.037	0.035	0.025	0.019	0.035	0.032	0.023	0.018
RWFA10MKL20	0.033	0.030	0.022	0.019	0.031	0.028	0.021	0.018
RWFA20MKL10	0.042	0.040	0.030	0.025	0.039	0.038	0.029	0.024
RWFA20MKL20	0.039	0.033	0.030	0.024	0.033	0.030	0.028	0.022
RWFA30MKL10	0.058	0.048	0.036	0.029	0.050	0.041	0.032	0.027
RWFA30MKL20	0.047	0.041	0.033	0.030	0.042	0.039	0.030	0.029
RWFA0MKL10	0.032	0.028	0.020	0.013	0.03	0.025	0.019	0.012
RWFA0MKL20	0.03	0.026	0.017	0.012	0.028	0.025	0.014	0.010

อาบีเค็ง (2552) ได้วิเคราะห์การหดตัวของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม่
 ยางพาราจากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยไม่
 ยางพาราร้อยละ 10 มีค่าการร้อยละการหดตัวมากกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่ 7 และ 28 วัน ที่การ
 แทนที่ร้อยละ 20 และ 30 มีแนวโน้มการหดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน
 ด้วยเถ้าลอยไม่ยางพาราบางส่วน มีการดูดกลืนน้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุมทำให้มีปริมาณน้ำมาก
 ในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตใช้เวลาในการระบายนานกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนของเถ้าลอยไม่
 ยางพารา ทั้งนี้เพราะว่าเถ้าลอยไม่ยางพารามีความพรุนจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ทำให้ดูดซึม

น้ำได้ดี สังเกตเห็นได้จากยิ่งเพิ่มการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพารามากขึ้น ค่าร้อยละการหดตัวต้องใช้เวลามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้ากลบ พบว่าที่การแทนที่ร้อยละ 10 ร้อยละการหดตัวมากกว่าที่การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราปริมาณเดียวกันที่ทั้ง 7 และ 28 วัน

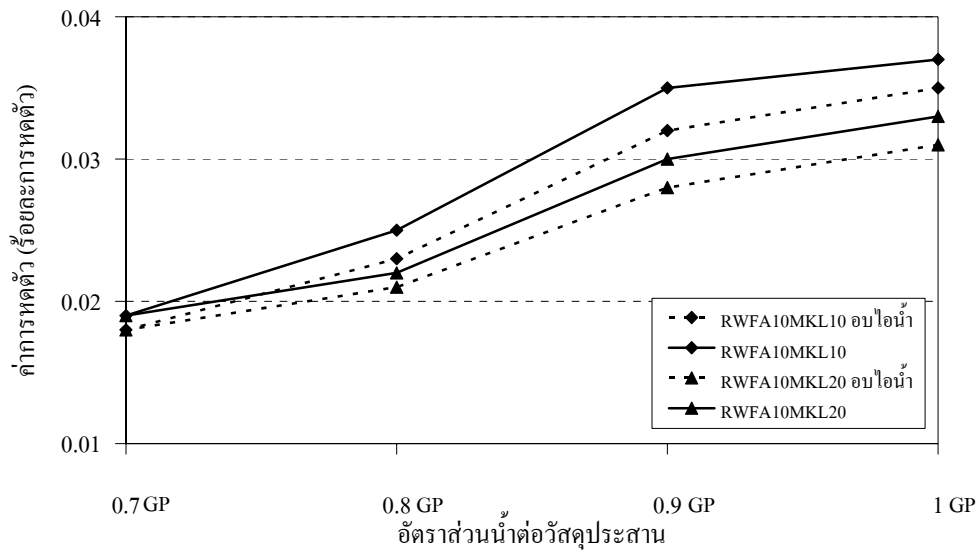


(ก)

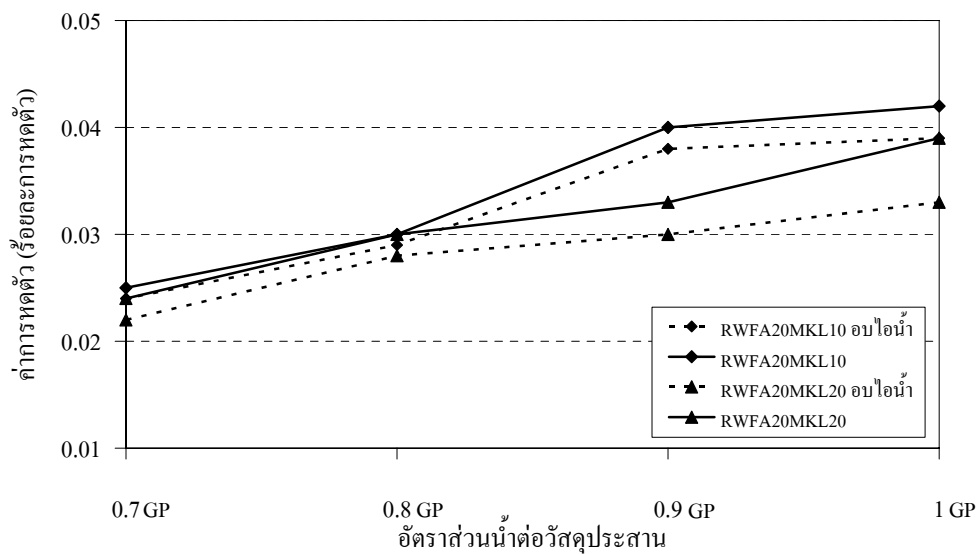


(ข)

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA0MKL0 และ RWFA10MKL0 (ข) RWFA20MKL0 และ RWFA30MKL0

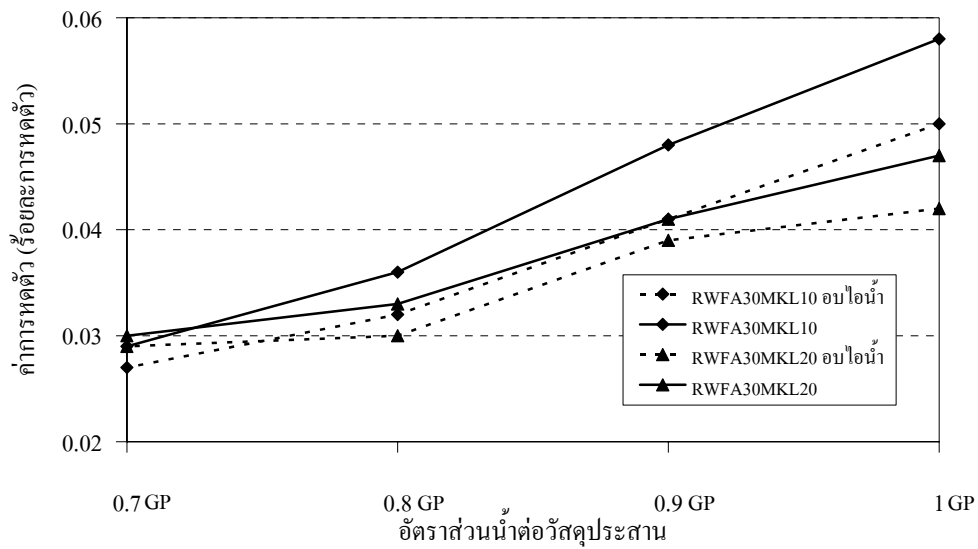


(ก)

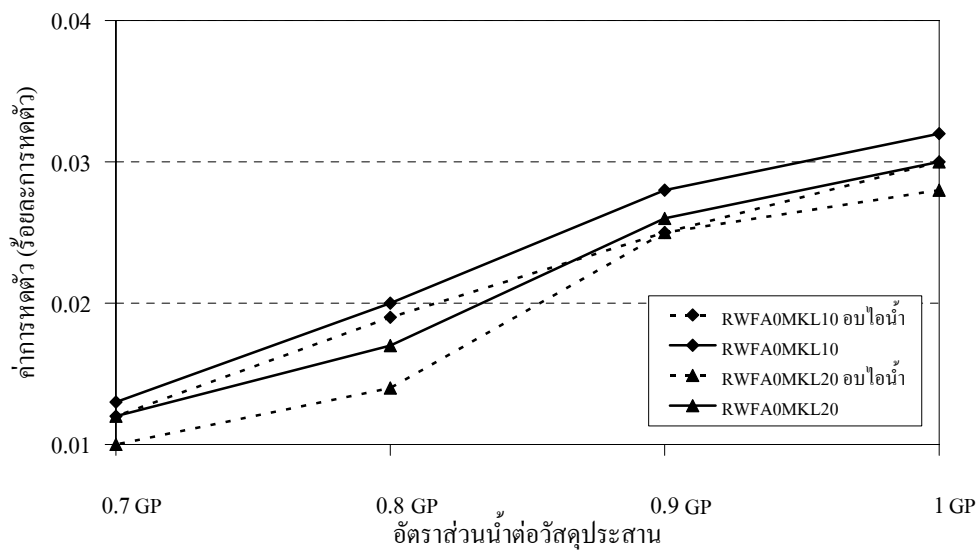


(ข)

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL10 และ RWFA10MKL20 (ข) RWFA20MKL10 และ RWFA20MKL20



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าการหดตัวระหว่างยิปซัมเพสต์ที่บ่มโดยการอบไอน้ำกับบ่มที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน แต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL10 และ RWFA30MKL20 (ข) RWFA0MKL10 และ RWFA0MKL20

4.5 กำลังอัดของยิปซัมเพสต์

ผลการทดสอบกำลังอัดยิปซัมเพสต์โดยแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 กับ 10 และ 20 ที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วันและอบไอน้ำแรงดันต่ำ ดังตารางที่ 4.7-4.9 และรูปที่ 4.12-4.18 กำลังอัดของยิปซัมเพสต์จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลัก 4 ประการคืออัตราส่วนเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรที่แทนที่ในยิปซัมเพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน วิธีการบ่ม และ ความหนาแน่น นอกจากองค์ประกอบทั้งสี่นี้จะส่งผลอย่างมากต่อ กำลังอัดแล้วยังส่งผลต่อคุณลักษณะอื่นๆ เช่น ความหนาแน่นแห้ง การดูดกลืนน้ำ การหดตัว และ สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง

4.5.1 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัด

หากพิจารณาผลของกำลังอัดของยิปซัมเพสต์ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้วพบว่า ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในทุกอัตราส่วนผสม ในการทดลองครั้งนี้พบว่ายิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อายุบ่ม 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 12.15 เมกะพาสคัล ดังรูปที่ 4.12 สาเหตุอาจเป็นเพราะความแข็งแรงของยิปซัมเพสต์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างยิปซัมเทียมกับน้ำ โดยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรเป็นวัสดุเนื้อหยาบ ทำให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุผสมทั้งสองในยิปซัมเพสต์ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง โดยที่อายุบ่ม 28 วันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP การแทนที่ด้วยดินขาวแปรร้อยละ 10 และ 20 ยิปซัมเพสต์มีค่ากำลังอัด 7.89 และ 6.31 เมกะพาสคัลดังรูปที่ 4.13(ก) และ 4.13(ข) แต่เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 และ 20 ยิปซัมเพสต์มีค่ากำลังอัด 4.15 และ 1.98 เมกะพาสคัลดังรูปที่ 4.17(ข) และ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของยิปซัมเพสต์ระหว่างแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารากับดินขาวแปรพบว่า การแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราจะทำให้กำลังอัดลดลงมากกว่าการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยดินขาวแปรในปริมาณที่เท่ากัน ถึงแม้ว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 41.19 ก็ตาม แต่ก็ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะเถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นวัสดุเนื้อหยาบ ในอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูงลักษณะคล้ายฟองน้ำ ทำให้เมื่อนำเถ้าลอยไม้ยางพารามาแทนที่ในยิปซัมเพสต์กำลังอัดจึงลดลง ซึ่งต่างกับดินขาวแปรที่มีลักษณะกลมและความพรุนต่ำเป็นวัสดุผสมในยิปซัมเพสต์ที่ให้กำลังได้ดีกว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา สอดคล้องกับที่อาบีเด็งและคณพล

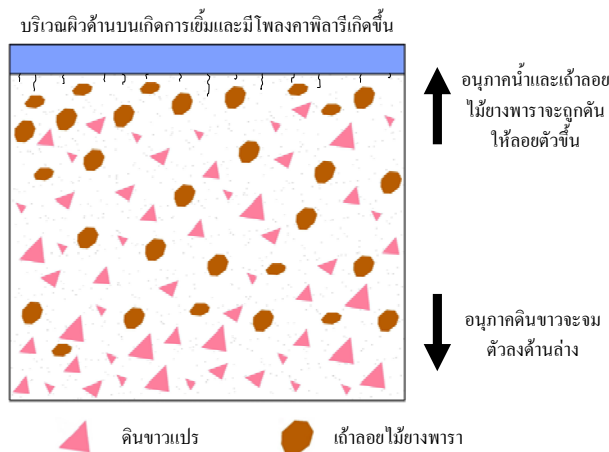
(2551) ได้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตหินพัมมิชแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา พบว่าเมื่ออัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มมากขึ้นกำลังของคอนกรีตลดลง

อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง โดยสังเกตได้จากเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรมากขึ้นค่ากำลังอัดกลับยิ่งลดลง โดยที่อายุบ่ม 28 วันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP ยิปซัมเพสต์ที่มีเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรเป็นส่วนประกอบสูงเช่น RWFA20KL20, RWFA30KL10 และ RWFA30KL20 มีค่ากำลังอัด 1.68, 1.41 และ 1.14 เมกะพาสคัล ลดลงร้อยละ 88.4, 90.6 และ 93.5 ของค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า กำลังอัดของยิปซัมเพสต์จากการทดลองในครั้งนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจากยิปซัมเทียมเพียงอย่างเดียว หรืออาจกล่าวได้ว่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของยิปซัมเทียม แต่อย่างไรก็ตามในการเติมดินขาวเข้าไปนั้นอาจช่วยให้ความคงทนสูงขึ้นก็ได้ ซึ่งได้เคยมีรายงานในผลวิจัยของ Siddique and Klaus (2009)

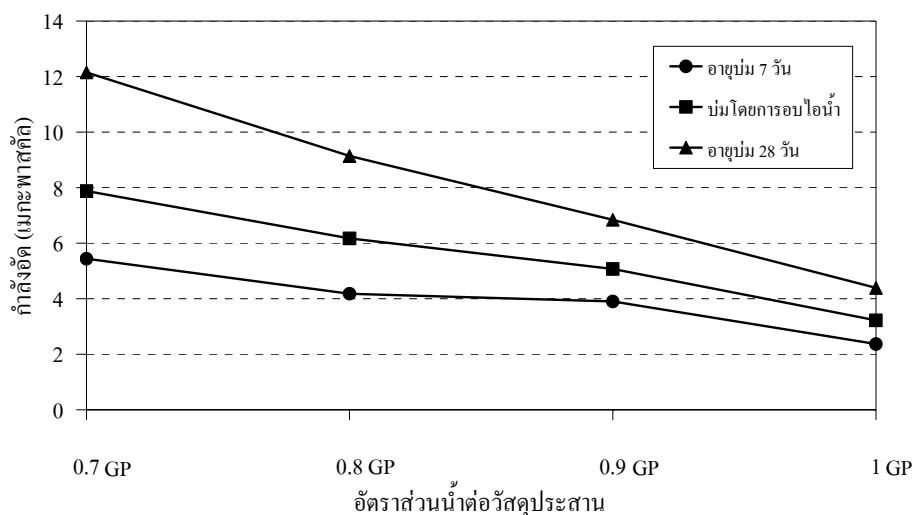
4.5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด

ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ในทุกอัตราส่วนผสมเมื่อทำการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง ทำให้ยิปซัมเพสต์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณน้ำที่ลดลง สังเกตได้จากกำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และอบไอน้ำ จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 1.0GP จนถึง 0.7GP โดยสามารถเพิ่มกำลังอัดให้ยิปซัมเพสต์อีกประมาณสองเท่า ซึ่งหากทำการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงเหลือ 0.6GP คาดว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นอีก ในทางกลับกันหากเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะทำให้ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดลดลง โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ยิปซัมเพสต์จะเกิดโพรงรูเล็กขึ้นบริเวณผิวด้านบน นอกจากนี้เถ้าลอยไม้ยางพาราที่มีน้ำหนักเบาจะลอยขึ้นสู่ผิวด้านบนและดินขาวแปรที่หนักกว่าจะจมลงสู่ด้านล่าง เกิดการแยกตัวขึ้นที่ผิว ทำให้วัสดุประสานเกิดการแยกตัวขึ้นในขณะที่ยิปซัมเพสต์เริ่มแข็งตัวดังรูปที่ 4.11 ทั้งสองนี้เป็นประเด็นสำคัญทำให้กำลังอัดยิปซัมเพสต์ลดลงเมื่อปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงเป็นการลดปริมาณน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งแทรกตัวอยู่ในยิปซัมเพสต์ น้ำเหล่านี้เมื่อระเหยออกไปทำให้ยิปซัมเพสต์เกิดช่องว่างขนาดเล็กที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ นอกจากนี้การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทำให้วัสดุประสานสามารถอัดตัวชิดกันมากขึ้น สามารถกระจายกำลังยึดเหนี่ยว (bonding strength) ระหว่างอนุภาคได้ดี ส่งผล

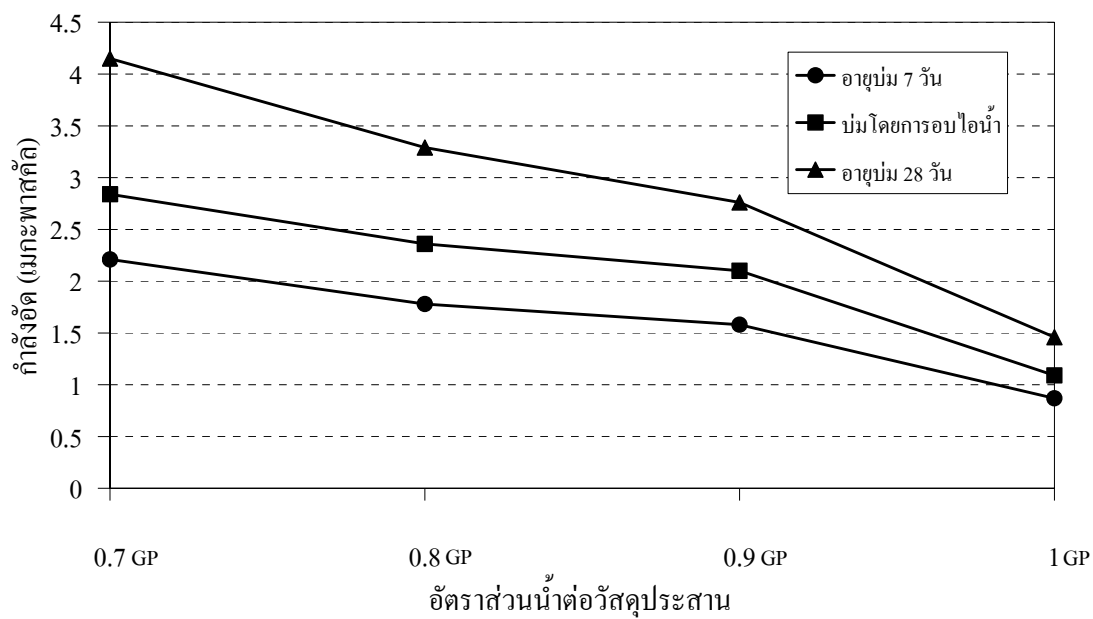
ให้กำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านเทคโนโลยีคอนกรีตที่ผ่านมา ซึ่งการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหล่อต้องเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและเคลือบผิวอนุภาคเพื่อให้เกิดการหล่อลื่นระหว่างอนุภาคส่งผลให้ในคอนกรีตมีช่องว่างน้อยที่สุด แต่ถ้าคอนกรีตมีการผสมเถ้าลอยซึ่งส่วนใหญ่อนุภาคมีความพรุนสูงเถ้าลอยเหล่านี้จะมีการดูดน้ำเข้ามาเก็บไว้ที่ภายในอนุภาคทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้น



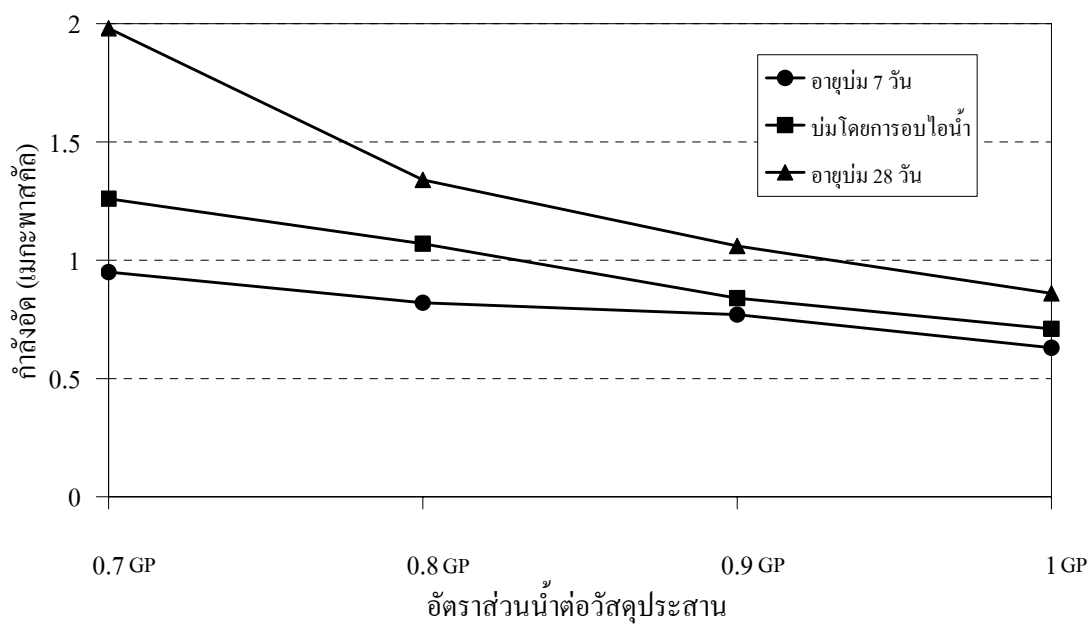
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมยิปซัมเพสต์เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วน

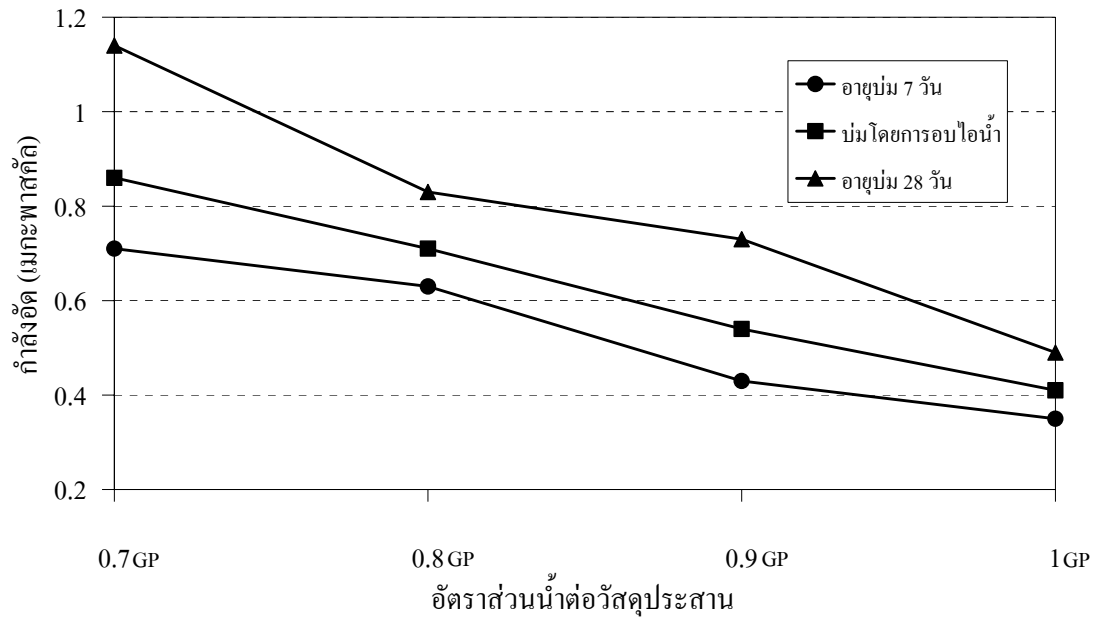


(ก)

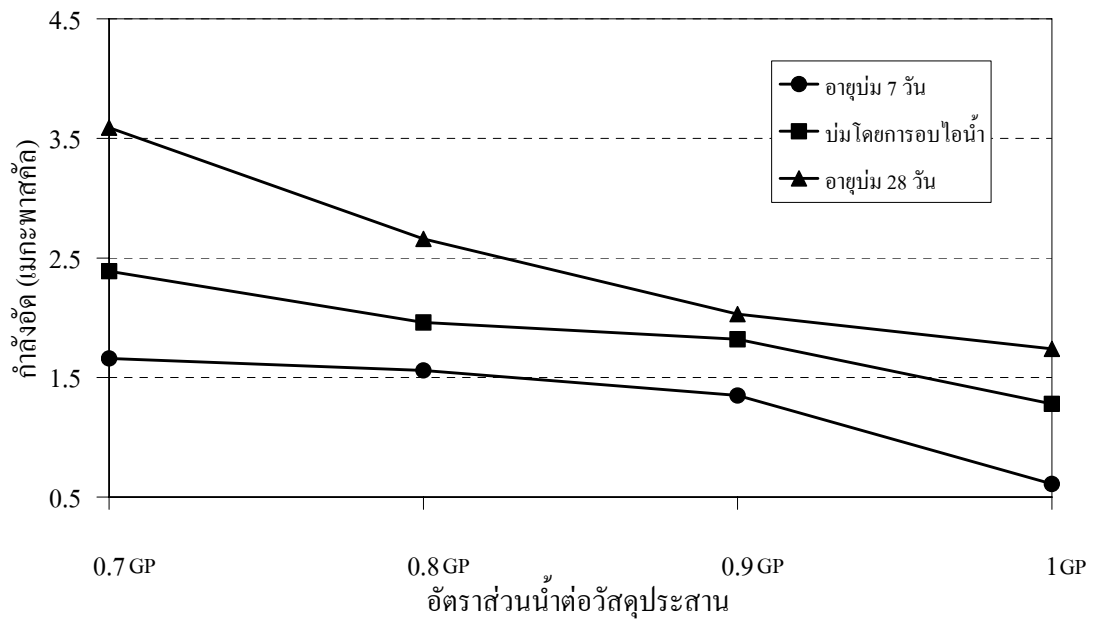


(ข)

รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่าล้างอัดยิปซัม
 เฟสค์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL0 (ข) RWFA20MKL0

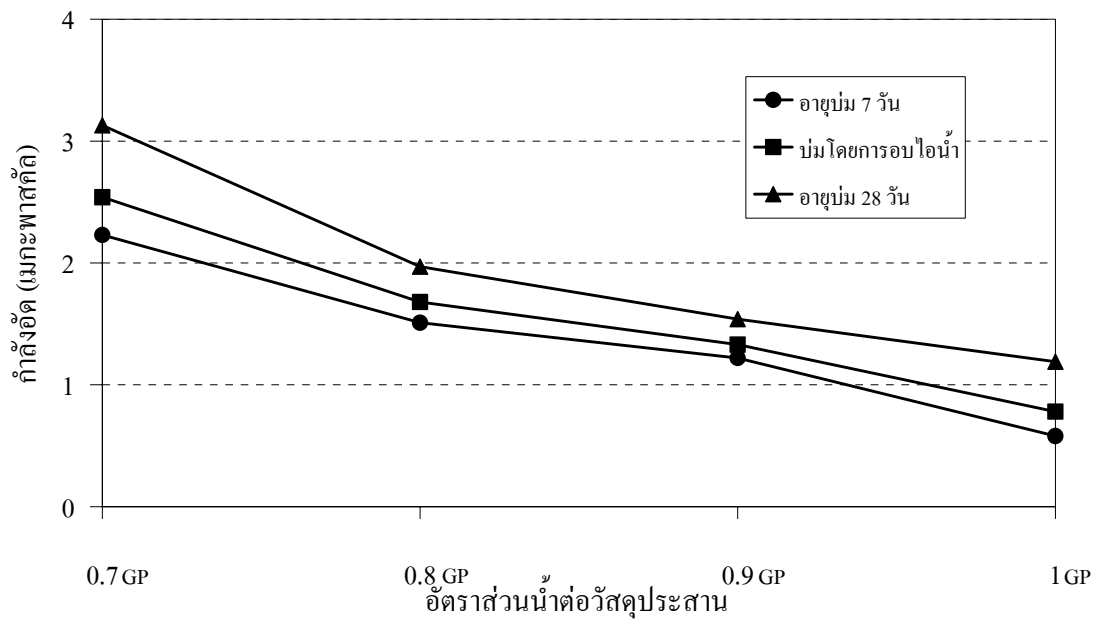


(ก)

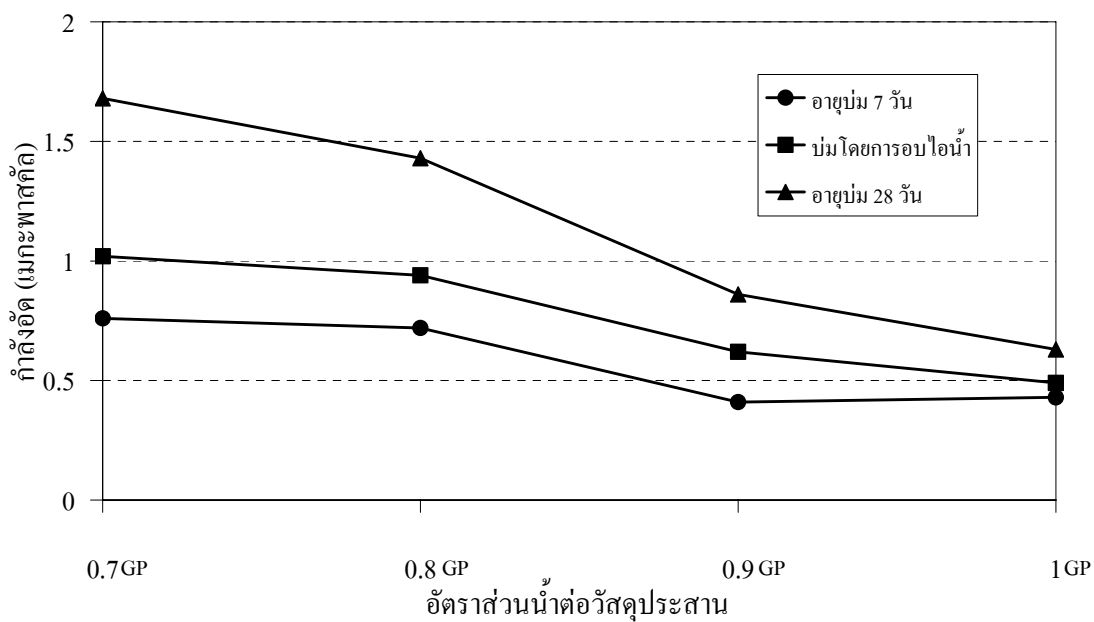


(ข)

รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่าล้างอัดยิปซัม
 เฟสค์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL0 (ข) RWFA10MKL10

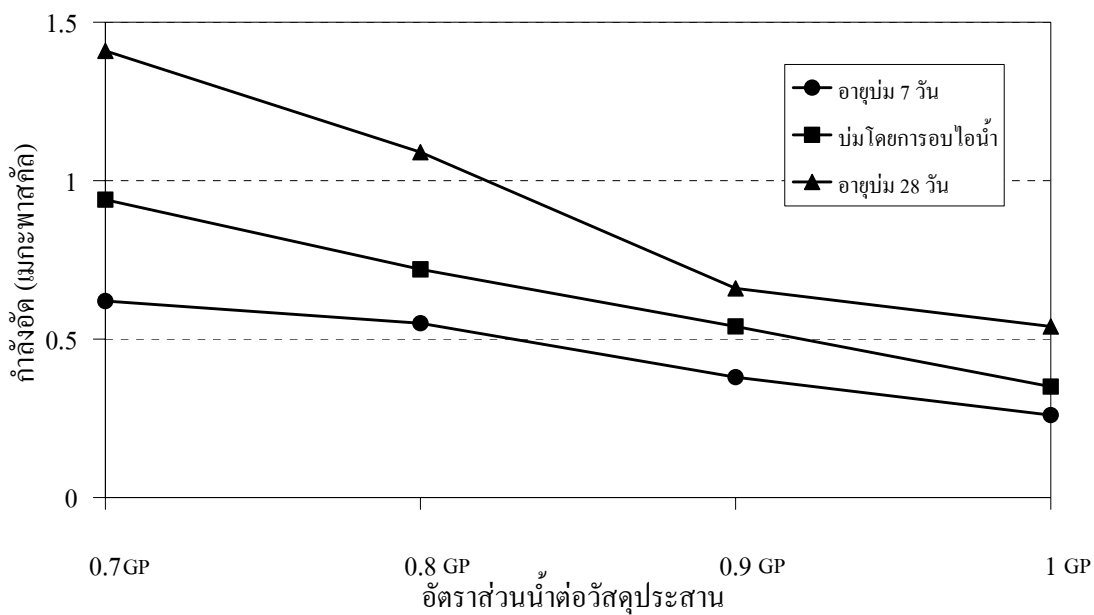


(ก)

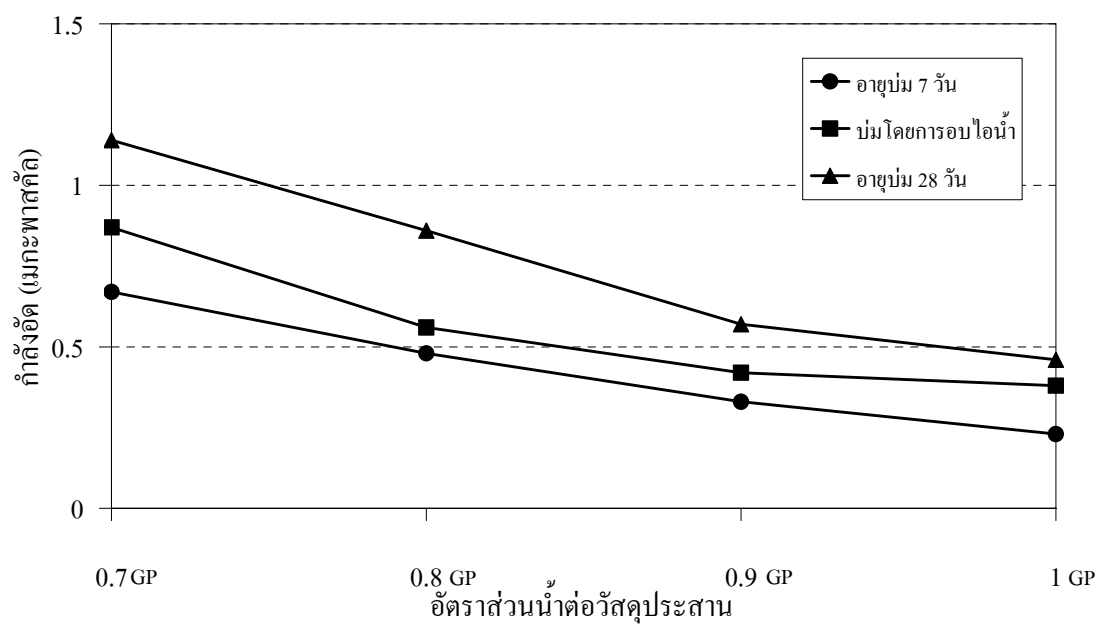


(ข)

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่าค่าค้างอึดยิปซัม
 เฟสค์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA10MKL20 (ข) RWFA20MKL10

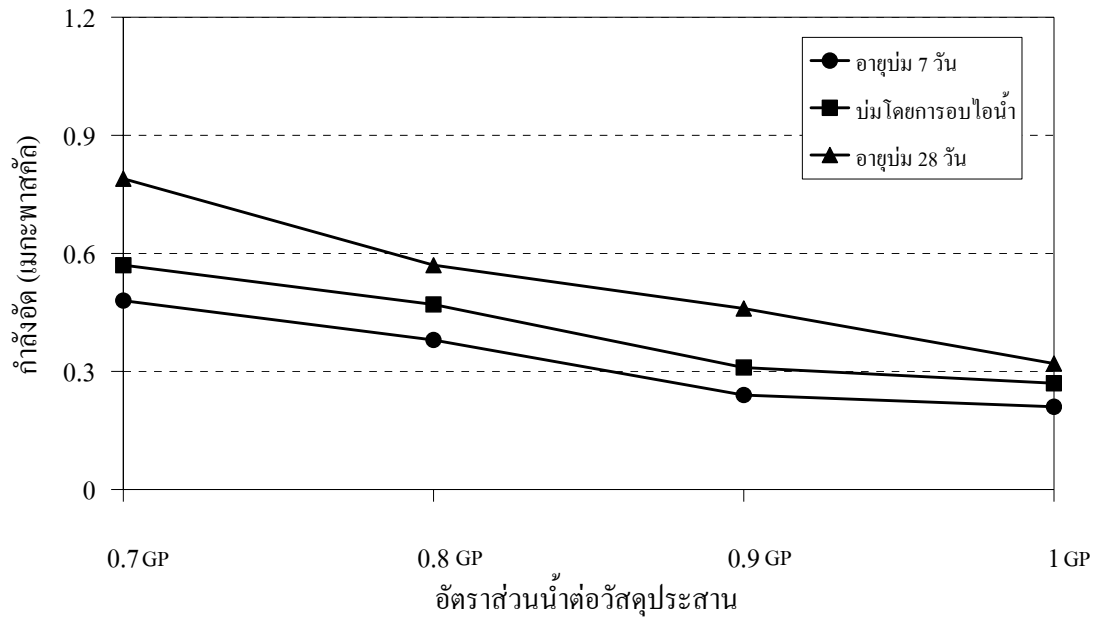


(ก)

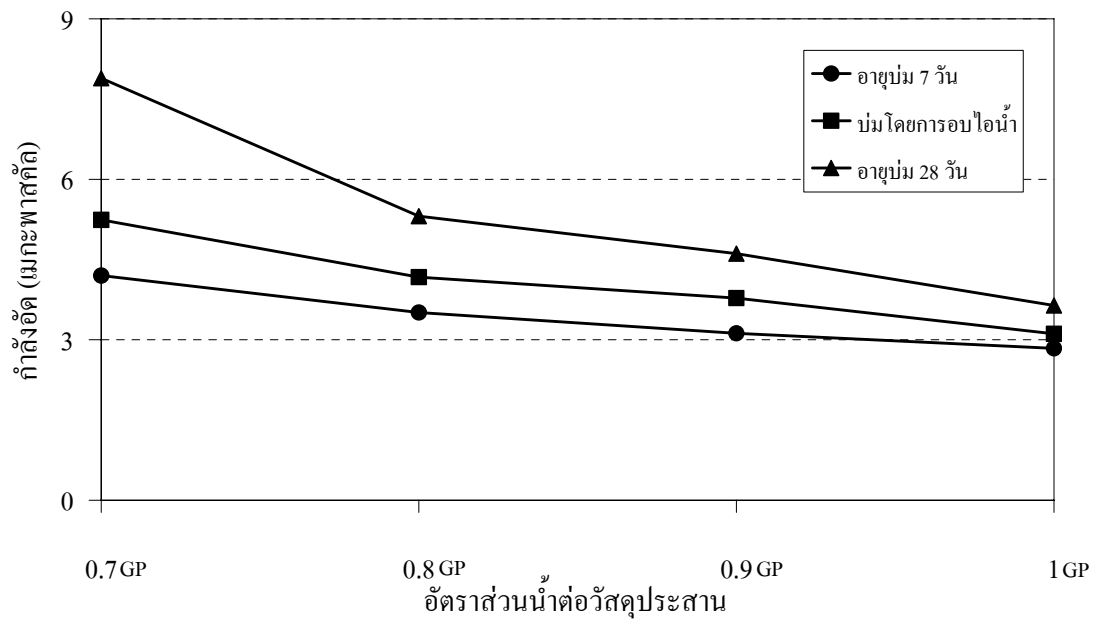


(ข)

รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัม
 เฟสค์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA20MKL20 (ข) RWFA30MKL10

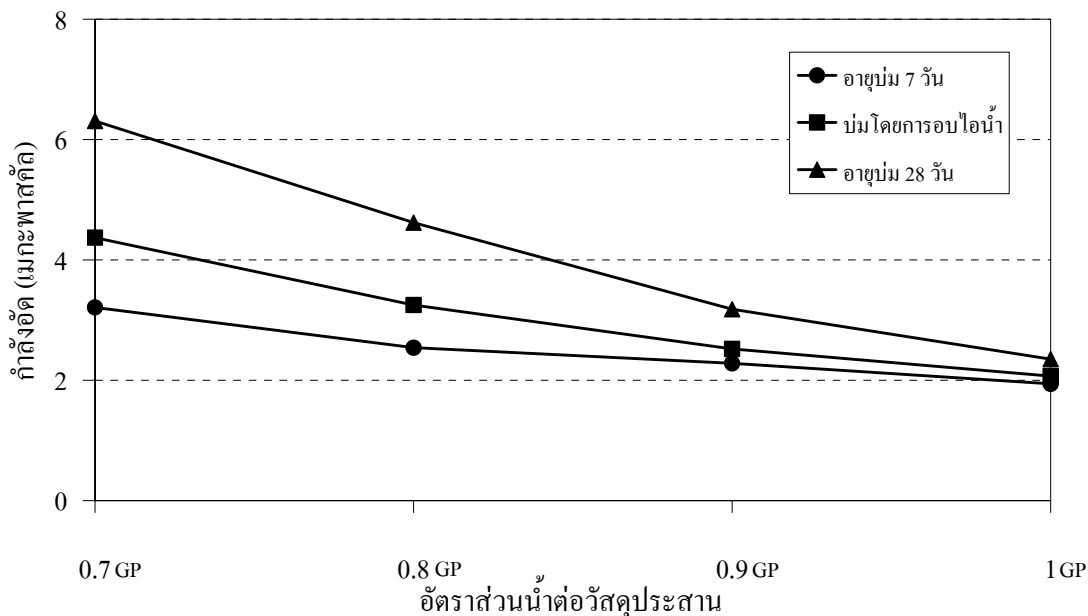


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัม
 เฟสค์ที่ส่วนผสม (ก) RWFA30MKL20 (ข) RWFA0MKL10



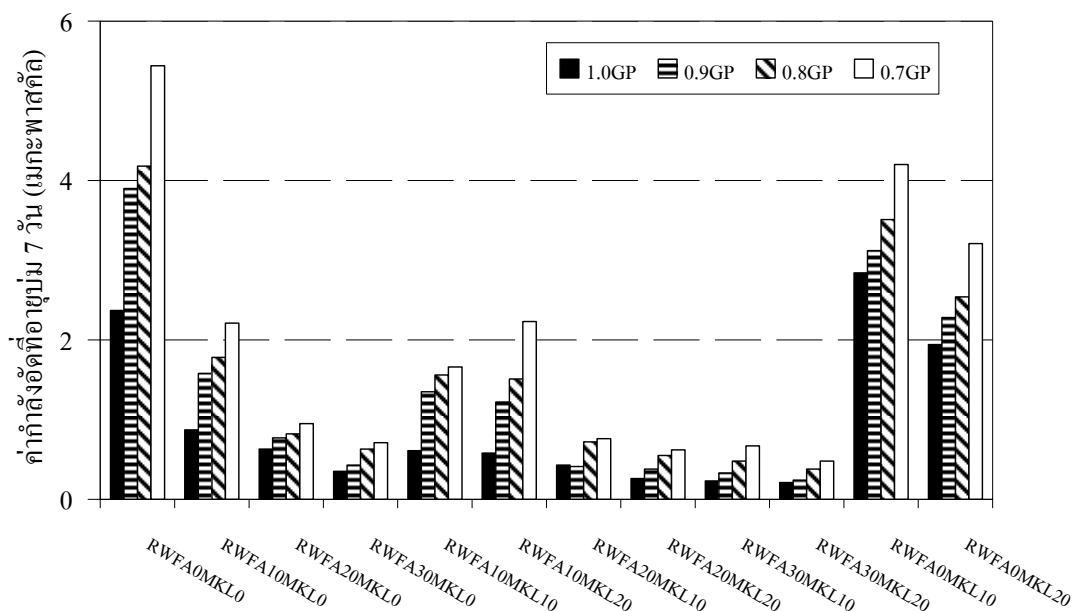
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและวิธีการบ่มที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดยิปซัมเฟสท์ที่ส่วนผสม RWFA0MKL20

4.5.3 ผลกระทบของอายุบ่มต่อกำลังอัด

นอกจากอัตราส่วนผสมของยิปซัมเฟสท์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว การบ่มก็เป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดยิปซัมเฟสท์ หลังจากยิปซัมเฟสท์แข็งตัว ปฏิกริยาไฮเดรชันในยิปซัมเทียมก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ต่อเนื่อง โดยปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วัน ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ยิปซัมเฟสท์มีกำลังอัดที่สูงขึ้นประมาณ 1.8 เท่าของกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งให้เห็นว่าอิทธิพลของอายุบ่มมีผลอย่างมากต่อกำลังอัด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานของ Tzouvalas et al. (2004) ที่กำลังอัดของคอนกรีตผสมยิปซัมเทียม ที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 1, 2 และ 7 วัน การบ่มยิปซัมเฟสท์จึงไม่มีความจำเป็นต้องนำไปแช่ในน้ำ เพราะปริมาณน้ำต่อยิปซัมเทียมที่ให้ในการหล่อยิปซัมเฟสท์มีปริมาณมากพอที่จะใช้ในการบ่ม โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 28 วัน ยิปซัมเฟสท์มีปริมาณน้ำเหลือในก้อนคอนกรีตประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้การใช้ไอน้ำแรงดันต่ำ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.21 สามารถเพิ่มกำลังให้กับยิปซัมเฟสท์ได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยไอน้ำได้เข้าไปกระตุ้นปฏิกริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่ากำลังอัดบ่มด้วยวิธีการใช้ไอน้ำแรงดันต่ำมีค่าสูงขึ้น แต่ค่ากำลังอัดนี้ก็ต่ำกว่าหากเมื่อเปรียบเทียบกับการ

บ่มที่อายุ 28 วัน ยืนยันจากผลวิจัยของ Liu et al.(2005) พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยบดไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าบ่มโดยการแช่น้ำที่อายุ 28 วัน

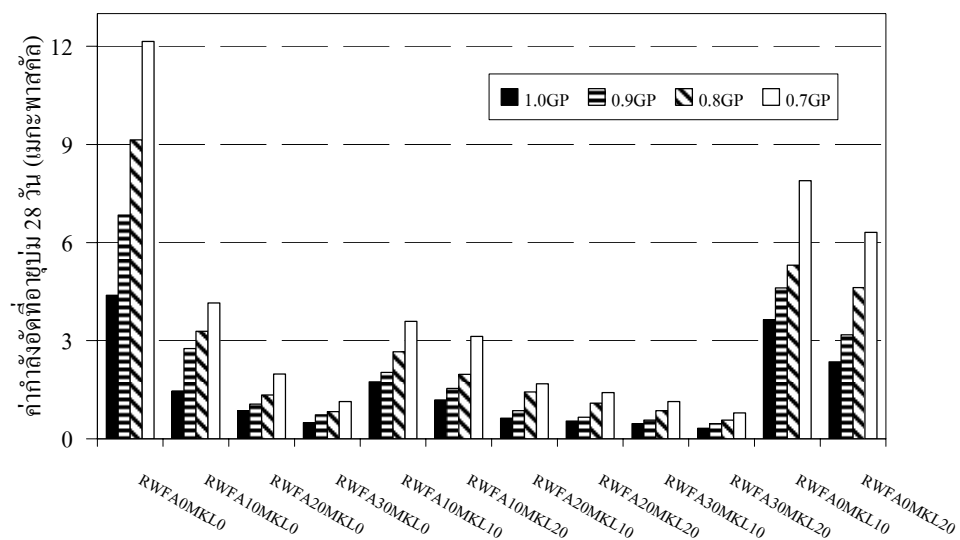
เมื่อแทนที่เถ้าลอยไม่ย่างพาราในยิปซัมเพสต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัด 12.15, 4.15, 1.98 และ 1.14 เมกะพาสคัลตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันมีค่ากำลังอัด 5.44, 2.21, 0.95 และ 0.71 เมกะพาสคัลตามลำดับ พบว่ามีความสอดคล้องกับกำลังอัดของยิปซัมเพสต์แทนที่ด้วยดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ร้อยละ 10 และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัด 7.89 และ 6.31 เมกะพาสคัลตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันมีค่ากำลังอัด 4.20 และ 3.21 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการบ่มแล้ว ยิปซัมเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยจะมีกำลังอัดสูงกว่ายิปซัมเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก ซึ่งให้เห็นผลกระทบของการดูดกลืนน้ำในยิปซัมเพสต์ ซึ่งค่าการดูดกลืนน้ำจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสมหรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณช่องว่างในยิปซัมเพสต์จะมีมากตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ส่งผลอย่างมากต่อการยับยั้งการพัฒนากำลังอัดซึ่งเกิดจากระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 7 วัน

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 7 วัน

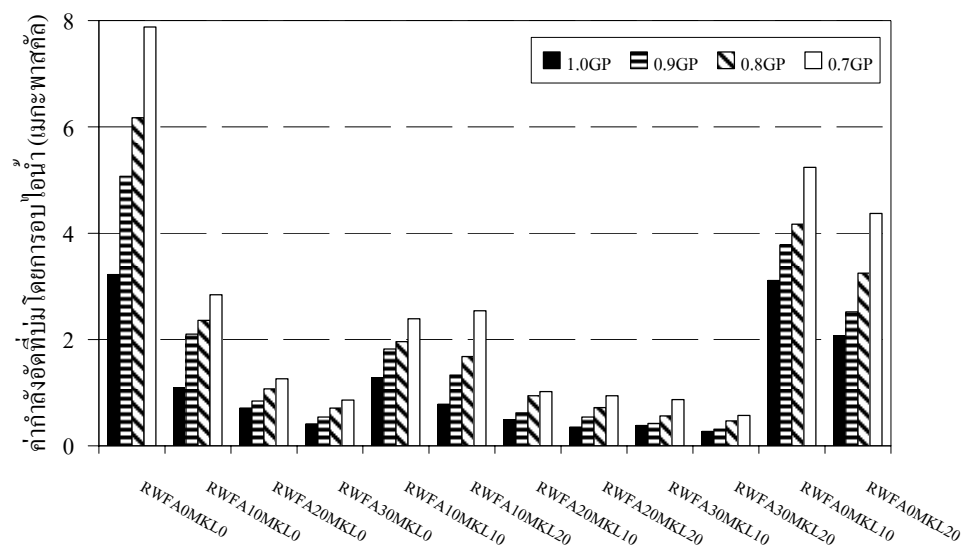
สัญลักษณ์	กำลังอัดยิปซัมเพสต์ (เมกะพาสคัล)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	2.37	3.9	4.18	5.44
RWFA10MKL0	0.87	1.58	1.78	2.21
RWFA20MKL0	0.63	0.77	0.82	0.95
RWFA30MKL0	0.35	0.43	0.63	0.71
RWFA10MKL10	0.61	1.35	1.56	1.66
RWFA10MKL20	0.58	1.22	1.51	2.23
RWFA20MKL10	0.43	0.41	0.72	0.76
RWFA20MKL20	0.26	0.38	0.55	0.62
RWFA30MKL10	0.23	0.33	0.48	0.67
RWFA30MKL20	0.21	0.24	0.38	0.48
RWFA0MKL10	2.84	3.12	3.51	4.2
RWFA0MKL20	1.94	2.28	2.54	3.21



รูปที่ 4.20 กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

สัญลักษณ์	กำลังอัดยิปซัมเพสต์ (เมกะพาสคัล)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	4.39	6.84	9.14	12.15
RWFA10MKL0	1.46	2.76	3.29	4.15
RWFA20MKL0	0.86	1.06	1.34	1.98
RWFA30MKL0	0.49	0.73	0.83	1.14
RWFA10MKL10	1.74	2.03	2.66	3.59
RWFA10MKL20	1.19	1.54	1.97	3.13
RWFA20MKL10	0.63	0.86	1.43	1.68
RWFA20MKL20	0.54	0.66	1.09	1.41
RWFA30MKL10	0.46	0.57	0.86	1.14
RWFA30MKL20	0.32	0.46	0.57	0.79
RWFA0MKL10	3.64	4.61	5.31	7.89
RWFA0MKL20	2.35	3.18	4.62	6.31



รูปที่ 4.21 กำลังอัดยิปซัมเพสต์ทุกอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่บ่มโดยการอบไอน้ำแรงดันต่ำ

ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อบไอน้ำแรงดันต่ำ

สัญลักษณ์	กำลังอัดยิปซัมเพสต์ (เมกะพาสคัล)			
	1.0GP	0.9GP	0.8GP	0.7GP
RWFA0MKL0	3.22	5.07	6.17	7.88
RWFA10MKL0	1.09	2.1	2.36	2.84
RWFA20MKL0	0.71	0.84	1.07	1.26
RWFA30MKL0	0.41	0.54	0.71	0.86
RWFA10MKL10	1.28	1.82	1.96	2.39
RWFA10MKL20	0.78	1.33	1.68	2.54
RWFA20MKL10	0.49	0.62	0.94	1.02
RWFA20MKL20	0.35	0.54	0.72	0.94
RWFA30MKL10	0.38	0.42	0.56	0.87
RWFA30MKL20	0.27	0.31	0.47	0.57
RWFA0MKL10	3.11	3.78	4.17	5.24
RWFA0MKL20	2.07	2.52	3.25	4.37

4.5.4 ผลกระทบของความหนาแน่นต่อกำลังอัด

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วันดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลมีความสัมพันธ์ดังสมการ 5.1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.762

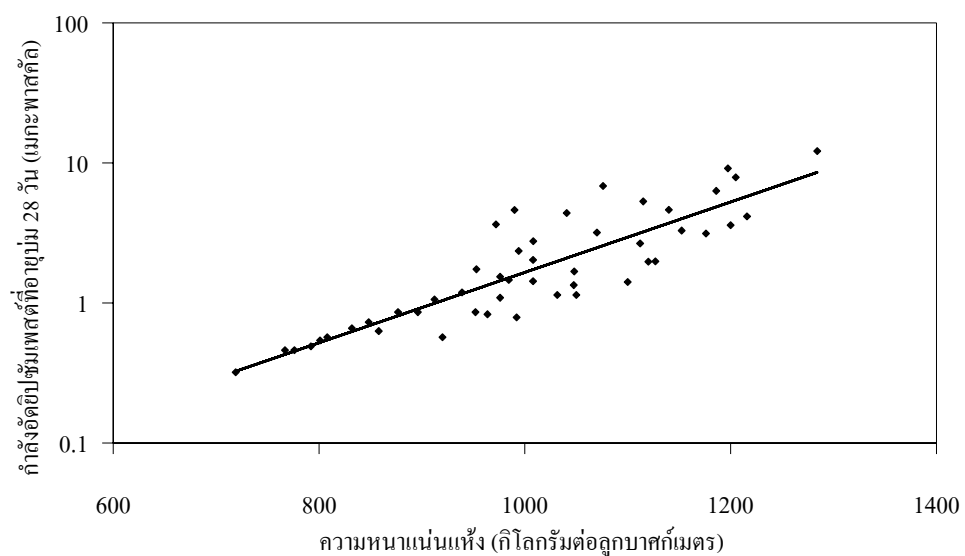
$$y = 0.0051e^{0.0058x} \quad (5.1)$$

เมื่อ x คือ ความหนาแน่นแห้งยิปซัมเพสต์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

y คือ กำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน (เมกะพาสคัล)

ค่าความหนาแน่นแห้งจะแปรผันกับกำลังอัด ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อายุบ่ม 28 วัน จะมีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นแห้ง 12.15 เมกะพาสคัล และ 1,284 กิโลกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร เช่นเดียวกับยิปซัมเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรร้อยละ 30 และ 20 ที่อายุบ่ม 28 วัน จะมีค่ากำลังอัดและความหนาแน่นแห้ง 0.32 เมกะพาสคัล และ 719 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งสองส่วนผสมนี้ต่างก็ให้ค่ากำลังอัดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดและต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลวิจัยของ Jones and McCarthy (2005) พบว่าเมื่อความหนาแน่นคอนกรีตพูนจากเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจาก 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นจาก 10 เมกะพาสคัลเป็น 15 เมกะพาสคัล

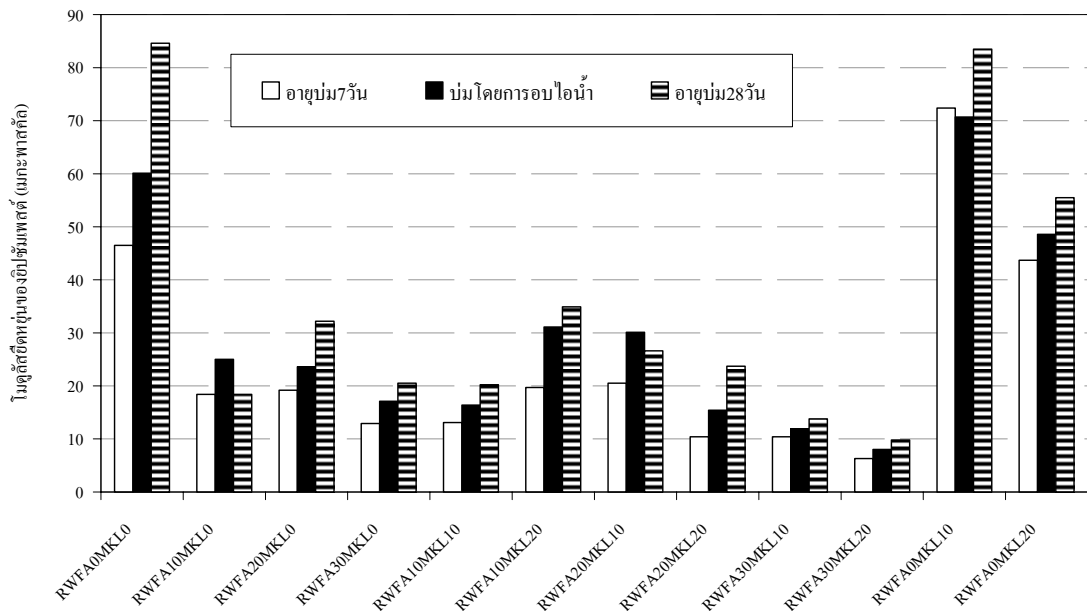


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดยิปซัมเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วันต่อค่าความหนาแน่นแห้ง

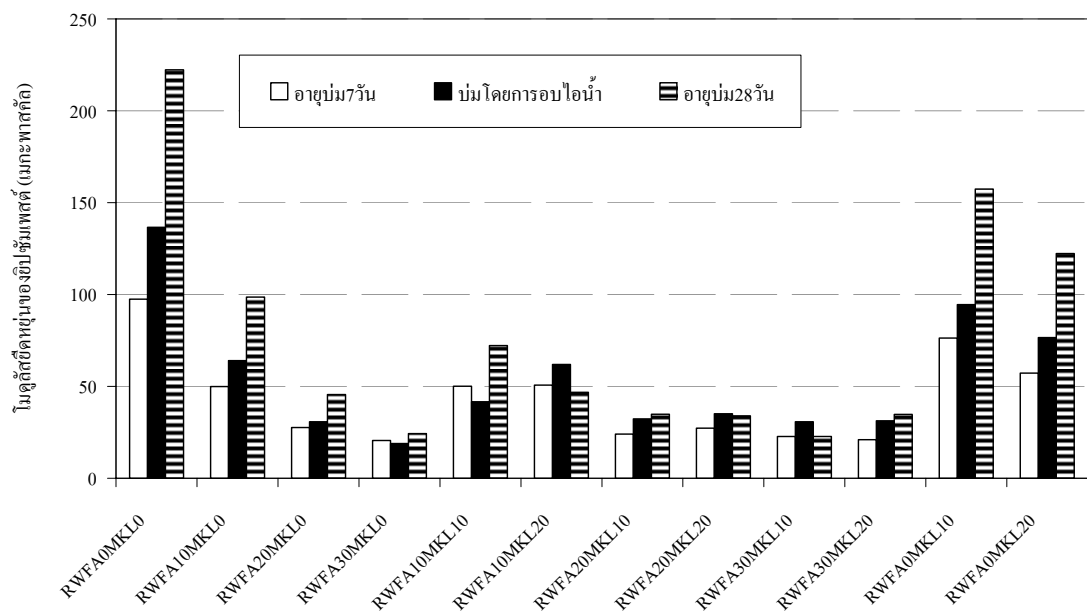
4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มสอดคล้องกับกำลังอัดของยิปซัมเพสต์ หากยิปซัมเพสต์มีกำลังสูงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นก็จะมีค่าสูงเช่นกัน ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้คือ ปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน วิธีการบ่ม และความหนาแน่นแห้ง จากรูปที่ 4.23-4.24 แสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของยิปซัมเพสต์มีค่าสูงจะส่งผลให้ยิปซัมเพสต์มีความแข็ง ซึ่งการพิบัติของยิปซัมเพสต์ที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะเกิดการพิบัติแบบเฉือน (shear failure) มุมพิบัติทำมุม 45 องศากับระนาบ ดังรูปที่ 4.25(ก) การแตกหักในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับยิปซัมเพสต์ที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า 100 เมกะพาสคัล ในทางกลับกัน ยิปซัมเพสต์ที่มีค่ากำลังอัดต่ำจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำเช่นกัน ส่งผลให้ยิปซัมเพสต์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เกิดการพิบัติแบบแยกออก (splitting failure) ก้อนยิปซัมเพสต์จะแตกตามแนวตรงใน

ลักษณะแยกออกจากกันด้วยแรงดึงในแนวราบดังรูปที่ 4.25(ข) การพิบัติในลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับชิปซัมเพสต์ที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่า 60 เมกะพาสคัล

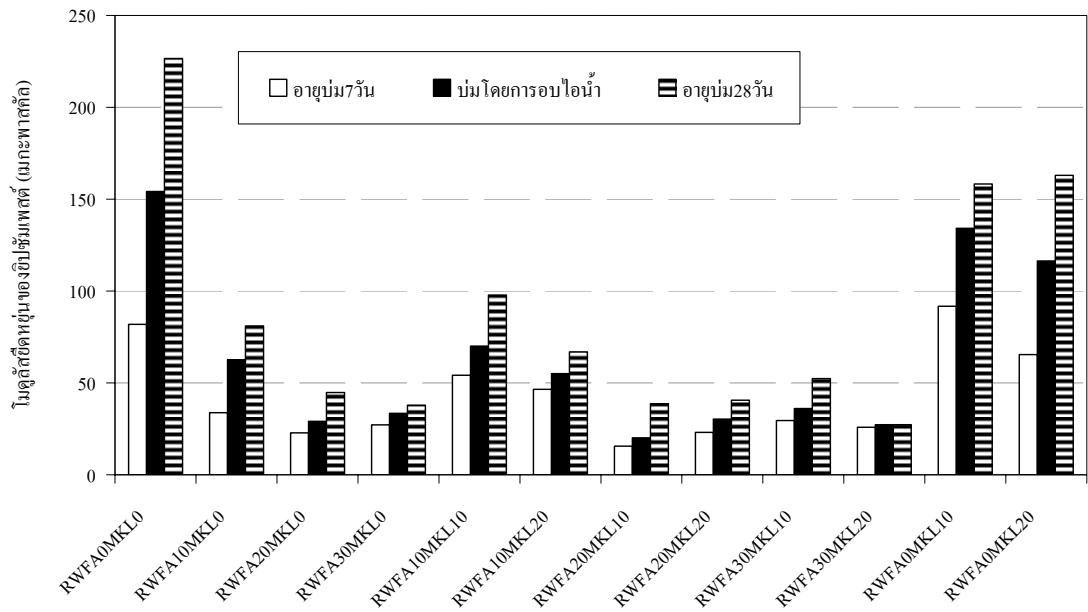


(ก)

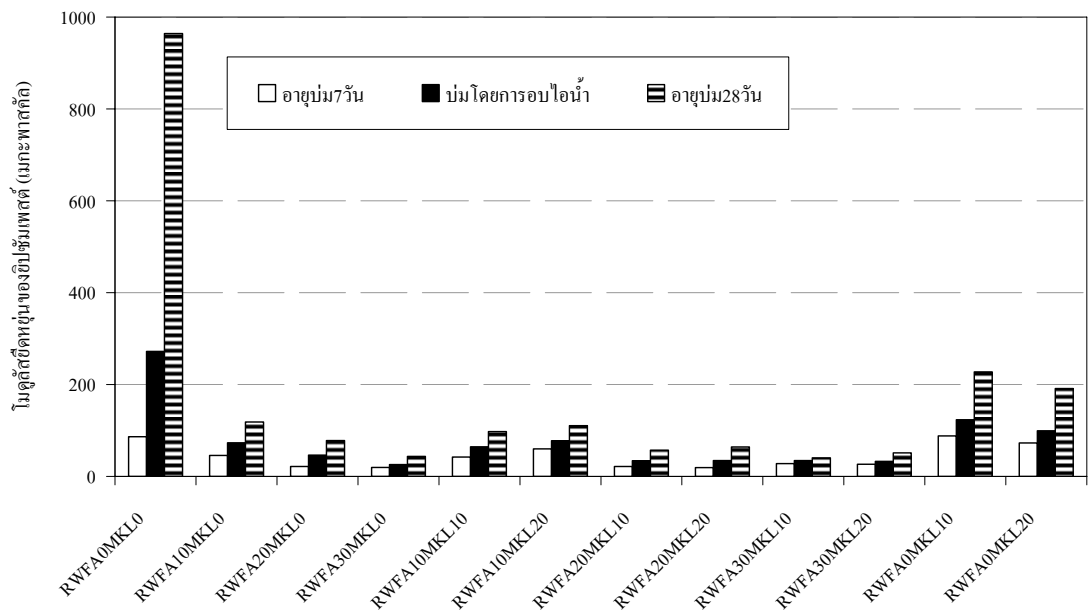


(ข)

รูปที่ 4.23 โมดูลัสยืดหยุ่นของชิปซัมเพสต์ทุกส่วนผสม (ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP
(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.9GP



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 โมดูลัสยึดหยุ่นของขี้ปซัมเพสต์ทุกส่วนผสม (ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8GP (ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.25 การบีบอัดของยิปซัมเพสต์ (ก) บีบอัดแบบเนียน (ข) บีบอัดแบบแยกออก

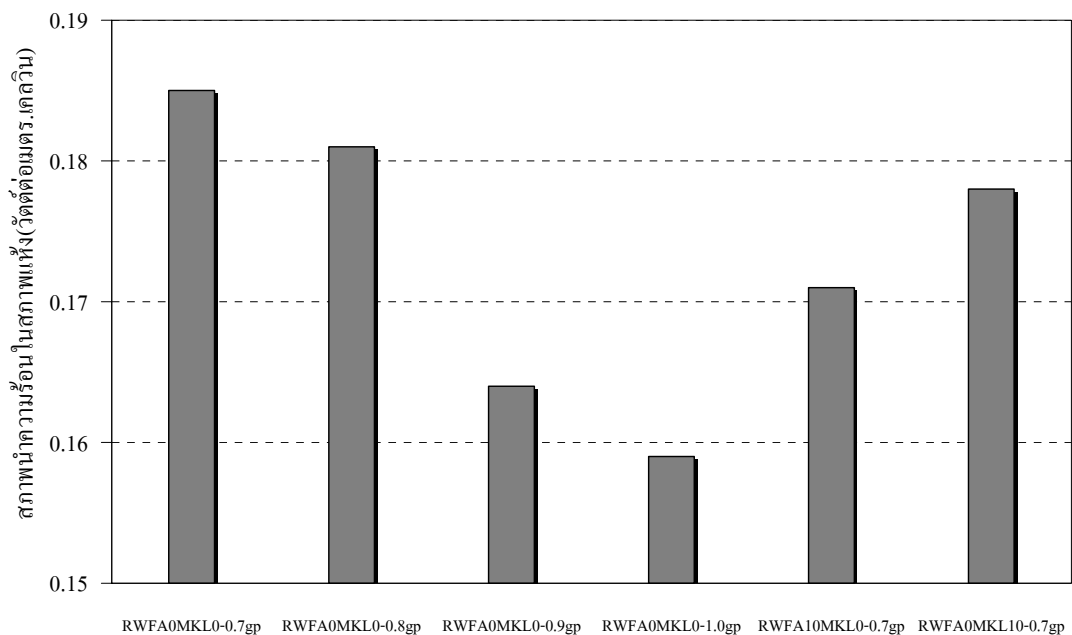
4.7 สภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง

ผลการวัดสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0GP, 0.9GP, 0.8GP และ 0.7GP ที่อายุบ่ม 28 วัน ดังตารางที่ 4.10 ยิปซัมเพสต์มีค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง 0.159, 0.164, 0.181 และ 0.185 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ตามลำดับ จากผลการทดลองทำให้สังเกตได้ว่าการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทำให้สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณน้ำที่ลดลงจะไปเพิ่มความหนาแน่นและลดช่องว่างของยิปซัมเพสต์ เมื่อทำการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 7.0GP อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง 0.171 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ดังรูปที่ 4.26 โดยเปรียบเทียบกับยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยยิปซัมเทียมล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP พบว่าการเติมเถ้าลอยไม้ยางพาราจะลดสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งลงร้อยละ 8.2 เพราะในอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูง การเพิ่มเถ้าลอยไม้ยางพาราก็เหมือนกับการเพิ่มช่องว่างในเนื้อยิปซัมเพสต์ ช่องว่างที่กระจายตัวในเนื้อยิปซัมเพสต์เหล่านี้จะไปลดการถ่ายเทความร้อน เพราะอากาศนำความร้อนได้น้อยกว่าคอนกรีตถึง 70 เท่า เมื่อทำการแทนที่ดินขาวแปรในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 7.0GP อายุบ่ม 28 วัน มีค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง 0.178 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน โดยเปรียบเทียบกับยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยยิปซัมเทียมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP พบว่าการเติมดินขาวแปรจะช่วยลดสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์ลงร้อยละ 3.9 ซึ่งเทียบเคียงกับผลงานวิจัยของ Cicok and Tanriverdi (2007) ที่ทำอิฐโดยใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยแล้วนำไปอบไอน้ำ พบว่ามีค่าสภาพนำความร้อน 0.34 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน จากที่กล่าวมาทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าปริมาณช่องว่างในยิปซัมเพสต์สัมพันธ์กับค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้ง หากพิจารณาปริมาณช่องว่างใน

ยิปซัมเพสต์ก็เปรียบเทียบได้กับค่าการดูดกลืนน้ำนั่นเอง ซึ่งหากต้องการลดสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและการใช้เถ้าลอยไม่ย่างพาราแทนที่ในยิปซัมเพสต์

ตารางที่ 4.10 ค่าสภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์

อัตราส่วนผสม	RWFA0 MKL0	RWFA0 MKL0	RWFA0 MKL0	RWFA0 MKL0	RWFA10 MKL0	RWFA0 MKL10
อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน	0.7GP	0.8GP	0.9GP	1.0GP	0.7GP	0.7GP
สภาพนำความร้อน ในสภาพแห้ง (วัตต์ ต่อเมตร.เคลวิน)	0.185	0.181	0.164	0.159	0.171	0.178



รูปที่ 4.26 สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม RWFA0MKL0-0.7 GP, RWFA0MKL0-0.8GP, RWFA0MKL0-0.9GP, RWFA0MKL0-1.0GP, RWFA10MKL0-0.7GP และ RWFA0MKL10-0.7GP

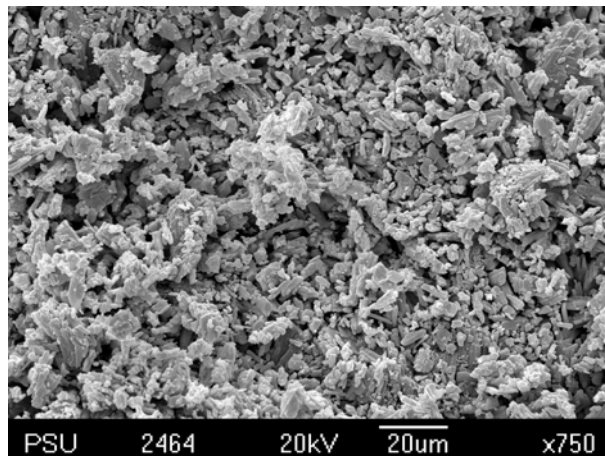
4.8 โครงสร้างจุลภาค

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของยิปซัมเพสต์โดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาลักษณะของเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรที่แทรกตัวในเนื้อยิปซัมเพสต์ และทำการเปรียบเทียบกับยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วน โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ทำให้กำลังอัดสูงสุดเพื่อทำการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่าง RWFA0KL0-0.7GP, RWFA10KL0-0.7GP และ RWFA0KL10-0.7GP ที่อายุบ่ม 28 วัน

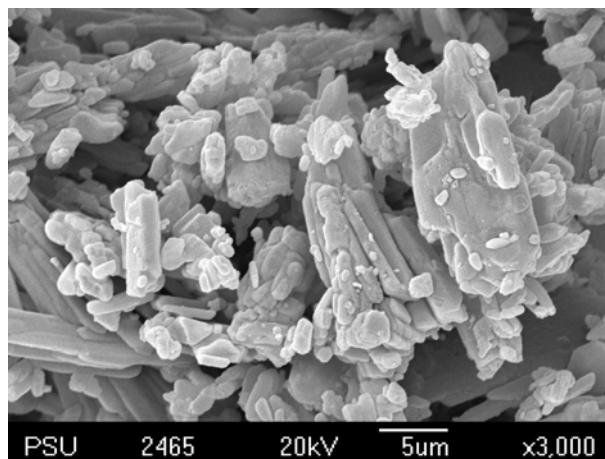
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วน พบว่ายิปซัมเทียมหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะรวมตัวกันเป็นแท่งผลึกแบนยาวเรียวยาวดังรูปที่ 4.27(ก) ลักษณะผลึกแท่งยิปซัมเทียมมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบดังรูปที่ 4.27(ข) หากพิจารณาภาพถ่ายจุลภาคที่กำลังขยาย 750 เท่าจะสังเกตเห็นเห็นช่องว่างขนาดเล็กระบายอยู่โดยทั่วไปภายในเนื้อยิปซัมเพสต์ดังรูปที่ 4.27(ก) ยิปซัมเทียมในยิปซัมเพสต์จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและชิดกันมาก ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงและมีการดูดกลืนน้ำต่ำ ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลอย่างมากต่อขนาดรูพรุนในเนื้อยิปซัมเพสต์ ดังเห็นได้จากค่าความพรุน ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับ Just and Middendorf (2009) ที่ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตพรุนกำลังสูง

ในส่วนของยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 750 เท่าดังรูปที่ 4.28(ก) พบว่าผลึกยิปซัมเทียมมีลักษณะเป็นแท่งผลึกแบนยาวเรียวยาวขนาดแท่งผลึกใหญ่กว่าแท่งผลึกของยิปซัมเพสต์ที่ไม่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา สามารถสังเกตเห็นอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารากระจายอยู่โดยทั่วไป นอกจากนี้ยังพบช่องว่างภายในเนื้อยิปซัมเพสต์กระจายตัวอยู่มาก และมีขนาดใหญ่หากเปรียบเทียบกับช่องว่างของยิปซัมเพสต์ที่ไม่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา หากสังเกตอนุภาคของเถ้าลอยไม้ยางพาราที่กำลังขยาย 3,000 เท่าดังรูปที่ 4.28(ข) พบว่าผลึกยิปซัมเทียมไม่ได้ประสานยึดติดกับผิวอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารา เพียงแต่อนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพาราเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผลึกยิปซัมเทียม ทำให้โครงสร้างยิปซัมเพสต์อ่อนแอ สอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำสูงขึ้นตามด้วย เพราะเถ้าลอยไม้ยางพาราทำให้ความตึงน้ำน้อยลง

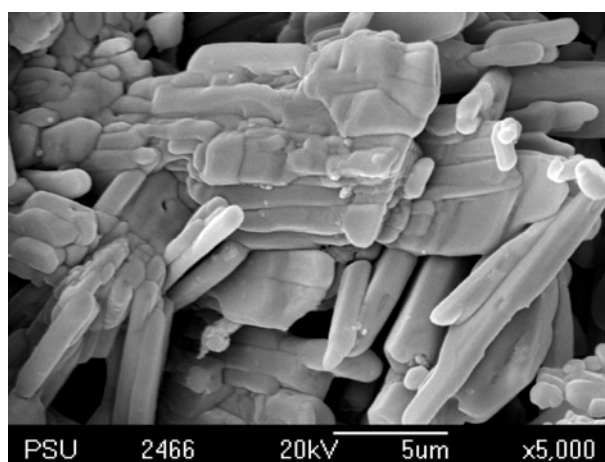
การแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่พบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และเอตตริงไกต์ (ettringite) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานที่บริเวณผิวอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารา ดังรูปที่ 4.28(ค) เนื่องจากเถ้าลอยไม้ยางพารามีอะลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนประกอบน้อยมากเพียงร้อยละ



(ก)

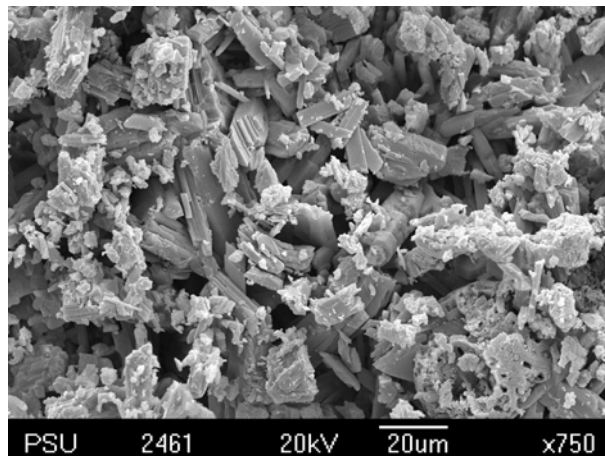


(ข)

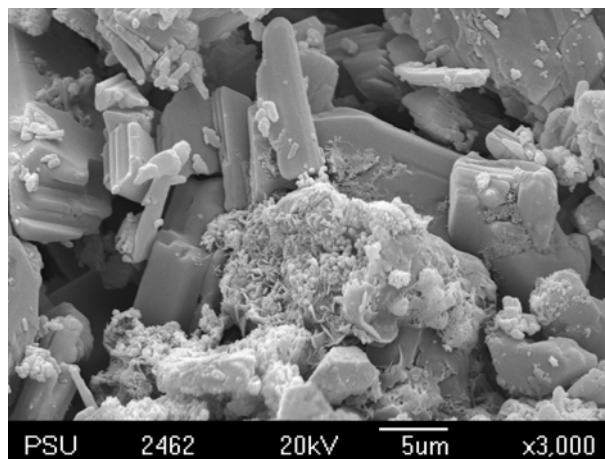


(ค)

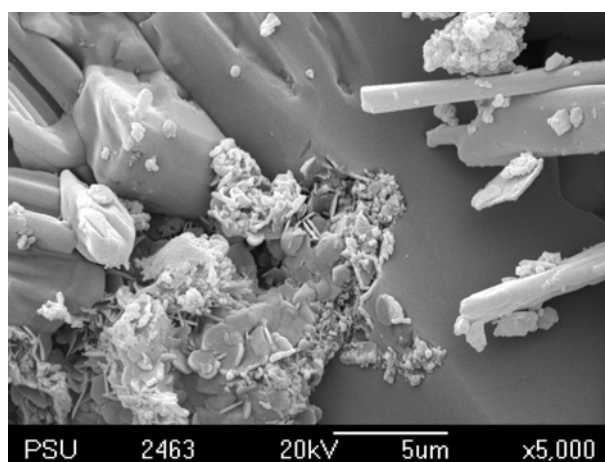
รูปที่ 4.27 ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก)



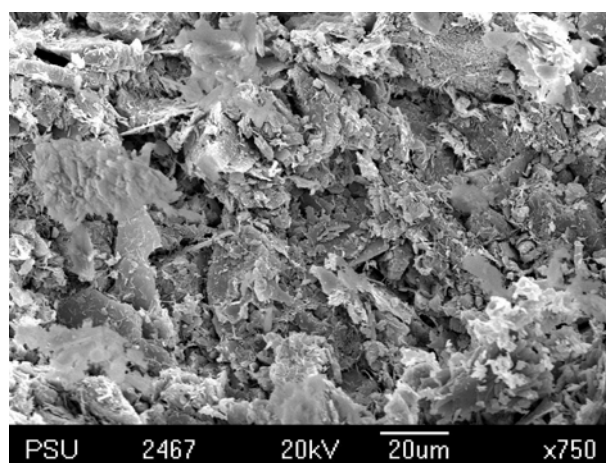
(ข)



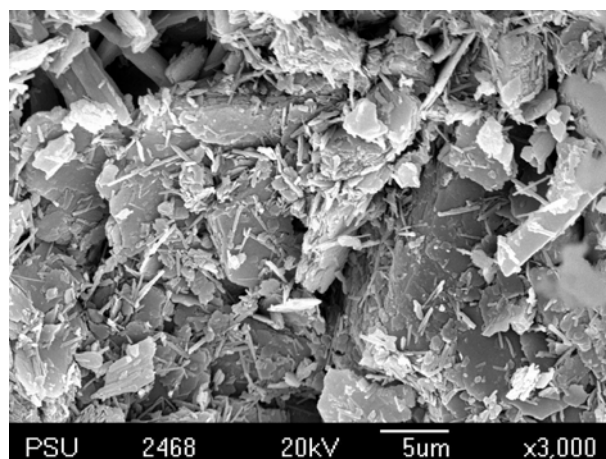
(ค)

รูปที่ 4.28 ยิปซัมเพศต์จากยิปซัมเทียมผสมเข้ากับพาราไร้อยู่ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
 ประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคยิปซัมเพสต์ที่แทนที่ด้วยดินขาวแปรร้อยละ 10 พบว่าการแทนที่ด้วยดินขาวแปรส่งผลให้เกิดแท่งแอดตริงไคต์ ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) กระจายตัวอยู่หนาแน่นระหว่างแท่งผลึกยิปซัมเทียมเนื่องจากในยิปซัมเทียมมี SO_3 ปนอยู่มาก ซึ่งจะเข้าไปรบกวนการเกิดแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แต่ในทางตรงกันข้ามจะเข้าไปรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกาในดินขาวแปรเกิดเป็นแอดตริงไคต์แทน แท่งแอดตริงไคต์ที่เกิดส่งผลให้ยิปซัมเพสต์มีการขยายตัวคั่นแท่งผลึกยิปซัมเทียมให้แยกตัวออกดังรูปที่ 4.30 ส่งผลให้เมือแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยดินขาวแปรทำให้กำลังอัดของยิปซัมเพสต์ลดลง

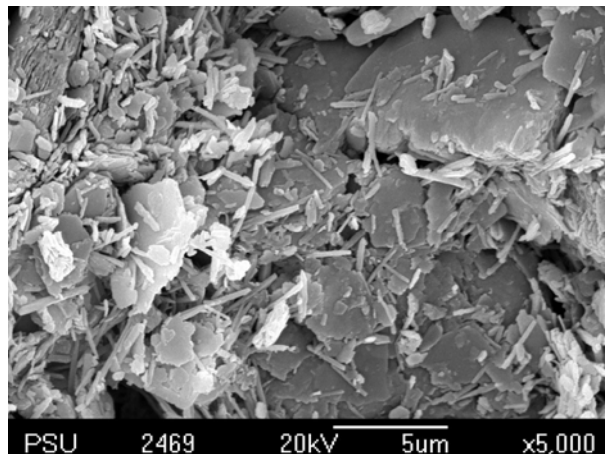


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.29 ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมผสมดินขาวแปรร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP (ก) กำลังขยาย 750 เท่า (ข) กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 4.30 ยิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมผสมคินชาวแปรร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.9 การพัฒนาสู่อิฐมวลเบา

จากผลการทดสอบคุณลักษณะยิปซัมเพสต์โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1505-2541 พบว่ายิปซัมเพสต์จากยิปซัมเทียมล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7GP ที่อายุบ่ม 28 วันมีค่าความหนาแน่นแห้ง 1,284 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดกลืนน้ำ 202 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำลังอัด 12.15 เมกะพาสคัล ร้อยละการหดตัวเท่ากับ 0.014 และสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.185 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1510-2541 แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ นอกจากนั้นได้ทดลองหล่อก้อนยิปซัมเพสต์ขนาด 30x20x5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.31 พบว่าก้อนยิปซัมเพสต์สามารถเลื่อยตัดเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก (รูปที่ 4.32) และตอกตะปูได้โดยไม่เสียหาย จากสมบัติดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ยิปซัมเทียมมีสมบัติที่จะนำมาใช้ทดแทนอิฐมวลเบาในปัจจุบันได้



รูปที่ 4.31 ยิปซัมเพสต์ขนาด 30x20x5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.32 ยิปซัมเพสต์ที่ถูกเลื่อยเป็นชิ้นเล็ก

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. ยิปซัมเทียมที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเป็น แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot (0.6\text{H}_2\text{O})$) เมื่อนำมาหล่อเป็นยิปซัมเพสต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.412 โดยน้ำหนัก ได้กำลังอัดสูงสุดที่ 12.15 เมกะพาสคัล และกำลังอัดมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นอีกหากลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง ถึงแม้ว่ายิปซัมเทียมไม่เปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot (0.5\text{H}_2\text{O})$) ที่มีสมบัติทางเคมีที่ดีกว่า แต่ก็สามารถให้กำลังอัดที่สูงได้เช่นกัน

2. เถ้าลอยไม้ยางพาราที่นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน ถึงแม้ว่าจะไม่จัดอยู่ในประเภทสารปอซโซลาน แต่ภายในอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารามีความพรุนสูง เป็นผลให้เมื่อนำมาผสมเป็นยิปซัมเพสต์ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เพราะช่องว่างภายในอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะคล้ายฟองน้ำดูดซับน้ำเก็บไว้ภายในอนุภาค นอกจากนี้หากแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยดินขาวแปรเมื่อนำมาผสมเป็นยิปซัมเพสต์ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เพราะอนุภาคดินขาวแปรมีขนาดเล็กมาก ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสรวมมากขึ้นต้องใช้น้ำปริมาณมากขึ้นเพื่อมาเคลือบผิว

3. เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในยิปซัมเพสต์ จะสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของยิปซัมเพสต์เพสต์ได้ แต่การเติมดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์กลับลดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของยิปซัมเพสต์ลง

4. การแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและดินขาวแปรจะทำให้ยิปซัมเพสต์มีความหนาแน่นลดลง โดยเฉพาะหากแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อนุภาคมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ เมื่อวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจุลภาคพบว่าอนุภาคเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่ได้เชื่อมประสานกับยิปซัมเทียมเพียงแต่เข้าไปแทรกในเนื้อยิปซัมเทียมเท่านั้น การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมเทียมทำให้อนุภาคมวลรวมในยิปซัมเทียมถูกอนุภาคของน้ำส่วนเกินล้อมรอบ ทำให้มวลรวมเรียงตัวแบบหลวมๆ เมื่อยิปซัมเพสต์แข็งตัวจะเกิดเป็นช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้

5. ปริมาณการดูดกลืนน้ำของยิปซัมเพสต์จะขึ้นอยู่กับช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ ซึ่งเกิดจากน้ำส่วนเกินที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปริมาณน้ำส่วนเกินยิ่งมากก็ยิ่งทำให้การดูดกลืนน้ำสูง อีกสาเหตุหนึ่งคือ ช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ในอนุภาควัสดุประสาน ซึ่งการดูดกลืนน้ำจะเกิดขึ้นมากหากแทนที่ด้วยเกลือลอยไม้อย่างพารา เพราะอนุภาคเกลือลอยไม้อย่างพารามีลักษณะคล้ายฟองน้ำดูดซับน้ำเก็บไว้ภายในอนุภาค

6. พฤติกรรมกำลังอัดของยิปซัมเพสต์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเหมือนกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ โดยค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน จะสูงกว่าที่ 7 วัน แต่กำลังยิปซัมเพสต์ที่อบไอน้ำแรงดันต่ำ สูงกว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน แต่น้อยกว่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ทุกอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เพราะวัสดุประสานจะเกิดการแยกตัวก่อนยิปซัมเพสต์จะแข็งตัว นอกจากนี้ยังเกิดช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ในยิปซัมเพสต์และ โพรงรูเล็ก สาเหตุเหล่านี้ล้วนส่งผลทำให้กำลังอัดของยิปซัมเพสต์ลดลง

7. เมื่อแทนที่เกลือลอยไม้อย่างพาราและดินขาวแปรในยิปซัมเทียมจะทำให้กำลังอัดยิปซัมเพสต์ลดลง โดยเมื่อทำการแทนที่เกลือลอยไม้อย่างพาราและดินขาวแปรร้อยละ 30 และ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้ยิปซัมเพสต์มีกำลังอัดต่ำสุดทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยเฉพาะการแทนที่ยิปซัมเทียมด้วยเกลือลอยไม้อย่างพารา อนุภาคเกลือลอยไม้อย่างพารามีความพรุนสูงทำให้รับกำลังไม่ดี ต่างกับดินขาวแปรที่อนุภาคมีความพรุนน้อยแต่ละเอียดกว่า

8. ค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างในยิปซัมเพสต์ ซึ่งเมื่อค่าการดูดกลืนน้ำในยิปซัมเพสต์สูง ก็ส่งผลให้ค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์สูงตามเช่นกัน และการนำยิปซัมเพสต์มาอบไอน้ำแรงดันต่ำสามารถ ลดการหดตัวของยิปซัมเพสต์ลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการหดตัวของยิปซัมเพสต์ที่ 28 วัน

9. สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งของยิปซัมเพสต์จะลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าสภาพนำความร้อนจะลดลงตามปริมาณช่องว่างในยิปซัมเพสต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อแทนที่เกลือลอยไม้อย่างพาราในยิปซัมเพสต์ สภาพนำความร้อนในสภาพแห้งจะลดลงตามอัตราส่วนเกลือลอยไม้อย่างพาราที่เพิ่มขึ้น เพราะปริมาณช่องว่างในยิปซัมเพสต์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การเติมดินขาวแปรในยิปซัมเทียมสามารถลดสภาพนำความร้อนของยิปซัมเพสต์

10. ยิปซัมเพสต์ที่ส่วนผสม RWFA0MKL0 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีสมบัติใกล้เคียงอิฐมวลเบาชนิด 1 ชั้นคุณภาพ 8 ตาม มอก.1505-2541 แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงสมบัติของยิปซัมเพสต์สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้อบยิปซัมเทียมโดยเพิ่มจาก 100 องศาเซลเซียส เป็น 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ยิปซัมเทียมเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot (0.5\text{H}_2\text{O})$) ที่มีสมบัติที่ดีกว่า แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการเตรียมวัตถุดิบ
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมการเติมดินขาวแปรในยิปซัมเพสต์ในประเด็นเตรียมดินขาวแปรให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เพื่อช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน
3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัมเทียมเกิดขึ้นเร็วมาก เพื่อความสะดวกในการหล่อยิปซัมเพสต์ควรหาสารหน่วงเพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน. <http://www.dpim.go.th> เมื่อวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2551
- เจริญชัย ฤทธิรุท และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวระนอง เคา.วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 2. หน้า 231-242
- ชัชวาล เศรษฐ์บุตร (2548). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. หน้า 69-80
- ชัยชาญ โชติถนอม คำภีร์ จิตชัยภูมิ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2550). คอนกรีตปลีอกมวลเบาผสมเถ้า แกลบและเถ้าขานอ้อย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. หน้า 242-246
- คุณพล ตันนโยภาส (2552) แนะนำศิลาวรรณนา ปรับปรุงครั้งที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 321 หน้า
- คุณพล ตันนโยภาส และ อัครเดช ทองคำ (2544). การใช้ประโยชน์ทางแร่ดินขาวจากไฮโดรไซโครรอนเป็นแร่ผสมเพิ่มในมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 2. หน้า 1-6
- คุณพล ตันนโยภาส มนูญ มาศนิยม และ สุทธิชัย เหล่าปรีชากุล (2547) อิทธิพลของเถ้าเชื้อเพลิง กะลาปาล์มน้ำมันที่มีผลกระทบต่อกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 3. 8-9 ธันวาคม
- คุณพล ตันนโยภาส และวิระพงษ์ นิยมญาติ (2548) สมบัติของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์และดินขาว แปร การประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8-9 ธันวาคม 2548 หน้า MnE-13-MnE18. (CD ROM)
- คุณพล ตันนโยภาส พัชรา จันท์แก้ว และ วิมลรัตน์ มณีดับ (2549). พฤติกรรมของน้ำปูนชั้นผสม เถ้าแกลบและเถ้าเชื้อเพลิงไฮปาล์มน้ำมันที่บดโดยเครื่องบดเอทไตรเตอร์. การประชุมวิชาการทางโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11. รร. เมอร์ลิน บีช รีสอร์ท จ.ภูเก็ต 18-21 เมษายน
- คุณพล ตันนโยภาส ลูติ ชุ่มชื่น และไพรัตน์ เตชะวิวัฒนาการ (2546). ผลกระทบจากดินขาวแปรที่มี ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 1. 14-16 พฤษภาคม. เขื่อนศรีนครินทร์ จ.กาญจนบุรี. หน้า 193-198
- คุณพล ตันนโยภาส ชัดเจน ฤตวิรุฬห์ และอำพล กิติโชติ (2546). ผลกระทบจากการเติมเถ้าลอยและ เถ้าขี้เถ้าไม่ย่างพาราที่มีต่อมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์. การประชุมการประชุมวิชาการ

- คอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1. 14-16 พฤษภาคม. เขื่อนศรีนครินทร์ จ.กาญจนบุรี หน้า 199-204
- ดิษฐพร แก้วมณีโชค ดนุพล ตันนโยภาส และ พิพัฒน์ ทองนิม (2551). การปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวปากพั้งด้วยเถ้าของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 8 - 9 พฤษภาคม 2551. หน้า 182-187.
- บุรฉัตร นัทรวิระ ณรงค์ศักดิ์ มากุล และ บัณฑิต รักษาดี (2547). การใช้เถ้าแกลบมาบดในการผลิตคอนกรีตปลีอก. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 27 ฉบับที่ 4. หน้า 483-496
- ประชุม คำพุด (2550). การใช้น้ำยางพาราปรับปรุงสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศอบไอน้ำ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 30 ฉบับที่ 2. หน้า 363-376
- พรนราชนันท์ บุญราศรี และ ดนุพล ตันนโยภาส (2551). การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6. 8-9 พฤษภาคม
ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. <http://enghome.eng.psu.ac.th/mne>. เมื่อ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551
- ภาณุวัฒน์ สุริยฉัตร และ สำราญ มีล่อง (2547). คุณสมบัติเทคนิคของดินเหนียวบางกอกผสมแร่ใยหิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 27 ฉบับที่ 1. หน้า 3-16
- มอก.1505-2541 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. หน้า 1-12
- มอก.1510-2541 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. หน้า 1-16
- สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ (2549). อิฐมวลเบาผสมโฟม. สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. <http://www.kmutnb.ac.th> เมื่อวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2551
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2549). การผลิตอิฐมวลเบาจากวัสดุรีไซเคิล. การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 25-26 มกราคม พ.ศ. 2549. หน้า 586-589

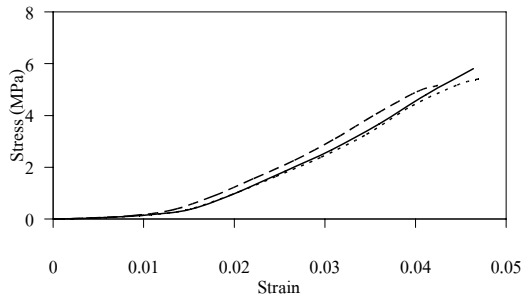
- สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย(2546). วราภรณ์ คุณาวานากิจ, ลดา พันธุ์สุขุมธนา, วรณา ต. แสงจันทร์, พิมพ์วัลย์ วัฒนโภาส. อิฐมวลเบาจากเถ้าลอยลิกไนต์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. หน้า 36-38.
- อภิรักษ์ นพรัตน์ และ ดนุพล ตันนโยภาส (2551). ผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนต่อกรดของมอร์ต้าร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 13. 14-16 พฤษภาคม
- อาปีเต็ง ฮาวา และ ดนุพล ตันนโยภาส. (2551). อิทธิพลของเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมปัมมิช. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. 14-16 พฤษภาคม
- Arikan M., Sobolev K., Ertum T., Yeginobali A. and Turker P. (2009). Properties of blended cement with thermally activated kaolin. Construction and building materials 23(1): 62-70.
- ASTM C 187-86 (1998). Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards.
- Benjamin,P.K. (1960). Foam Concrete.Cement and Concrete Research.Vol 5:112-114.
- Cicek T. and Tanriverdi M. (2007). Lime based steam autoclaved fly ash bricks. Construction and building materials 21(6): 1295-1300.
- Corr DJ., Lebourgeois J., Monteiro P.J.M., Bastacky S.J. and Gartner E.M. (2002).Air void morphology in fresh cement pastes. Cement and Concrete Research 32(7): 1025-1037.
- Demir I. and Serhat Baspinar M. (2008). Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. Construction and building materials 22(6): 1299-1340.
- Duff A. Abrams. (1918). Design of Concrete Mixtures. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.
- Zhao F.-Q., Zhao J. and Lui H.-J. (2009). Autoclaved brick from low-silicon tailings. Construction and Building Materials 23(1):538-541.
- Gleize P.J.P., Cyr M. and Escadeillas G. (2007). Effects of metakaolin on autogenous of cement pastes. Cement & Concrete Composites 29(2): 80-87.
- Kearsley E.P. and Wainwright P.J. (2002) The effect of porosity on the strength of foamed concrete. Cement & Concrete Composites 32(2): 233-239.
- Kunhanandan Nambiar E.K and Ramamurthy K. (2007) Air-void characterization of foam concrete.Cement and Concrete Research 37(2): 221-230.

- Kunhanandan Nambiar E.K and Ramamurthy K. (2007). Sorption charactio caracterstics of foam concrete. *Cement and Concrete Research* 37(9): 1341-1347
- Kunhanandan Nambiar E.K and Ramamurthy K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Research* 28(2): 475-480
- Laukaitis A. and Fiks B.(2006). Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. *Aplied Acoustics*67(3): 284-294.
- Li Y. and Sadakata M. (1999). Study of gypsum formation for appropriate dry desulfurization process of flue gas. *Fuel* 78(9);1089-1095.
- Liu B., Xie Y. and Li J. (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Research* 35(5): 994-998.
- Nevill. (1995). Properties of concrete. 4th ed.,London. Longman Group Limited.
- Siddique R. and Klaus J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied clay science* 43(3-4): 392-400.
- Tonnayopas D. and Laopreechakul S. (2006) Utilization of oil palm shell ash as mineral admixture in Portland cement mortar, *Proc. 1st Inter. Conf. Hazardous Waste Management for a Sustainable Future*. Century Park Hotel. Bangkok. 10-12 Jan
- Tzouvalas G., Rantis G. and Tsimas S.(2004). Alternative calcium-sulfate-bearing materials as cement retarders:Part 2.FGD gypsum. *Cement and Concrete Research* 34: 2119-2125

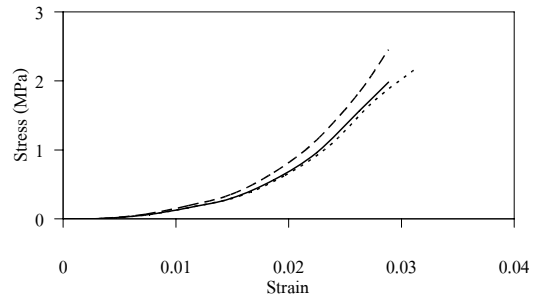
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

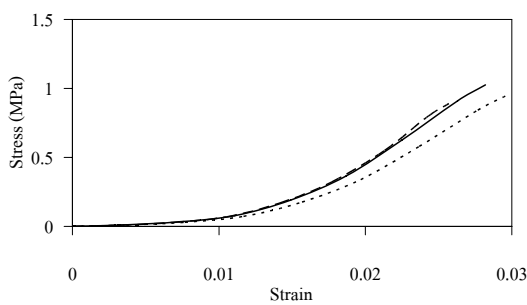
รูปแสดง stress-strain diagram ของอีพ็อกซีเรซิน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7gp



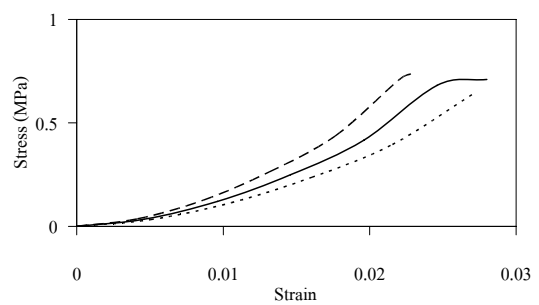
รูปที่ ก-1 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



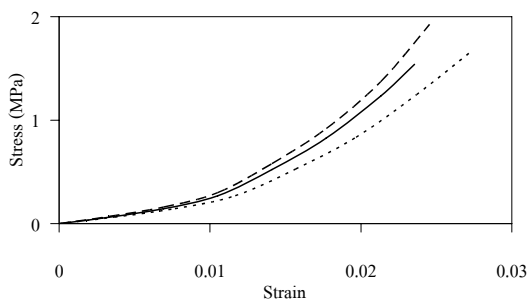
รูปที่ ก-2 RWFA 10M KL 0 อายุบ่ม 7 วัน



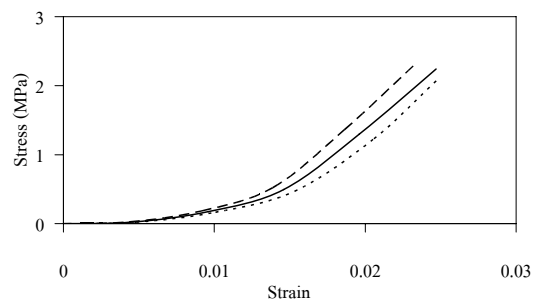
รูปที่ ก-3 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



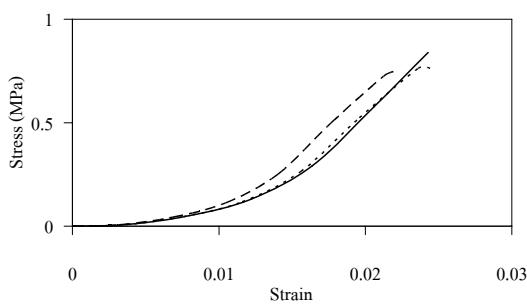
รูปที่ ก-4 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



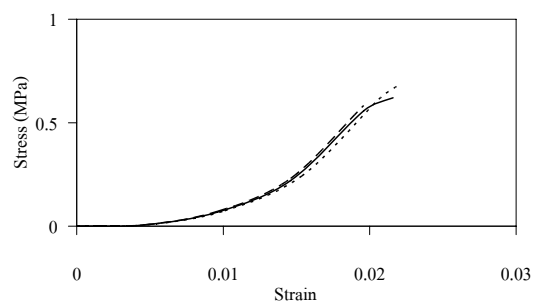
รูปที่ ก-5 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



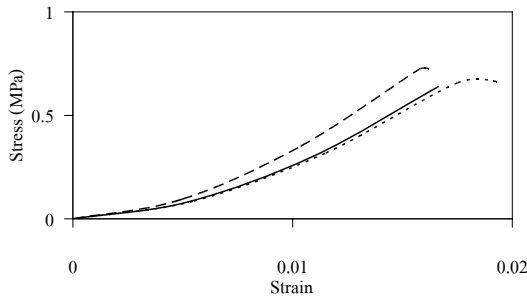
รูปที่ ก-6 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



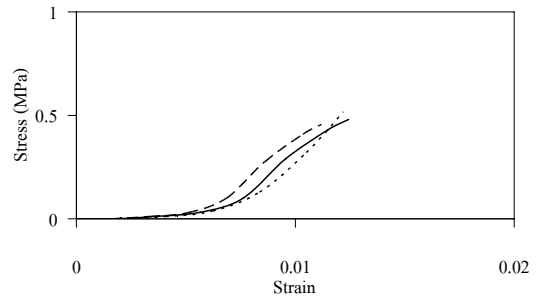
รูปที่ ก-7 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



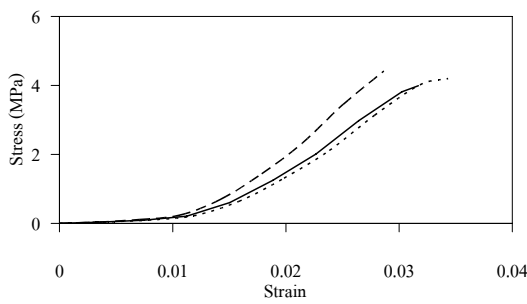
รูปที่ ก-8 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



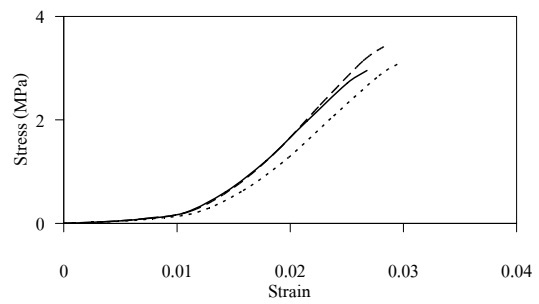
รูปที่ ก-9 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



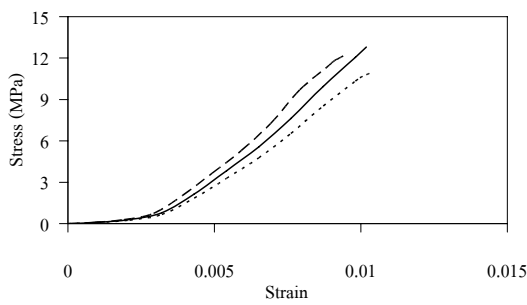
รูปที่ ก-10 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



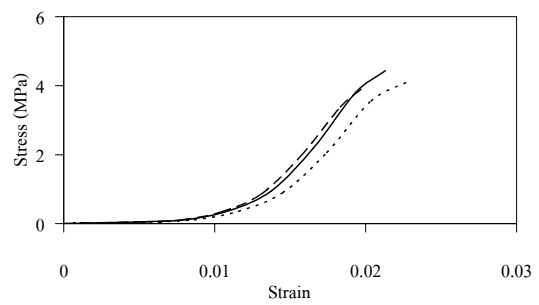
รูปที่ ก-11 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



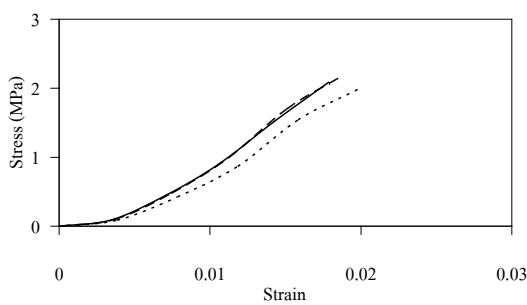
รูปที่ ก-12 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



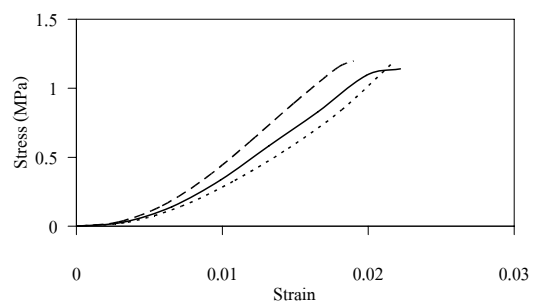
รูปที่ ก-13 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



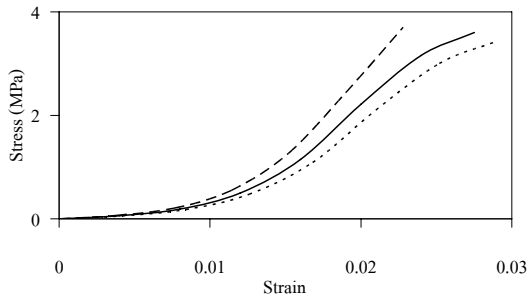
รูปที่ ก-14 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



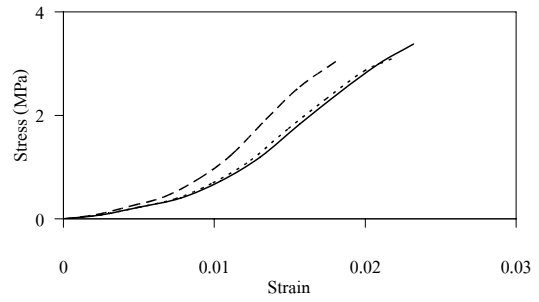
รูปที่ ก-15 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



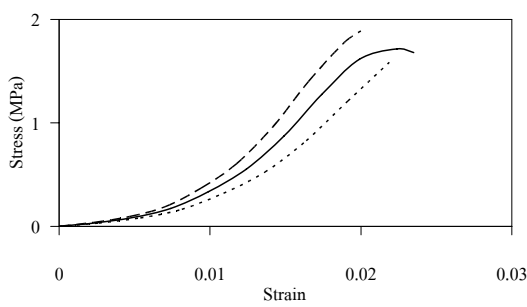
รูปที่ ก-16 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



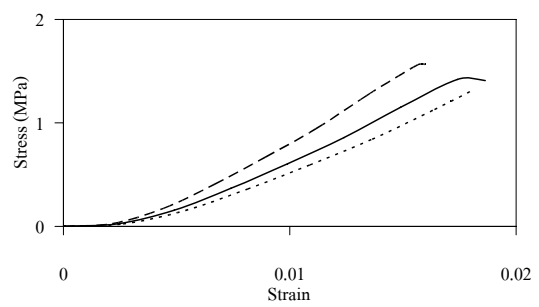
รูปที่ ก-17 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



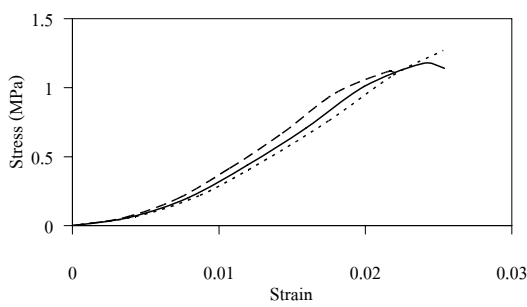
รูปที่ ก-18 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



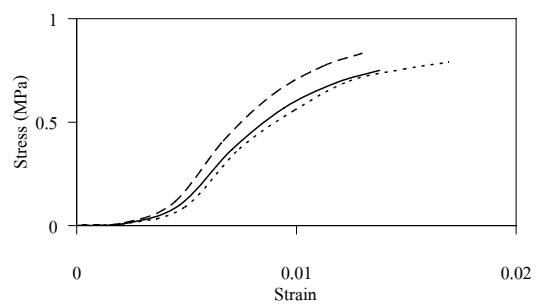
รูปที่ ก-19 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



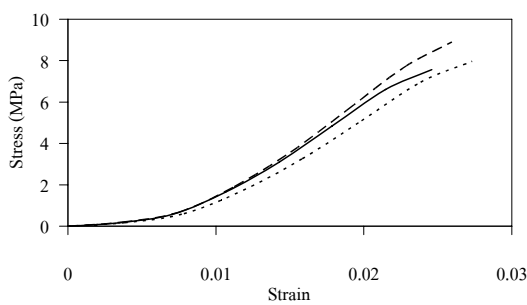
รูปที่ ก-20 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



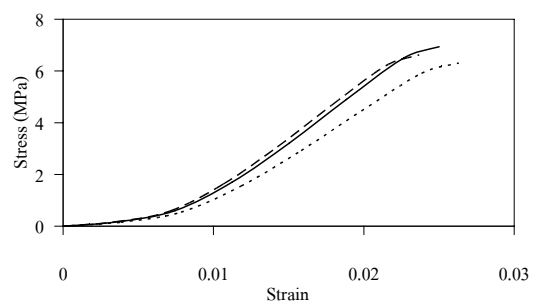
รูปที่ ก-21 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



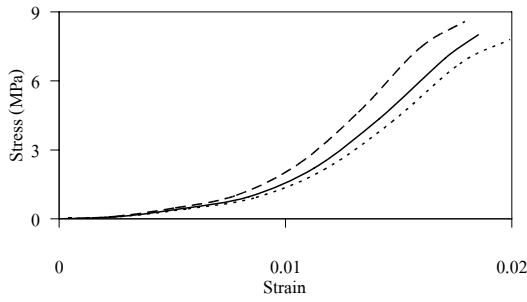
รูปที่ ก-22 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



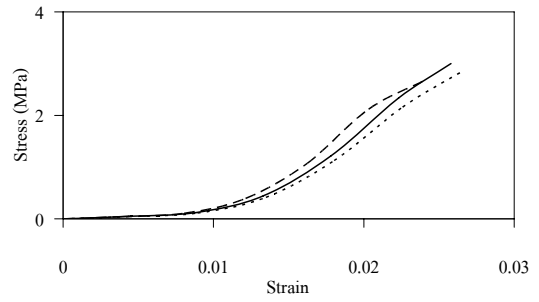
รูปที่ ก-23 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



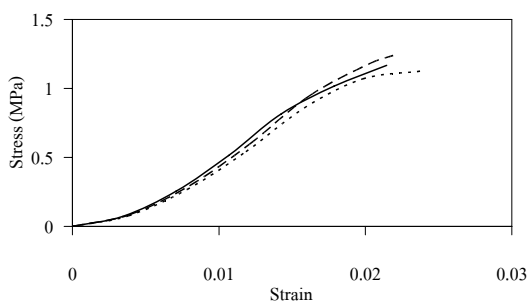
รูปที่ ก-24 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



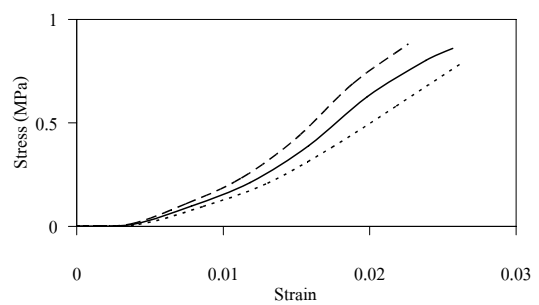
รูปที่ ก-25 RWFA 0 MKL 0 อบไอน้ำ



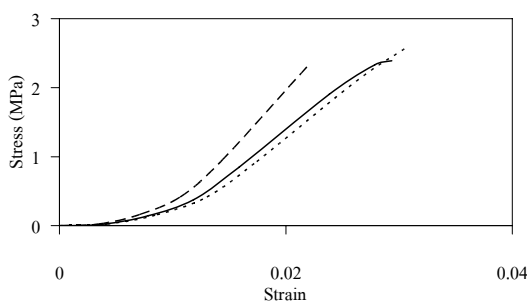
รูปที่ ก-26 RWFA 10 MKL 0 อบไอน้ำ



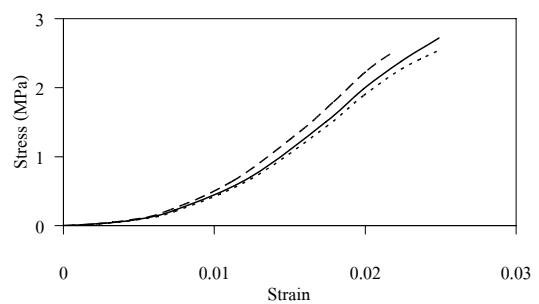
รูปที่ ก-27 RWFA 20 MKL 0 อบไอน้ำ



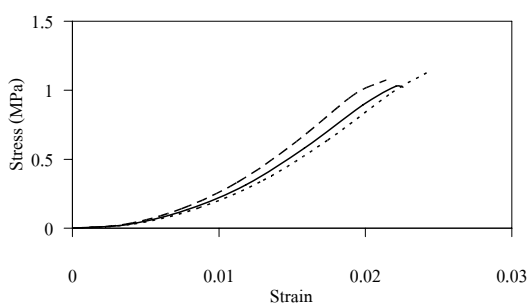
รูปที่ ก-28 RWFA 30 MKL 0 อบไอน้ำ



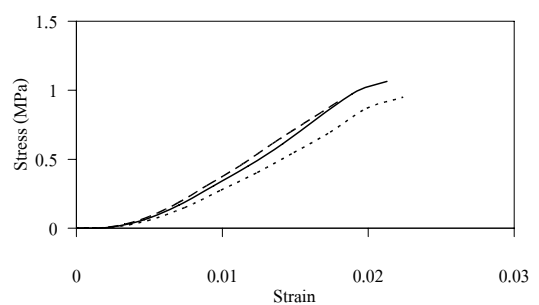
รูปที่ ก-29 RWFA 10 MKL 10 อบไอน้ำ



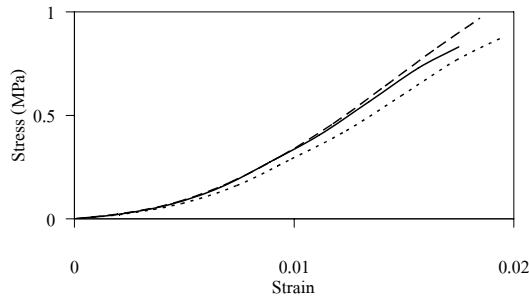
รูปที่ ก-30 RWFA 10 MKL 20 อบไอน้ำ



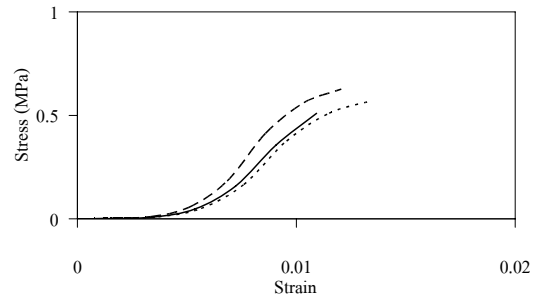
รูปที่ ก-31 RWFA 20 MKL 10 อบไอน้ำ



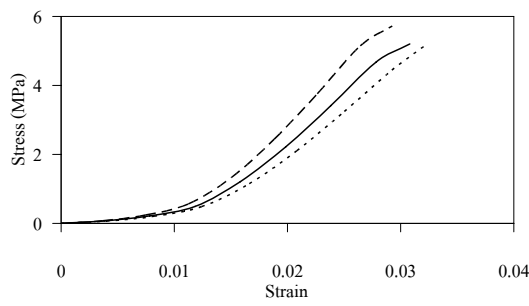
รูปที่ ก-32 RWFA 20 MKL 20 อบไอน้ำ



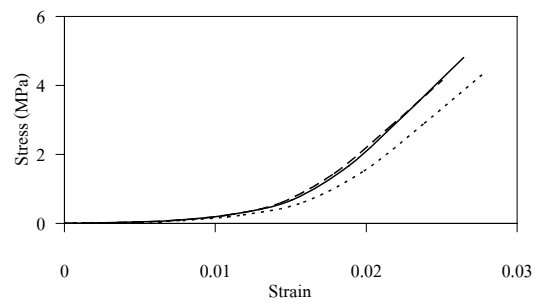
รูปที่ ก-33 RWFA 30 MKL 10-อบไอน้ำ



รูปที่ ก-34 RWFA 30 MKL 20-อบไอน้ำ



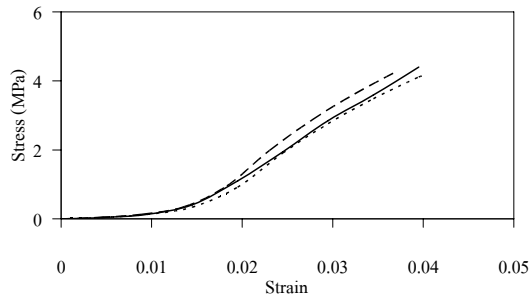
รูปที่ ก-35 RWFA 0 MKL 10-อบไอน้ำ



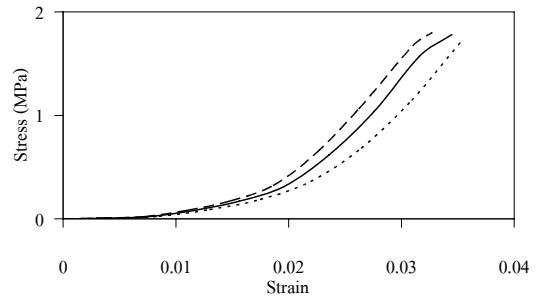
รูปที่ ก-36 RWFA 0 MKL 20-อบไอน้ำ

ภาคผนวก ข.

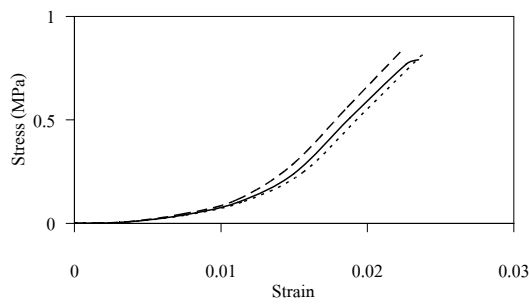
รูปแสดง stress-strain diagram ของอีพ็อกซีเรซิน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.8gp



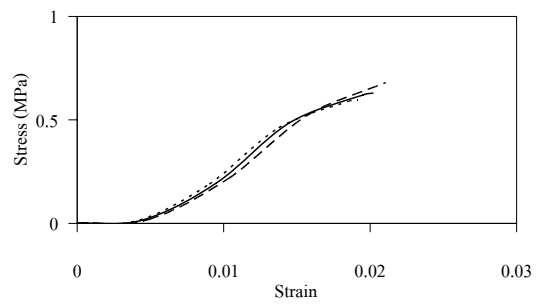
รูปที่ ข-1 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



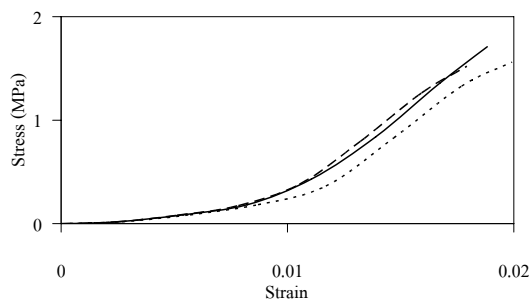
รูปที่ ข-2 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



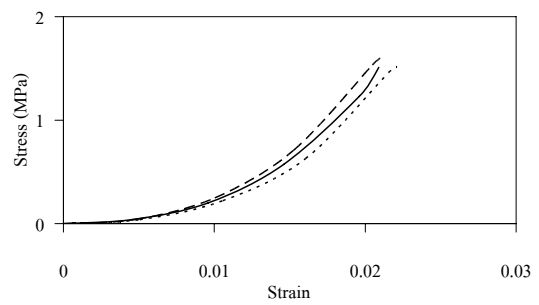
รูปที่ ข-3 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



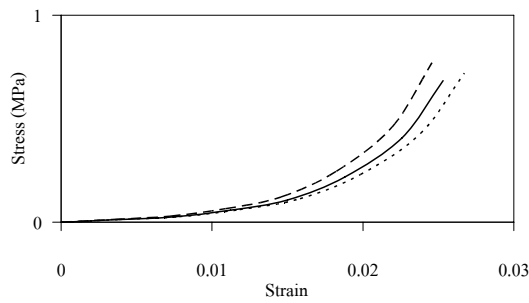
รูปที่ ข-4 RWFA 30 MKL อายุบ่ม 7 วัน



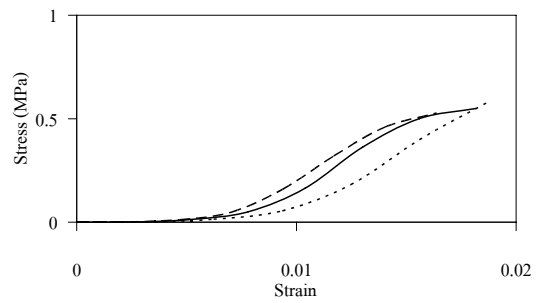
รูปที่ ข-5 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



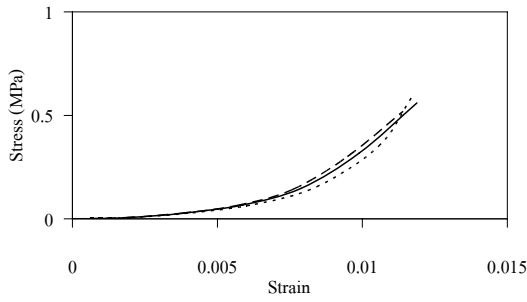
รูปที่ ข-6 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



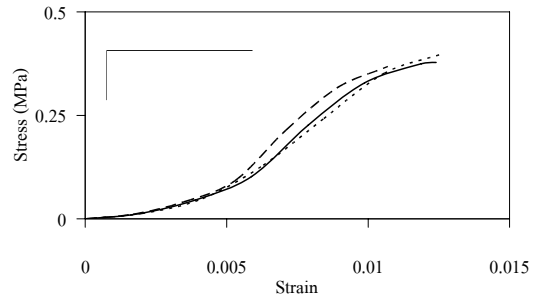
รูปที่ ข-7 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



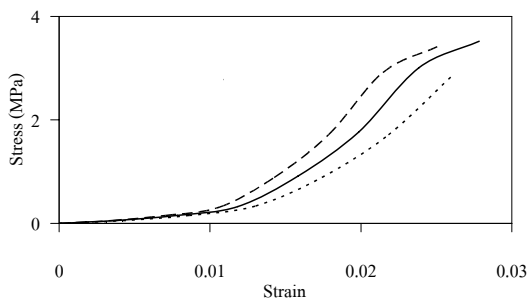
รูปที่ ข-8 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



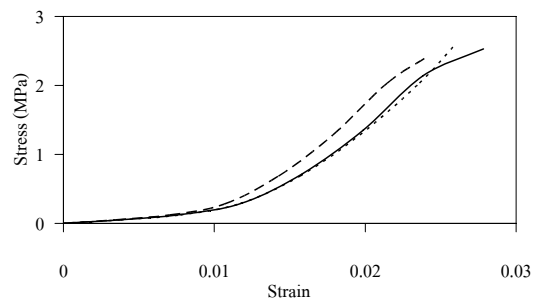
รูปที่ ข-9 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



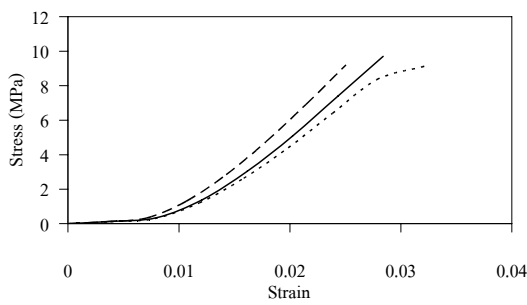
รูปที่ ข-10 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



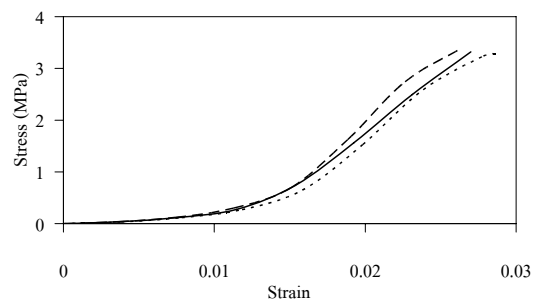
รูปที่ ข-11 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



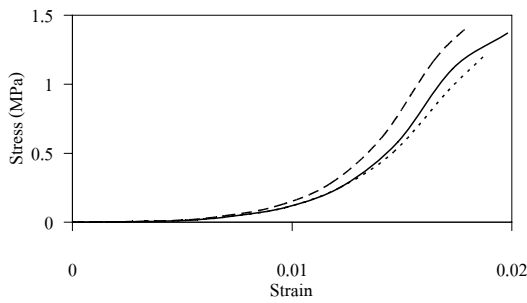
รูปที่ ข-12 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



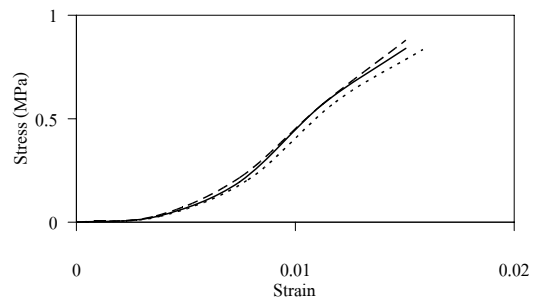
รูปที่ ข-13 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



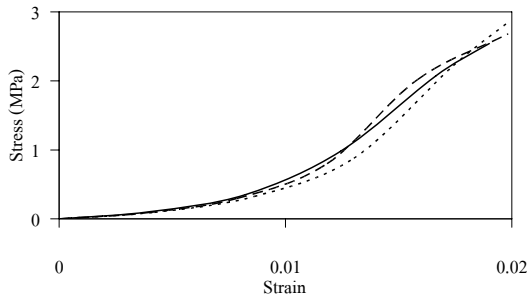
รูปที่ ข-14 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



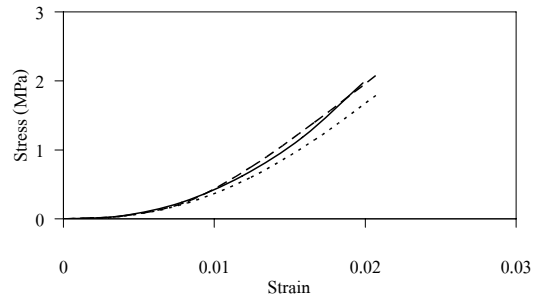
รูปที่ ข-15 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



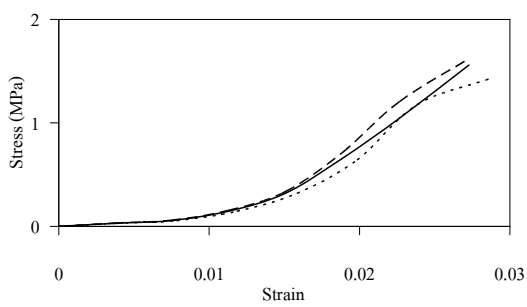
รูปที่ ข-16 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



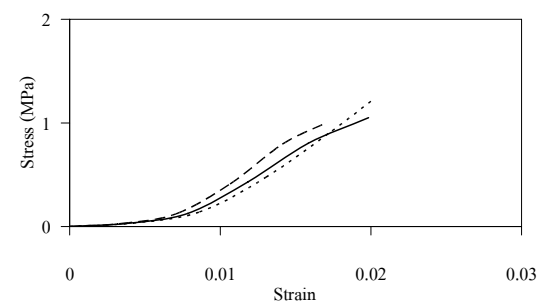
รูปที่ ข-17 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



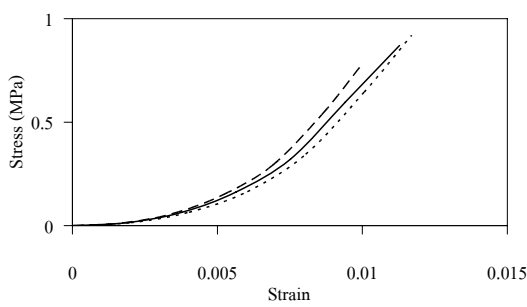
รูปที่ ข-18 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



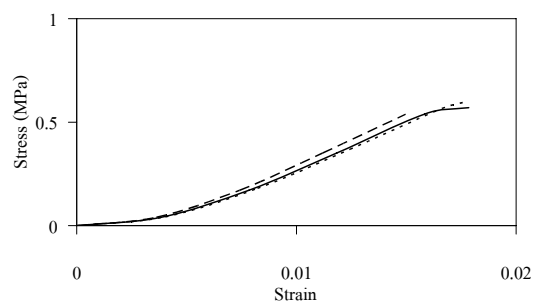
รูปที่ ข-19 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



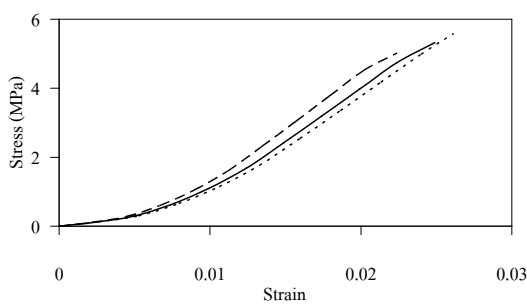
รูปที่ ข-20 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



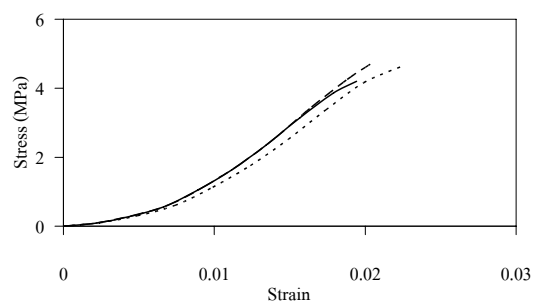
รูปที่ ข-21 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



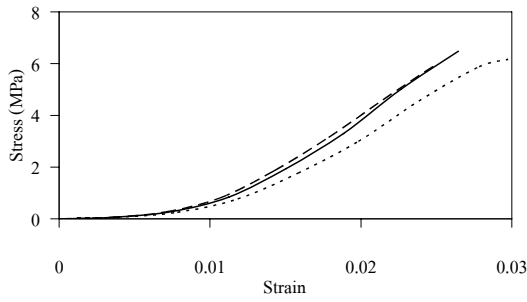
รูปที่ ข-22 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



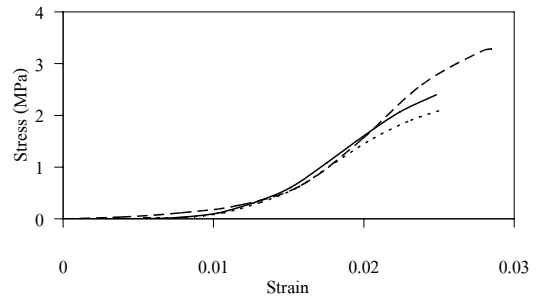
รูปที่ ข-23 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



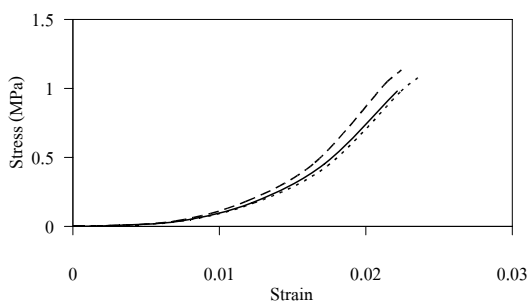
รูปที่ ข-24 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



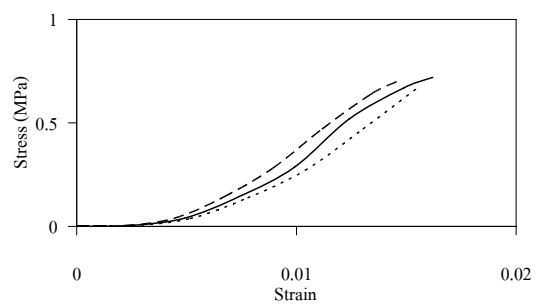
รูปที่ ข-25 RWFA 0 MKL 0 อบไอน้ำ



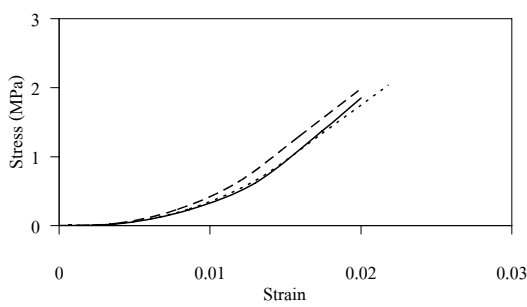
รูปที่ ข-26 RWFA 10 MKL 0 อบไอน้ำ



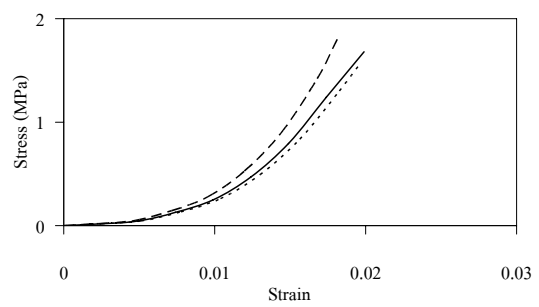
รูปที่ ข-27 RWFA 20 MKL 0 อบไอน้ำ



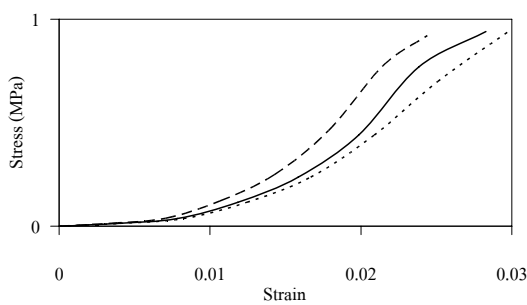
รูปที่ ข-28 RWFA 30 MKL 0 อบไอน้ำ



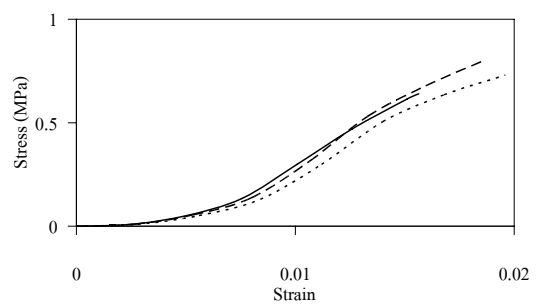
รูปที่ ข-29 RWFA 10 MKL 10 อบไอน้ำ



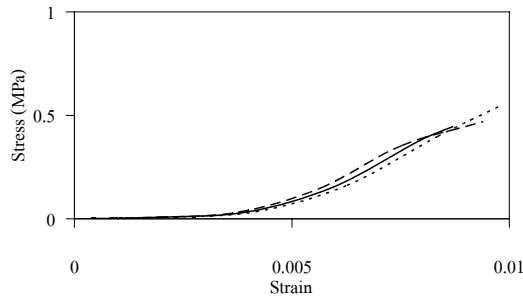
รูปที่ ข-30 RWFA 10 MKL 20 อบไอน้ำ



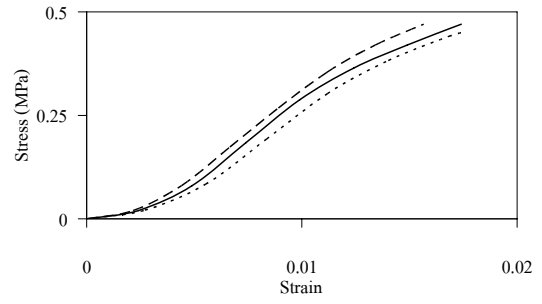
รูปที่ ข-31 RWFA 20 MKL 10 อบไอน้ำ



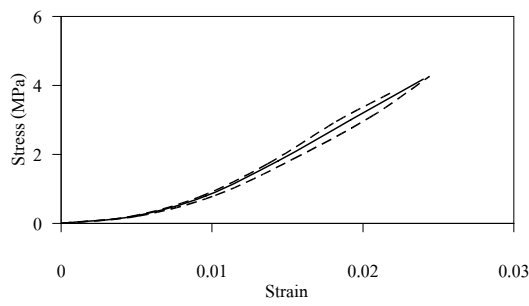
รูปที่ ข-32 RWFA 20 MKL 20 อบไอน้ำ



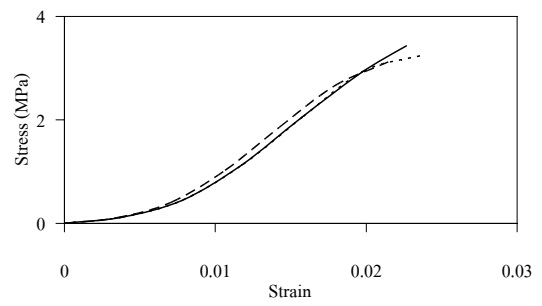
รูปที่ ข-33 RWFA 30 MKL 10 อบไอน้ำ



รูปที่ ข-34 RWFA 30 MKL 20 อบไอน้ำ



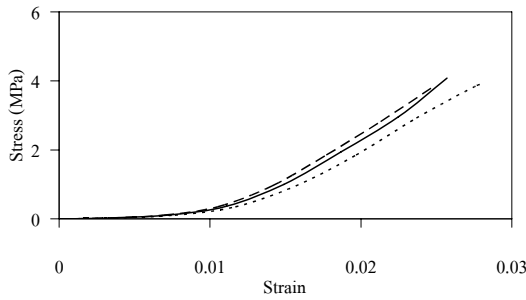
รูปที่ ข-35 RWFA 0 MKL 10 อบไอน้ำ



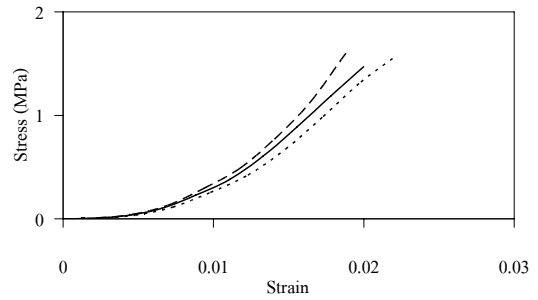
รูปที่ ข-36 RWFA 0 MKL 20 อบไอน้ำ

ภาคผนวก ค.

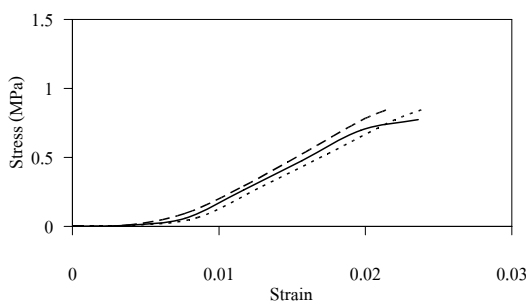
รูปแสดง stress-strain diagram ของอีพ็อกซีเรซิน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.9gp



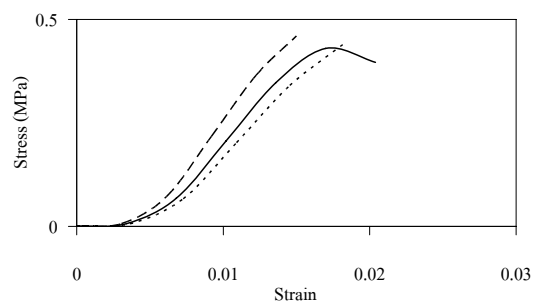
รูปที่ ค-1 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



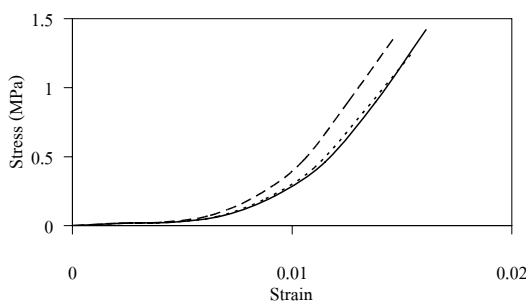
รูปที่ ค-2 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



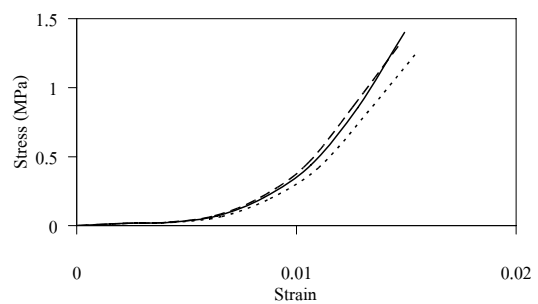
รูปที่ ค-3 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



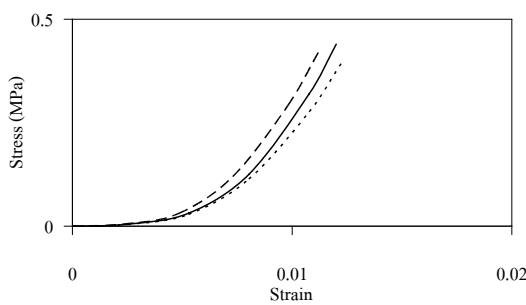
รูปที่ ค-4 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



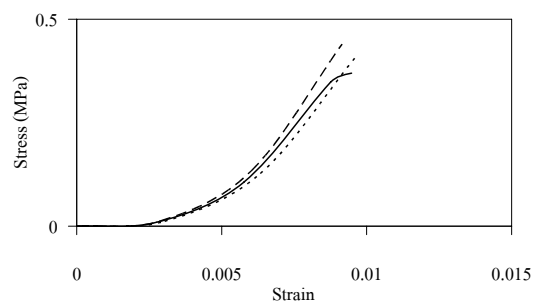
รูปที่ ค-5 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



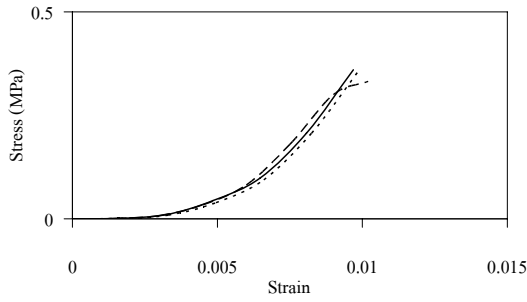
รูปที่ ค-6 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



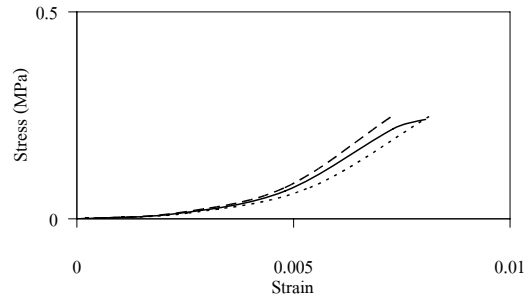
รูปที่ ค-7 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



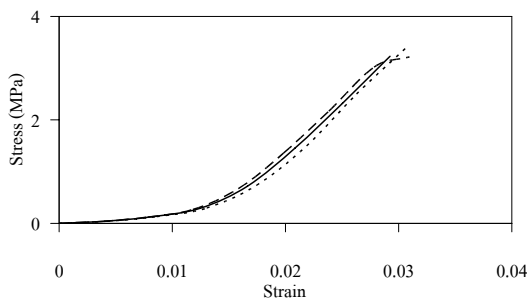
รูปที่ ค-8 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



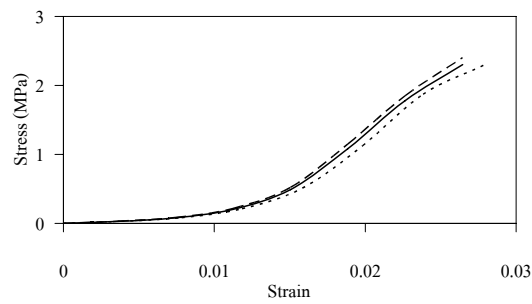
รูปที่ ค-9 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



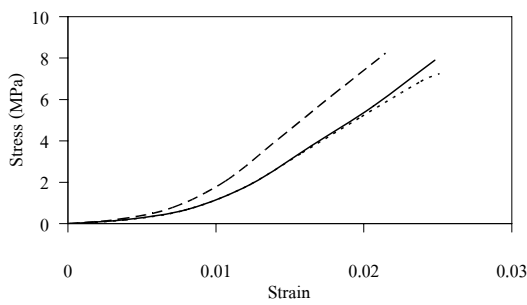
รูปที่ ค-10 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



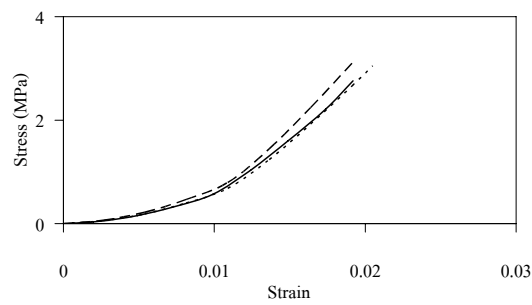
รูปที่ ค-11 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



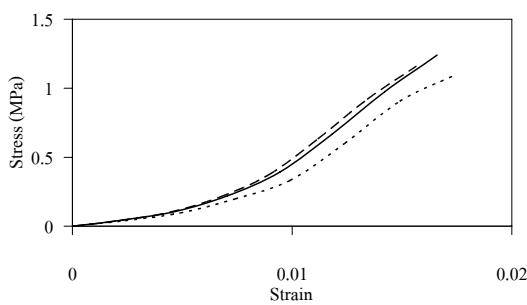
รูปที่ ค-12 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



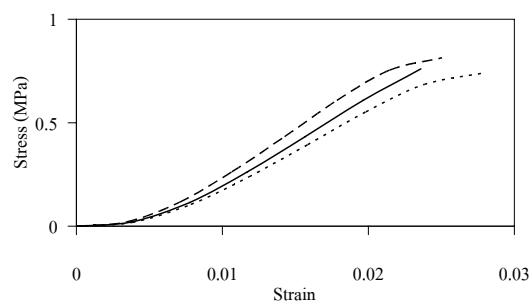
รูปที่ ค-13 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



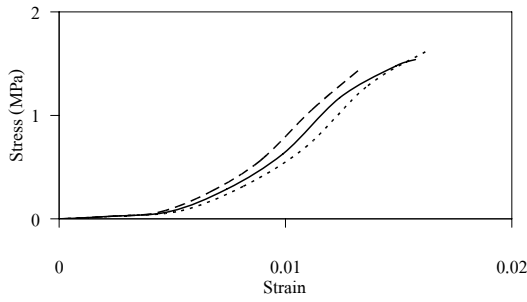
รูปที่ ค-14 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



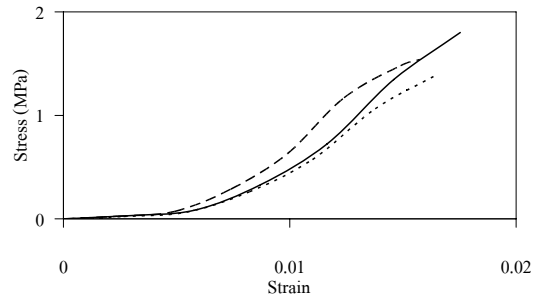
รูปที่ ค-15 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



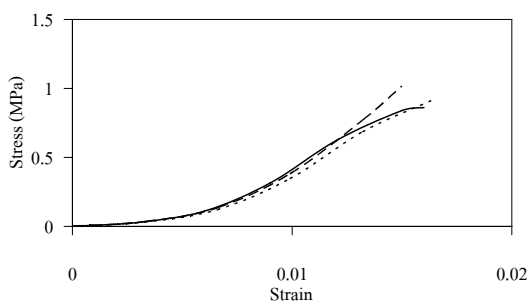
รูปที่ ค-16 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



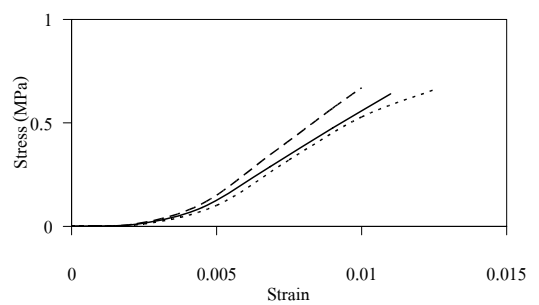
รูปที่ ค-17 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



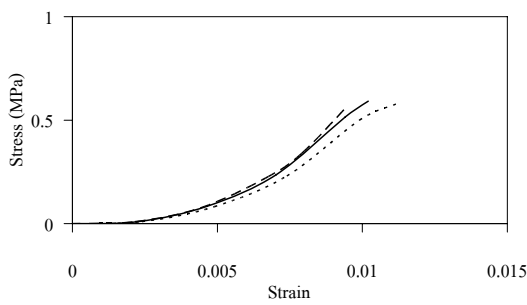
รูปที่ ค-18 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



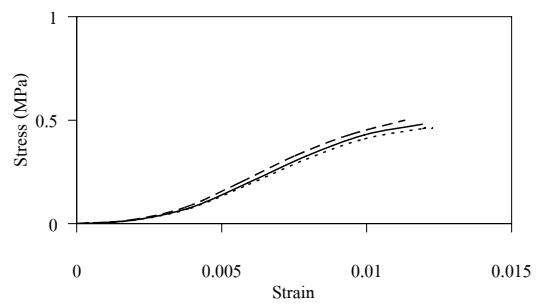
รูปที่ ค-19 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



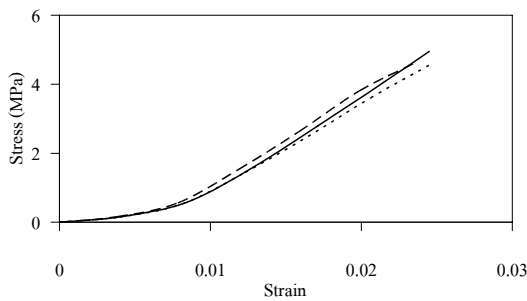
รูปที่ ค-20 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



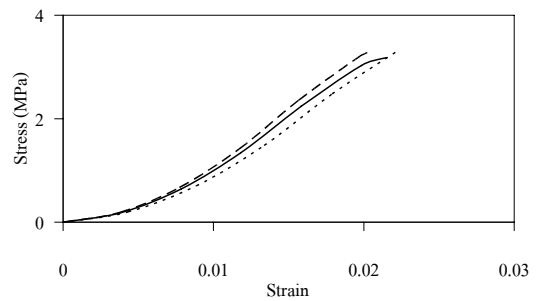
รูปที่ ค-21 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



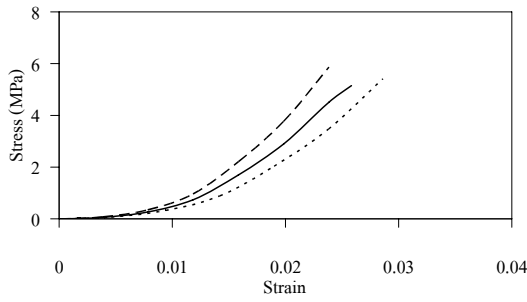
รูปที่ ค-22 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



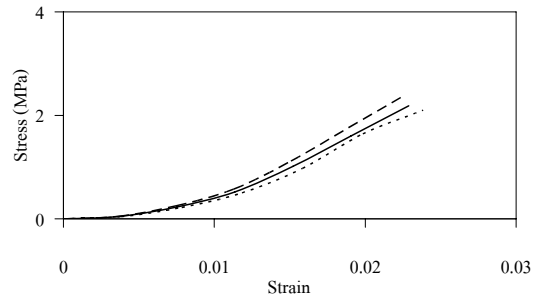
รูปที่ ค-23 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



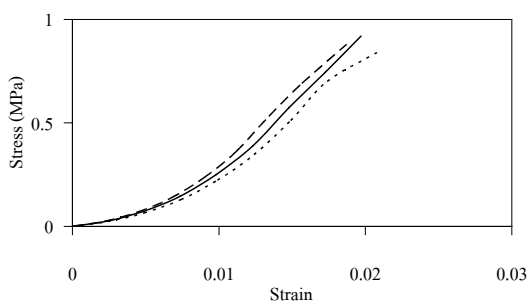
รูปที่ ค-24 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



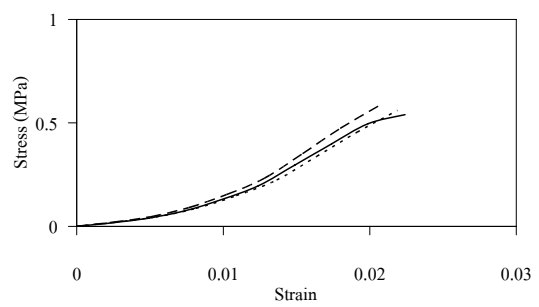
รูปที่ ค-25 RWFA 0 MKL 0 0บไอน้ำ



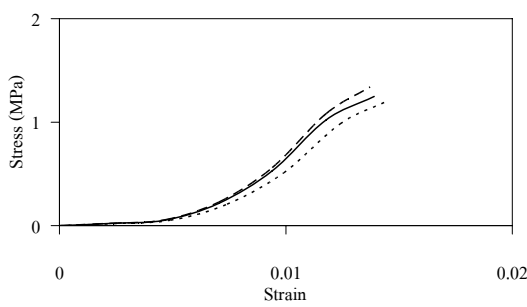
รูปที่ ค-26 RWFA 10 MKL 0 0บไอน้ำ



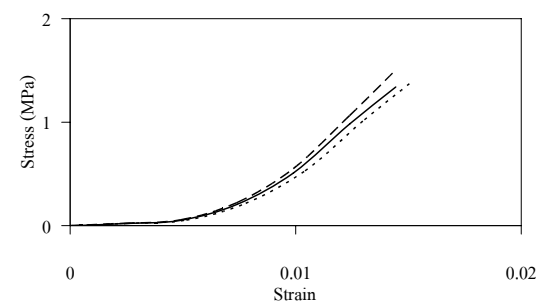
รูปที่ ค-27 RWFA 20 MKL 0 0บไอน้ำ



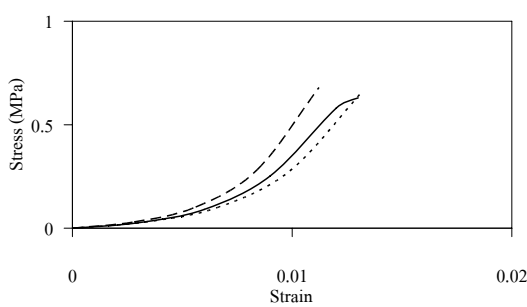
รูปที่ ค-28 RWFA 30 MKL 0 0บไอน้ำ



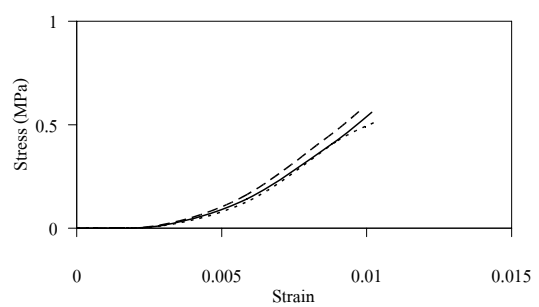
รูปที่ ค-29 RWFA 10 MKL 10 0บไอน้ำ



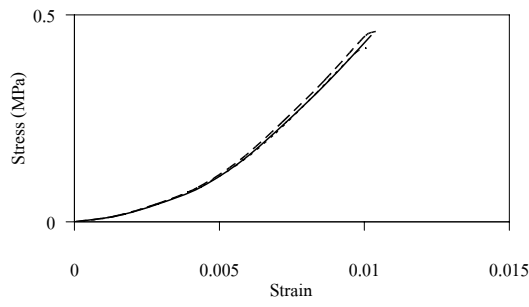
รูปที่ ค-30 RWFA 10 MKL 20 0บไอน้ำ



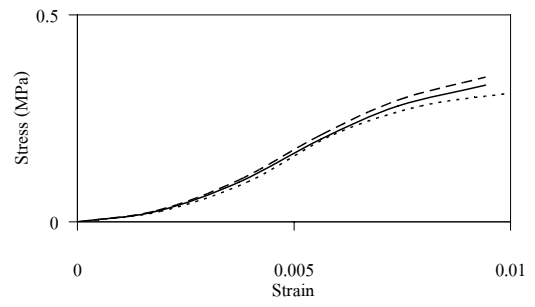
รูปที่ ค-31 RWFA 20 MKL 10 0บไอน้ำ



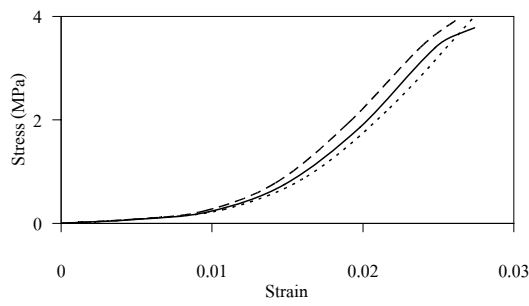
รูปที่ ค-32 RWFA 20 MKL 20 0บไอน้ำ



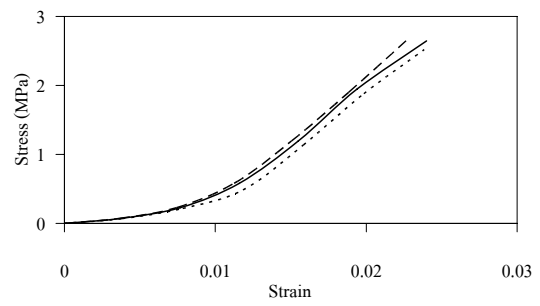
รูปที่ ค-33 RWFA 30 MKL 10 อบไอน้ำ



รูปที่ ค-34 RWFA 30 MKL 20 อบไอน้ำ



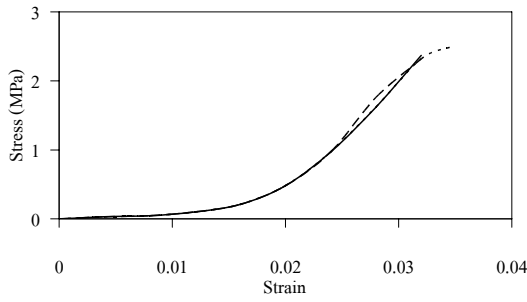
รูปที่ ค-35 RWFA 0 MKL 10 อบไอน้ำ



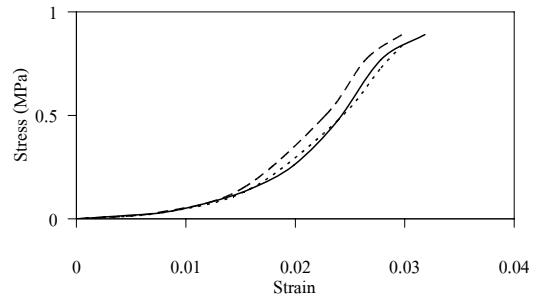
รูปที่ ค-36 RWFA 0 MKL 20 อบไอน้ำ

ภาคผนวก ง.

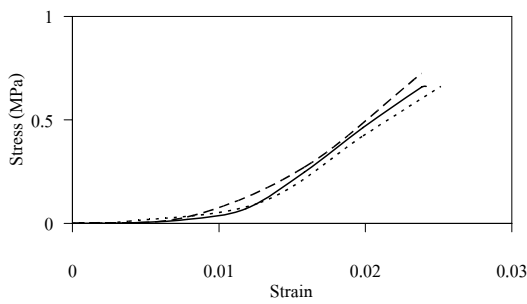
รูปแสดง stress-strain diagram ของยิปซัมเพสต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 1.0gp



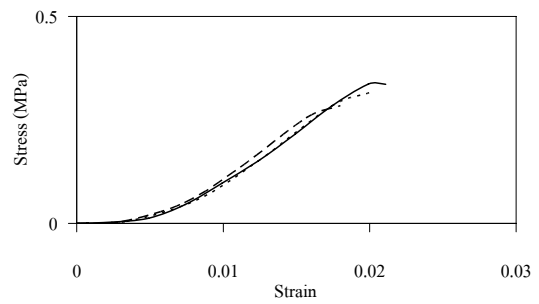
รูปที่ ง-1 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



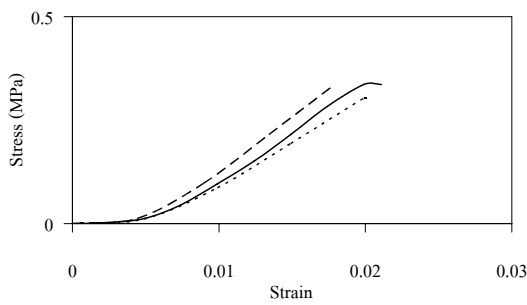
รูปที่ ง-2 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



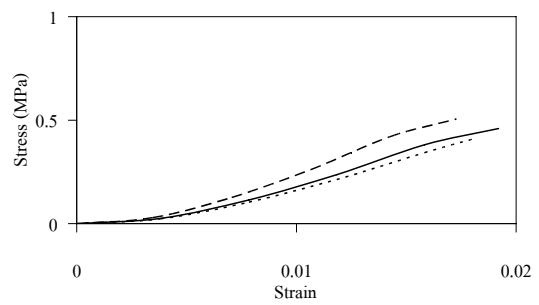
รูปที่ ง-3 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



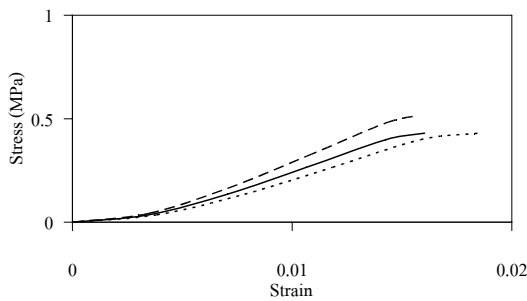
รูปที่ ง-4 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 7 วัน



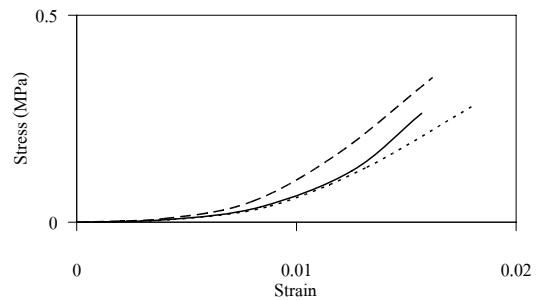
รูปที่ ง-5 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



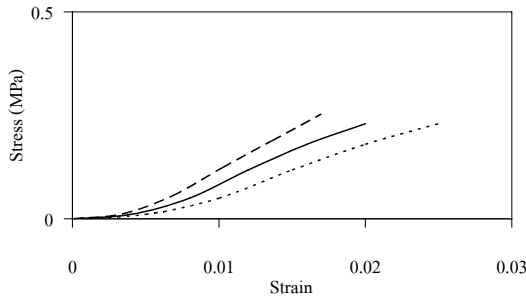
รูปที่ ง-6 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



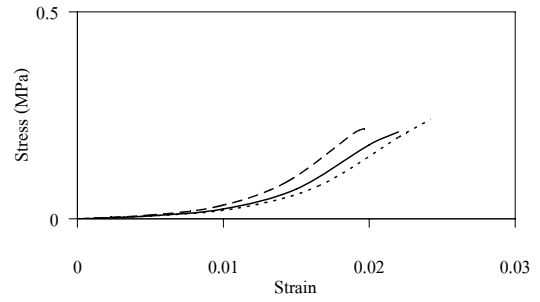
รูปที่ ง-7 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



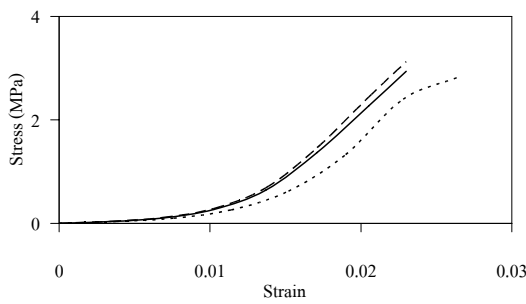
รูปที่ ง-8 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



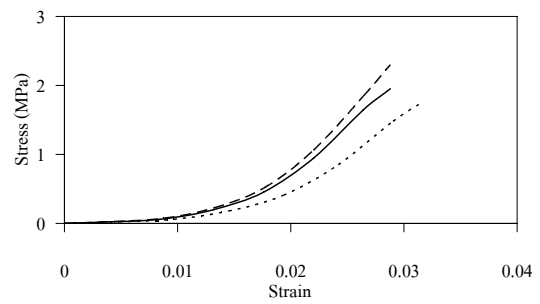
รูปที่ ง-9 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



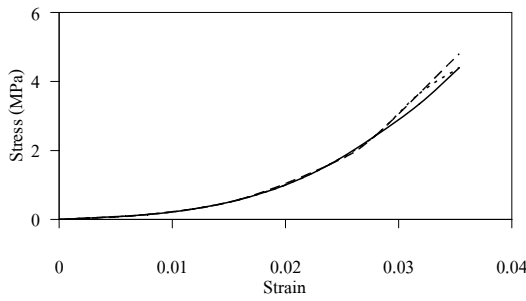
รูปที่ ง-10 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



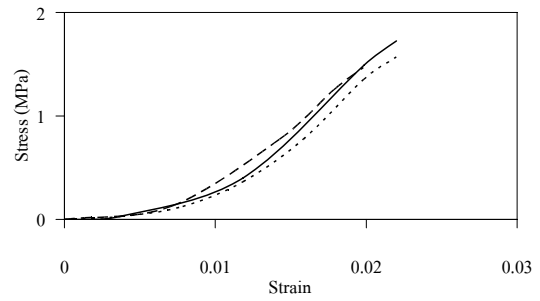
รูปที่ ง-11 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 7 วัน



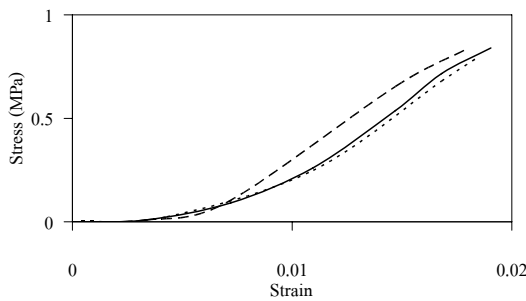
รูปที่ ง-12 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 7 วัน



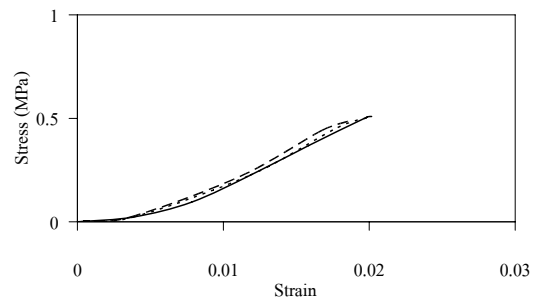
รูปที่ ง-13 RWFA 0 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



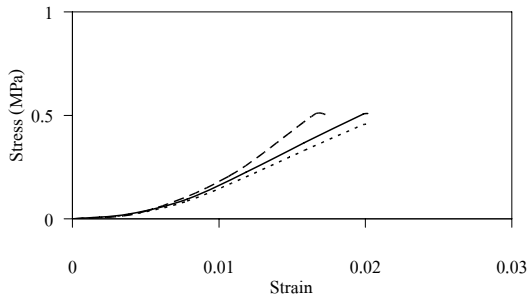
รูปที่ ง-14 RWFA 10 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



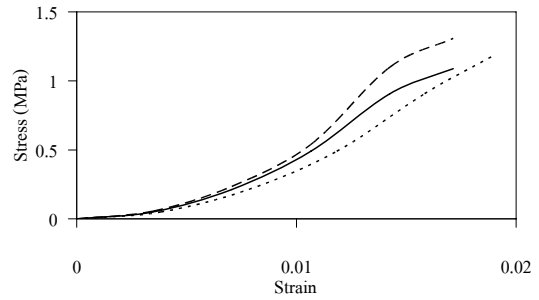
รูปที่ ง-15 RWFA 20 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



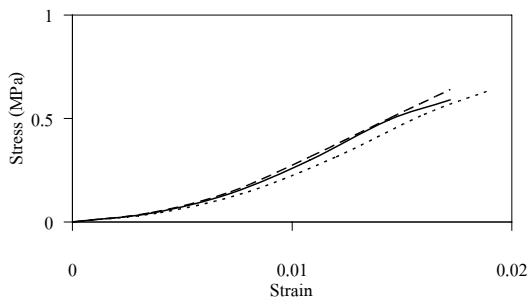
รูปที่ ง-16 RWFA 30 MKL 0 อายุบ่ม 28 วัน



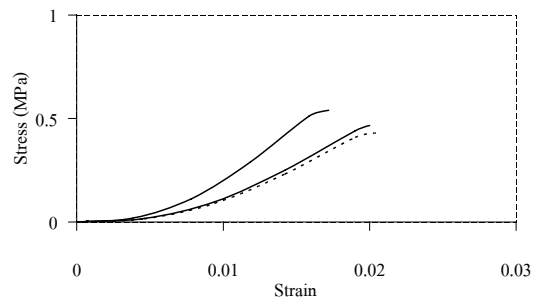
รูปที่ ง-17 RWFA 10 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



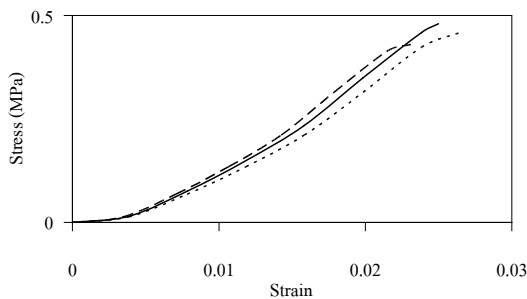
รูปที่ ง-18 RWFA 10 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



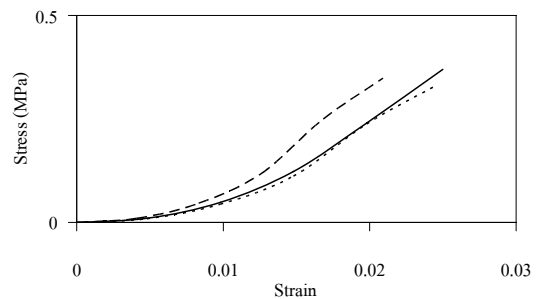
รูปที่ ง-19 RWFA 20 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



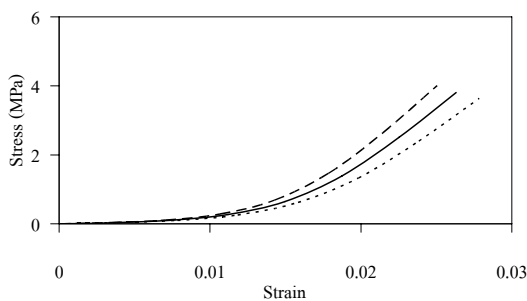
รูปที่ ง-20 RWFA 20 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



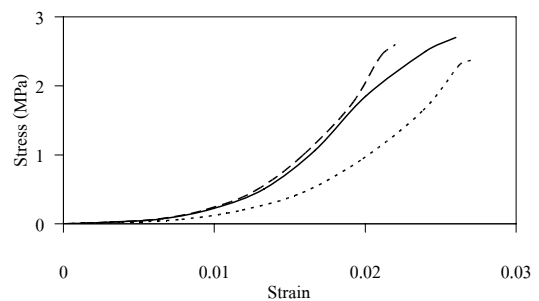
รูปที่ ง-21 RWFA 30 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



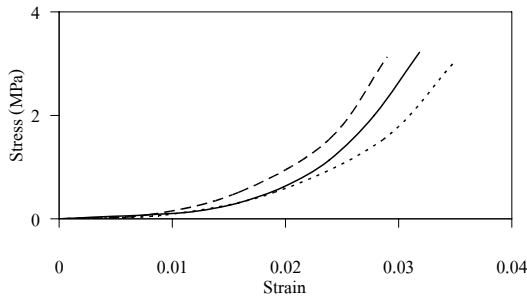
รูปที่ ง-22 RWFA 30 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



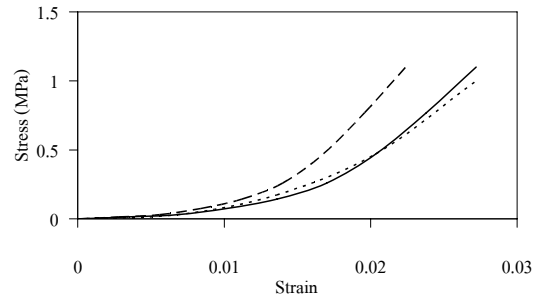
รูปที่ ง-23 RWFA 0 MKL 10 อายุบ่ม 28 วัน



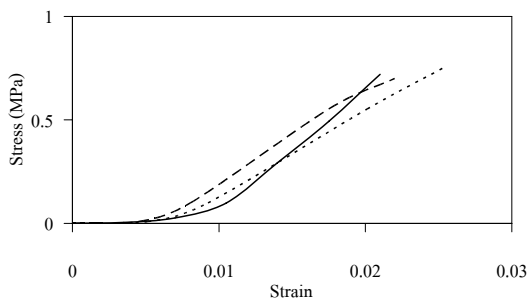
รูปที่ ง-24 RWFA 0 MKL 20 อายุบ่ม 28 วัน



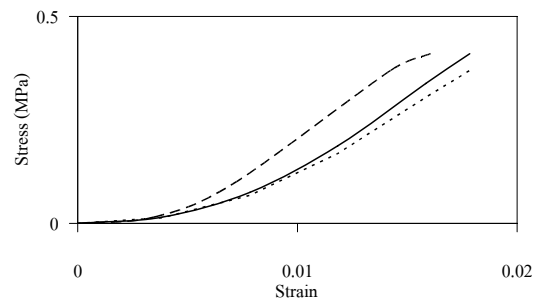
รูปที่ ง-25 RWFA 0 MKL 0 0บ.ไอน้ำ



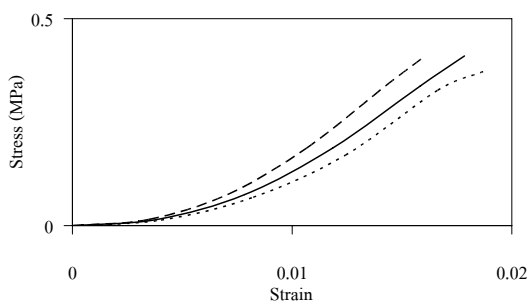
รูปที่ ง-26 RWFA 10 MKL 0 0บ.ไอน้ำ



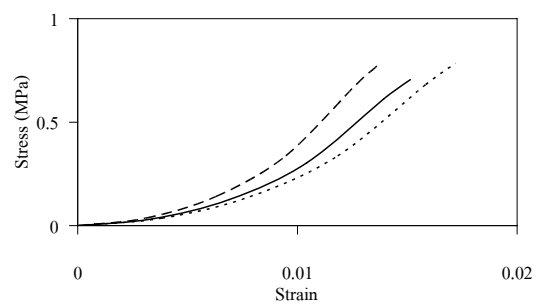
รูปที่ ง-27 RWFA 20 MKL 0 0บ.ไอน้ำ



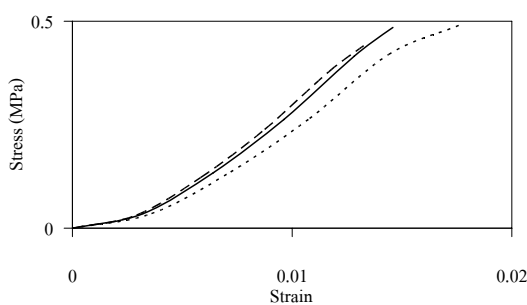
รูปที่ ง-28 RWFA 30 MKL 0 0บ.ไอน้ำ



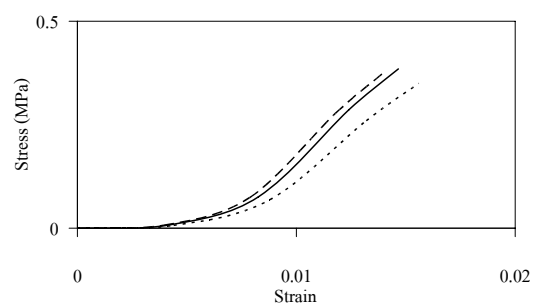
รูปที่ ง-29 RWFA 10 MKL 10 0บ.ไอน้ำ



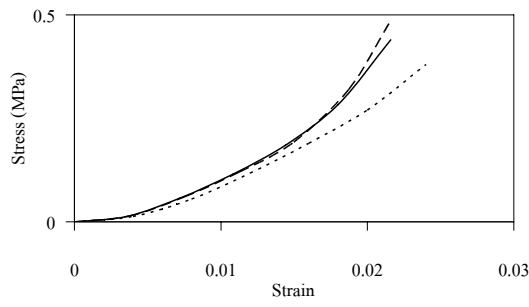
รูปที่ ง-30 RWFA 10 MKL 20 0บ.ไอน้ำ



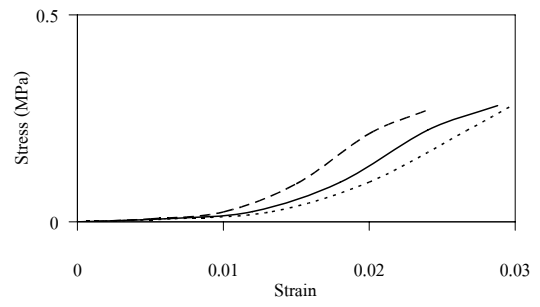
รูปที่ ง-31 RWFA 20 MKL 10 0บ.ไอน้ำ



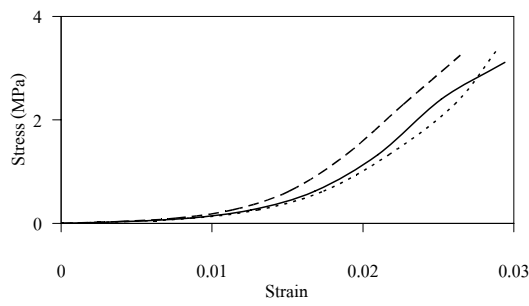
รูปที่ ง-32 RWFA 20 MKL 20 0บ.ไอน้ำ



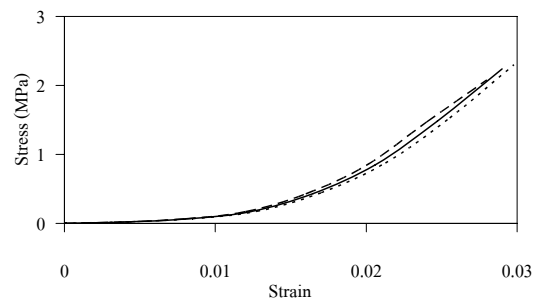
รูปที่ ง-33 RWFA 30 MKL 10 อบไอน้ำ



รูปที่ ง-34 RWFA 30 MKL 20 อบไอน้ำ



รูปที่ ง-35 RWFA 0 MKL 10 อบไอน้ำ



รูปที่ ง-36 RWFA 0 MKL 20 อบไอน้ำ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นายสุวัฒนา นิกม

รหัสประจำตัวนักศึกษา

4910120052

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2548

(วิศวกรรมโยธา)